Ontwikkelingsverband Houten / Hofstad 4B - blok 2

datum	24 maart 2025	*project*	Hofstad 4B - blok 2
vestiging	Arnhem	*betreft*	Invloed wijzigingen constructie
uw kenmerk	--	*versie*	002
ons kenmerk	B.2019.0517.07.N001	*auteur*	[redacted]
2e lezer/secr.	JBY|BDI	*contactpersoon*	
		e-mail/telefoon	

Invloed wijzigingen woningconstructie op spoortrillingen

1. Inleiding

In opdracht van Ontwikkelingsverband Houten heeft DGMR Bouw B.V. in de periode 2019 - 2021 trillingsonderzoek gedaan voor het project Hofstad 4B - blok 2 in Houten. Dit onderzoek heeft bestaan uit het geven van een visie[1] en prognose op de trillingsproblematiek (2019), gebaseerd op door derden uitgevoerde metingen op de kavel en aanvullende metingen door DGMR. In het jaar 2021 zijn ook simulatieberekeningen[2] gedaan aan het qua trillingen maatgevende bouwblok 2b. De conclusie uit dit onderzoek, die als bijlage 1 in deze notitie is opgenomen, luidde dat ook na optimalisatie van de gebouwconstructie niet zou worden voldaan aan de strenge streefwaarden die de trillingsrichtlijn SBR-B stelt voor nieuwe woningbouw gedurende de nachtperiode. Naar verwachting zouden 1 à 2 goederentreinen per nacht (alleen erts- of kalktreinen) de streefwaarde voor de nachtperiode in beperkte mate overschrijden, maar nog wel voldoen aan de voor bestaande bouw geldende streefwaarden.

In het onderzoek is ook gekeken naar de invloed van het toepassen van trillingsisolatie onder het bouwblok, zie tabel 1. Daarmee zouden trillingen wel kunnen voldoen aan de streefwaarden voor nieuwbouw, maar de impact van deze maatregel is vanwege de benodigde zeer slappe trillings-isolatie zowel constructief alsook qua kosten ingrijpend. Afgewogen tegen het geringe aantal treinen dat de streefwaarde overschrijdt en de beperkte mate van overschrijding, geeft deze maatregel maar zeer weinig winst op het woon- en leefklimaat en is daarmee als weinig doelmatig aan te merken. Hierover is in het jaar 2022 een brief[3] aan het college gestuurd.

tabel 1: berekende trillingssterkten V_{max} en V_{per} blok 2b (overgenomen uit B.2019.0517.02.R002)

	Berekend		Toetswaarden[1)]	
	$V_{eff,max,V}$	$V_{eff,max,H}$	V_{max}	V_{per}
Uitgangssituatie	0,28	0,35	0,3	0,02
Trillingsisolatie bovenbouw	0,16	0,18	0,2	0,01

1) overschrijdingen streefwaarde voor nieuwbouw in rood aangegeven

Inmiddels heeft het college aangegeven hierin mee te willen gaan, mits trillingssterkten niet hoger zullen uitvallen dan in eerder rapport aangegeven. Sinds het verschijnen van dit rapport[2] in het jaar 2021, zijn er enkele wijzigingen doorgevoerd in de gebouwconstructie. In deze (opleg)notitie, die in samenhang met het eerder uitgevoerde onderzoek moet worden beschouwd, wordt hierop ingegaan.

[1] *DGMR-rapport B.2019.0517.00.R001 - "Trillingen Hofstad 4b, Houten", 19 september 2019*
[2] *DGMR-rapport B.2019.0517.02.R002 - "Onderzoek spoortrillingen bouwblok 2b2", 18 mei 2021*
[3] *Brief B.2019.0517.02.B004 - "Doelmatigheid trillingsisolatie blok 2b", 23 augustus 2022*

2. Constructiewijzigingen

In het constructief ontwerp van blok 2b zijn een aantal wijzigingen doorgevoerd waarvan de impact op trillingen zijn te beoordelen. Deze wijzigingen zijn:

1 De begane grondvloeren worden uitgevoerd als rib-cassettevloer in plaats van een kanaalplaatvloer;
2 De verdiepingsvloer wordt uitgevoerd in 200 mm massief beton in plaats van 250 mm breedplaat;
3 Massieve betonwanden van 250 mm (tunnelbouw) in plaats van 2 x 100 mm prefab betonbladen.
4 De eindwanden worden 150 mm massief beton in plaats van 1 x 100 mm;
5 De stramienmaat wordt 5,4 meter in plaats van 5,7 meter;

Het funderingssysteem (lengte en aantal palen) blijft ongewijzigd.

3. Invloed op trillingen

Uit de gedane trillingssimulaties[2] blijkt dat er twee trilling mechanismen bepalend zijn voor de optredende trillingssterkten. Dit zijn:

- Een **kantelbeweging** van het hele **gebouwcasco** op haar funderingssysteem rond 4 Hz. Deze trilvorm is hoofdzakelijk verantwoordelijk voor hogere trilniveaus in horizontale richting op de 1e verdieping en de zolder.
- Een **verticale beweging met** eveneens een **lichte kanteling** van het **casco**, vanwege de niet symmetrische paalverdeling. Deze trilvorm is in gelijke mate als de trilvorm hiervoor bepalend voor de verticale trillingen.

Uit bovenstaande blijkt dat beide trilvormen hun ontstaan vinden in een globale trilbeweging van het gebouwcasco op de funderingspalen en dit wordt op hoofdlijnen bepaald door de globale massaverdeling en afmetingen van het casco en de stijfheid van het funderingssysteem en de omringende bodem.

Vloeren

De woningvloeren zijn zo ontworpen dat de buig-eigenfrequenties (≥10 Hz) ruim boven de dominante frequenties van 4 Hz en 8 Hz in het trillingsspectrum van de treinen liggen. Dat gold voor de nu verlaten 250 mm breedplaatvloer op 5,7 meter overspanning en geldt ook voor de hiervoor in de plaats komende 200 mm massieve betonvloer (tunnelbouw) op 5,4 meter overspanning. Dit betekent dat er op vloerniveau nauwelijks trillingsversterking optreedt en dat de nu gerapporteerde trillingssterkten nagenoeg geheel voor rekening komen van de meer globale trilbeweging van het gebouwcasco, zoals hierboven omschreven. Dit blijkt ook uit de berekende trillingssterkten op constructief stijve punten zoals de aansluitingen tussen vloeren en wanden (hoekpunt vloer), waar de trillingssterkten nagenoeg gelijk zijn als op het vloermidden. Zolang buig-eigenfrequenties van vloeren door de voorgenomen wijzigingen niet terugzakken in het te mijden frequentiegebied tot 10 Hz, zal de trillingssterkten op vloerniveau dan ook niet noemenswaardig wijzigen.

Wanden

Bij de overgang van prefab naar tunnelbouw, worden ook de twee enkele betonbladen (2 x 100 mm) van de woningscheidende wand vervangen door een gemeenschappelijke gestorte dikkere betonwand (250 mm). Ook dat heeft op de nu geconstateerde iets hogere trillingssterkten weinig invloed. Het globale trilgedrag van het gebouwcasco gaat het om de massa-stijfheids-verdeling waarbij de stijfheid, in de maatgevende verticale richting en horizontale richting haaks op het spoor, vooral bepaald wordt door de afschuifstijfheid van deze wanden. Die is bij zowel prefab

bouw met gedubbelde bladen alsook tunnelbouw met een enkel dikker blad zeer hoog en niet van invloed op het trilgedrag bij de maatgevende frequenties tot 10 Hz.
De inklemstijfheid van de vloeren in de wanden, die ook van invloed is op de buig-eigenfrequenties van de vloeren zal wel iets wijzigen, maar bij tunnelbouw is deze inklemstijfheid hoger waardoor de buig-eigenfrequenties van vloeren iets hoger komen te liggen, zelfs bij een iets dunnere vloer (200 mm in plaats van 250 mm). De hogere buigstijfheid van vloeren komt niet alleen voort uit de meer buigstijve woningscheidende wanden. Ook de monolithische verbinding van vloer en wand bij tunnelbouw draagt hieraan bij.

Trilgedrag woningcasco
De veranderingen op vloerniveau hebben weinig invloed op het trilgedrag van deze vloeren in het relevante frequentiegebied tot 10 Hz. De wijziging van de wandopbouw heeft ook nauwelijks invloed omdat bij beide bouwsystemen de wanden bij deze frequenties nog als stijf zijn te beschouwen en er nauwelijks vervorming optreedt.

In de nu dominante trilvormen rond 4 Hz en 8 Hz ondergaat het als stijf te beschouwen woning-casco een kantelbeweging (4 Hz) of een gecombineerde verticale-/kantelbeweging (8 Hz) op de fundering. Aangezien het funderingssysteem verder ongewijzigd is en er maar een kleine verandering optreedt in de massaverdeling van het casco, de wanden iets zwaarder en de vloeren iets lichter zijn, verandert er weinig aan de frequenties van deze twee dominante trilvormen. Verwacht wordt dat het woningcasco dan in gelijke mate reageert op de trillingsaanstoting van de treinen, met vergelijkbare trillingssterkten in de woningen tot gevolg.

4. Conclusie

Op grond van de voorgenomen wijziging van de gebouwconstructie van Hofstad 4b – blok 2, van een prefab betoncasco naar in situ gestort beton (tunnelbouw), zijn er geen verschillen qua trillingssterkten vanuit het spoor te verwachten. De eerder[2] gerapporteerde maximum trillings-sterkten V_{max} op vloerniveau van 0,35 horizontaal en 0,28 verticaal zijn nog steeds actuele verwachtingswaarden.

[redacted]
DGMR Bouw B.V.

Bijlage 1

Titel	Rapport B.2019.0517.02.R002 van 18 mei 2021
Omvang	33
Bron	DGMR
Toelichting	Onderzoek spoortrillingen bouwblok 2b2

BPD - Hofstad 4B, Houten

Onderzoek spoortrillingen bouwblok 2b2

Status	**definitief**
Versie	002
Rapport	B.2019.0517.02.R002
Datum	18 mei 2021

Colofon

Opdrachtgever	BPD Ontwikkeling De Brand 30 3823 LK AMERSFOORT
Contactpersoon opdrachtgever	[redacted]
Project	BPD/Hofstad 4B, Houten
Betreft	Trillingen
Uw kenmerk	-
Rapport	B.2019.0517.02.R002
Datum	18 mei 2021
Versie	002
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Contactpersoon	[redacted]
Auteur	
Projectadviseur	
2e lezer/secr.	JBY/PZW

Inhoud

1. Inleiding 4

2. Situatie en uitgangspunten 5
2.1 Situatie 5
2.2 Uitgangspunten 5

3. Simulatie trillingen 6
3.1 Model 6
3.2 Spoor 8
3.3 Bodemeigenschappen 8
3.4 Randvoorwaarden 10
3.5 Rekenmethodiek 10

4. Resultaten 11
4.1 Bodemmodel 11
4.2 Model bodem plus gebouw 12

5. Maatregelen 16
5.1 Mogelijke maatregelen 16
5.2 Effect maatregelen 16

6. Toetsing 19

7. Conclusies en aanbevelingen 21

Bijlagen
Bijlage 1 Bodemopbouw
Bijlage 2 Trillingsresponsies (vervormingsbeelden) - uitgangssituatie
Bijlage 3 Trillingsresponsies - Bovenbouw trillingsgeïsoleerd

1. Inleiding

In opdracht van BPD ontwikkeling heeft DGMR Bouw B.V. onderzoek gedaan naar de te verwachten spoortrillingen en eventueel te nemen maatregelen aan de te bouwen woningen voor het project Hofstad 4B blok 2. Dit bouwplan ligt in Houten aan de spoorlijn Utrecht – Geldermalsen, die naast een drukke spoorverbinding voor reizigers ook een druk bereden goederenspoorlijn is.

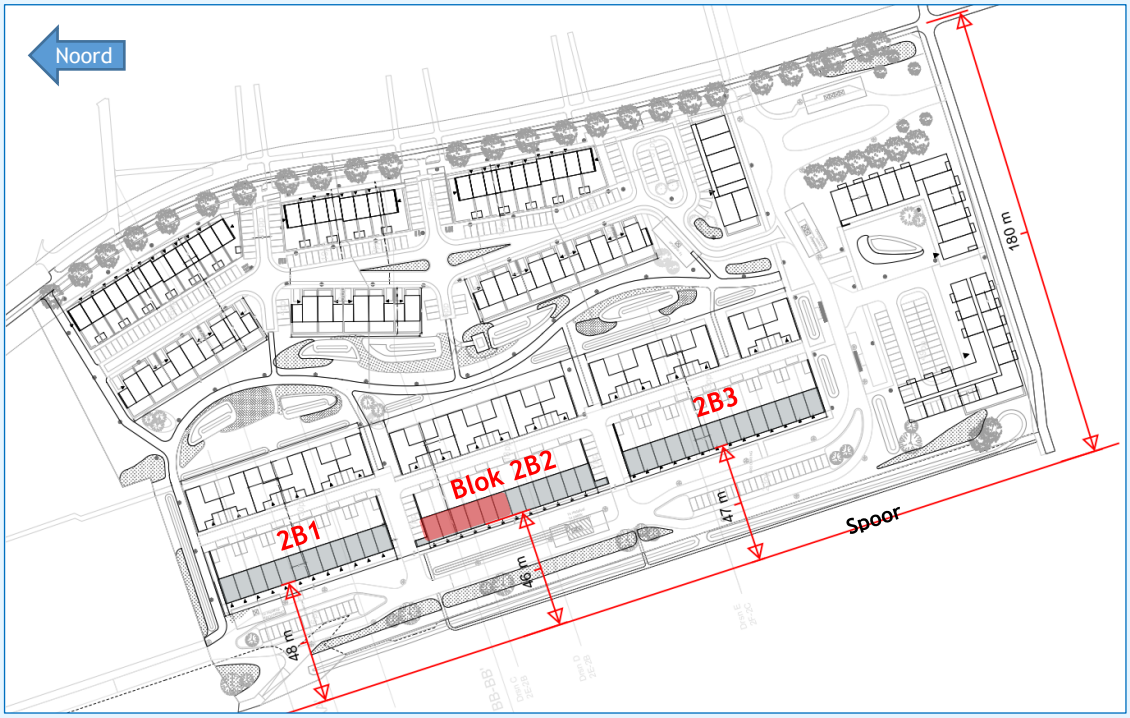
Naar de trillingsopwekking op de kavel zijn in het jaar 2018 trillingsmetingen verricht en de daarop gebaseerde prognose door het uitvoerende bureau wees op hoge te verwachten trillingssterkten in de voorziene eengezinswoningen. DGMR heeft in 2019 een second opinion gegeven en de verwachting uitgesproken dat trillingssterkten V_{eff} op vloeren in de te bouwen woningen (worst case) mogelijk aanzienlijk lager kunnen uitvallen vanwege de gelaagde bodemtoestand. Niettemin kunnen trillingssterkten in de woningen oplopen tot een V_{max} van 0,4 (mm/s) in verticale richting. In horizontale richting op de verdiepingen zouden eveneens waarden tot 0,4 kunnen optreden, maar in het geval van sterke resonantie van het woningcasco zelfs tot 1,4. Dit hangt af van de eigenschappen van de woningconstructie en blijft voorbehouden aan incidentele treinpassages onder de meest ongunstige omstandigheden. Trillingssterkten hoger dan 0,2 voldoen niet aan de streefwaarde voor de nachtperiode van 0,2 uit de trillingsrichtlijn SBR-B.

In dit rapport is door middel van trillingssimulatie met een eindig elementenmodel nader onderzoek gedaan naar de trillingsopwekking in de woningen door treinpassages en is gekeken naar mogelijkheden om met maatregelen aan de woningen trillingssterkten te reduceren tot onder de streefwaarde uit de SBR-B.

2. Situatie en uitgangspunten

2.1 Situatie

Figuur 1 toont het project Hofstad 4B in Houten en de ligging ten opzichte van de spoorlijn Utrecht (Houten) – Geldermalsen (Culemborg). De eerstelijns bebouwing van dit project, de bouwblokken 2B1 t/m 2B3, wordt gerealiseerd op een afstand variërend tussen 46 en 48 meter tot het hart van het dichtstbijzijnde spoor.



figuur 1: situatie project Hofstad 4b blokken 2B1 t/m 2B3

2.2 Uitgangspunten

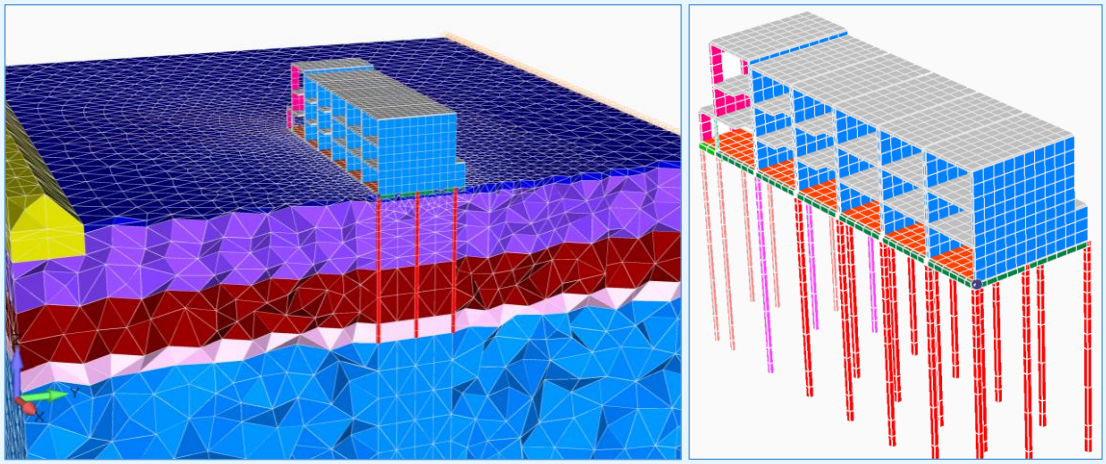
Voor het onderzoek is gebruikgemaakt van de volgende verstrekte informatie:

[1] Nothing BEATS the architect, tekeningenset xxx-DO-210 (12-10-2020).
[2] Memo [redacted] Bouwtechniek M-218054-DO-05_A - Uitgangspunten deelplan 2B.
[3] Memo [redacted] Bouwtechniek M-218054-TO-001_A - Constructieopzet deelplan 2B.
[4] Rapport [redacted] Geo- en Milieutechniek 117228 (11 juli 2018) – Sonderingen.
[5] Memo [redacted] Bouwtechniek M-218054-VO-003_A – Funderingsadvies.

3. Simulatie trillingen

3.1 Model

Voor een prognose van de te verwachten trillingen in de eerstelijns bebouwing is een eindig elementenmodel opgesteld van de bodem met een deel van de eengezinswoningen van blok 2B2. Dit blok bestaat uit twee onderling gedilateerde bouwblokken van elk zes woningen. Het noordelijk deel van blok 2B2, bestaande uit zes woningen, is opgenomen in het rekenmodel, zie figuur 2.



figuur 2: rekenmodel noordelijke helft blok 2B2 met rechts het palenpatroon

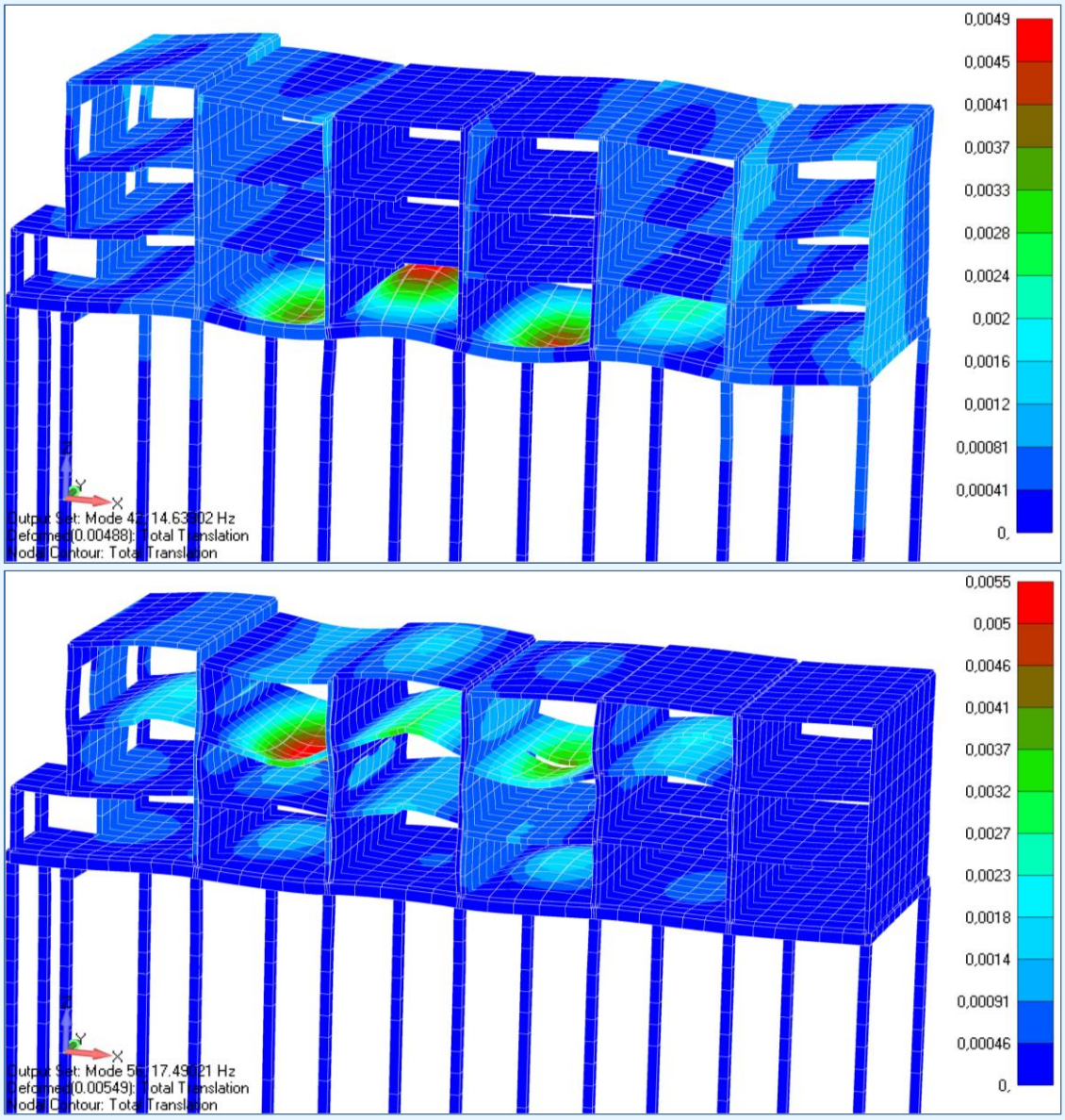
Het rekenmodel is gebaseerd op de verstrekte informatie van de architect [1] en de constructeur [2,3,5]. De gevelopbouw is schematisch meegenomen in het model, in de vorm van 100 mm dikke panelen met een massa van 50 kg/m². Deze panelen dragen in geringe mate bij aan de horizontale stijfheid van het casco, maar zijn verder van weinig betekenis voor trillingen op vloerniveau.
De gevels zijn niet getoond in figuur 2.

De begane grondvloer betreft een kanaalplaatvloer en de massa en stijfheid van deze vloer in het model zijn in overeenstemming gebracht met de werkelijke mechanische eigenschappen.
De begane grondvloer is opgelegd op de randbalken. Op de verdiepingen zijn breedplaatvloeren toegepast en ook deze zijn qua eigenschappen zoveel mogelijk in overeenstemming gebracht met de werkelijkheid. De verdiepingsvloeren zijn momentvast verbonden met de woningscheidende wanden. In tabel 1 worden de eigenschappen van de verschillende onderdelen gespecificeerd.

tabel 1: eigenschappen constructie

Onderdeel	Materiaal	Massa [kg/m²]	Massaopslag [kg/m²]	Demping
gevels	100 mm HSB	50	--	3%
woningscheidende wanden	2 x 100 mm beton	470	--	
begane grondvloer	kanaalplaat 260 mm + 60 mm ZC	375	175 (ZC + 50% variabel)	
verdiepingsvloeren	breedplaat 250 mm + 60 mm ZC	590	175 (ZC + 50% variabel)	
dak	breedplaat 250 mm	590	--	

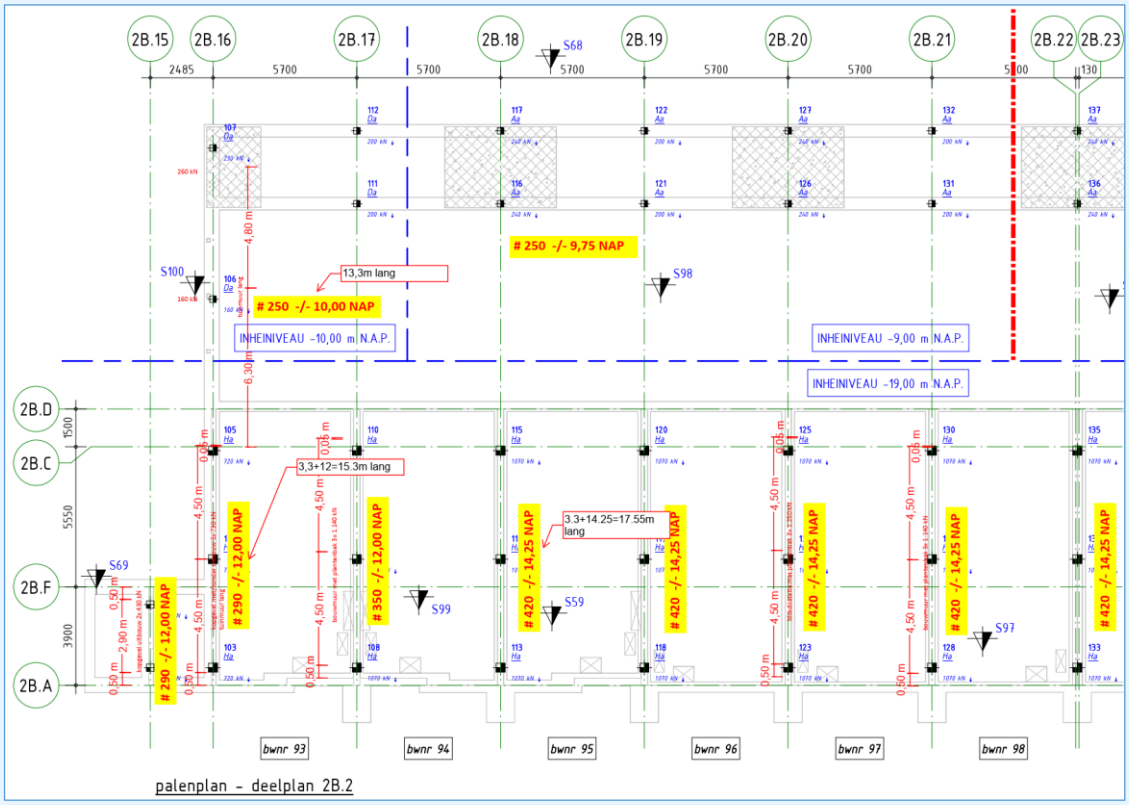
De laagste (buig)eigenfrequentie van de vloeren ligt bij de vloerbreedte van 5,7 m op ongeveer 14,5 Hz voor de begane grond en op 15 Hz voor de verdiepingsvloeren. Tussen 14,5 Hz en 17,5 Hz zijn er vele combinaties van vloereigenfrequenties te onderscheiden, figuur 3 toont twee voorbeelden.



figuur 3: voorbeelden vloereigenfrequenties in het frequentiegebied van 14,5 tot 17,5 Hz

De fundering bestaat uit prefab funderingspalen. Voor de vier rechter woningen in figuur 3 gaat het om drie palen per bouwmuur met een dikte van 420 mm, één aan voorzijde, één aan achterzijde en één halverwege de woning. De twee linker woningen zijn uitgevoerd met een afwijkende paaldikte, van rechts naar links aflopend van 350 tot 290 mm in de uitbouw van de eindwoning.

Deze eindwoning heeft een tuinmuur aan achterzijde op een onderheide funderingsbalk. Hiervoor zijn twee palen van 250 mm dik gebruikt. Deze funderingsbalk is constructief verbonden met de woning en is meegenomen in het rekenmodel. De palen onder de woningen zijn ingeheid tot een diepte van 12 tot 14,25 m onder NAP, waarmee de paallengte 16 tot 18,5 meter bedraagt. Voor de prognose is het van belang dat alle palen tot in de draagkrachtige zandlaag reiken, die in het rekenmodel vlak ligt en niet de plooiing bevat die uit de sonderingen naar voren komt. In het rekenmodel zijn deze palen allen 18,5 m lang. De palen onder de tuinmuur zijn korter genomen, ongeveer 13 meter. Het palenplan is weergegeven in figuur 4.



figuur 4: palenplan blok 2B2 (linkerhelft)

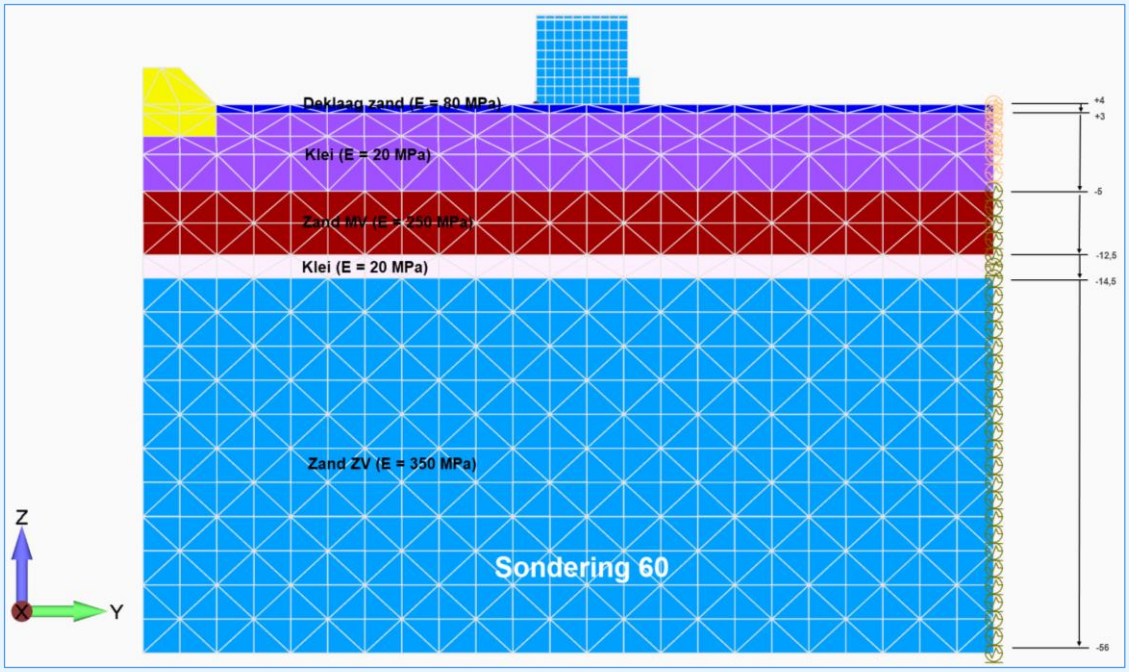
3.2 Spoor

Om de trillingsbelasting van de treinen op de bodem te kunnen aanbrengen is het spoorlichaam in het bodemmodel meegenomen. Onder het spoorlichaam is grondverbetering toegepast en is de kleilaag vervangen door zand. Hierdoor wordt de aangebrachte kracht niet alleen opgedrongen aan de toplaag, maar meer verdeeld over de bovenste lagen.

3.3 Bodemeigenschappen

Het bodemmodel omvat de bodem tot op 50 meter diepte. De bodemopbouw in het model volgt qua gelaagdheid sondering 60 van de in 2018 door bureau [redacted] uitgevoerde sonderingen. Dit sonderingspunt bevindt zich ter plaatse van het huizenblok. Deze sondering en de gekozen schematische opbouw zijn weergegeven in bijlage 1.

Gekozen is voor een schematische opbouw in vijf lagen met als bovenste laag dekzand en daaronder: een kleilaag, een matig vaste zandlaag, een diepere kleilaag en tot slot een zeer vaste zandlaag, zie figuur 5. De mechanische eigenschappen van deze lagen zijn opgenomen in tabel 2.



figuur 5: bodemopbouw

tabel 2: eigenschappen bodemlagen

Laagomschrijving	Diepte [bovenkant t.o.v. NAP]	Dichtheid [kg/m^3]	Dyn. E-modulus [MPa]	Dwarscontractie [-]
1: dekzand	+4	1600	80	0,3
2: klei	+3	1500	20	0,4
3: zand matig vast	-5	1800	200	0,3
4: klei	-12,5	1500	20	0,4
5: zandlaag zeer vast	-14,5	2000	350	0,3

De keuze van de dynamische stijfheden heeft veel invloed op de rekenresultaten en de praktijk wijst uit dat hierin aanmerkelijke verschillen kunnen ontstaan qua interpretatie van sonderingen. Vuistregels die worden aangetroffen zijn bijvoorbeeld een dynamische E-modulus uiteenlopend van 10 tot 20 maal de conusweerstand of ervaringswaarden gebaseerd op een combinatie van de conusweerstand en de wrijvingsweerstand. De verschillen in aannames voor de dieper liggende vaste zandlagen zijn over het algemeen niet zo groot en hebben ook minder invloed op de uitkomsten. De aannames voor de minder diep liggende klei en/of veenlagen lopen daarentegen sterk uiteen en dit heeft veel invloed. Over de te hanteren stijfheden is overleg gevoerd met de adviseur namens de gemeente. Dit heeft geleid tot wat hogere stijfheden voor met name de kleilagen.

Voor de hier aanwezige kleilagen zijn naar aanleiding van het overleg met de adviseur namens de gemeente verschillende stijfheidswaarden beproefd. Van belang is dat de stijfheid van de bovenste bodemlagen redelijk overeenkomt met de praktijk opdat de bodem bij ongeveer dezelfde frequenties gevoelig is voor trillingen en de overdracht van bodem naar een gebouwfundatie ook enigszins overeenkomt met de praktijk. Naar de overdracht van bodem naar gebouw zijn aan de overzijde van het spoor aan bebouwing aan de Edelsteen/Maansteen metingen gedaan die hiervoor als uitgangspunt dienen. In de berekening zijn voor de kleilagen waarden voor de E-modulus aangehouden van 10, 20, 30 en 60 MPa. Bij waarden van 30 tot 60 MPa blijkt er van bodem naar gebouwfundatie weinig tot geen overdrachtsverzwakking meer op te treden en de gevoeligheid van de bodem schuift ook naar hogere frequenties dan in de praktijk ervaren. Deze waarden resulteren niet in een realistisch overdrachtsmodel. De waarden die qua gedrag van de bodem en overdracht naar een gebouwfundatie het meest overeenkomen met de praktijk liggen tussen 10 tot 20 MPa. In het rekenmodel is de hoogste waarde uit deze bandbreedte van 20 MPa aangehouden.

3.4 Randvoorwaarden

De onderkant van het model, op 60 m onder maaiveld, wordt beschouwd als ingeklemd dus volledig in rust. Langs de zijkanten van het model, gezien vanuit de voortplantingsrichting van de trillingsgolven, zijn symmetrievoorwaarden aangebracht. Dit betekent dat knopen alleen rotaties en translaties kunnen ondergaan in het snijvlak, maar niet uit dit vlak. Trillingen uitgezonden door de spoorbaan rollen als het ware tussen deze snijvlakken door van spoor richting gebouw. Aan de achterzijde van het model, dus voorbij het huizenblok, wordt de trillingsenergie afgevangen door middel van viskeuze demping.

3.5 Rekenmethodiek

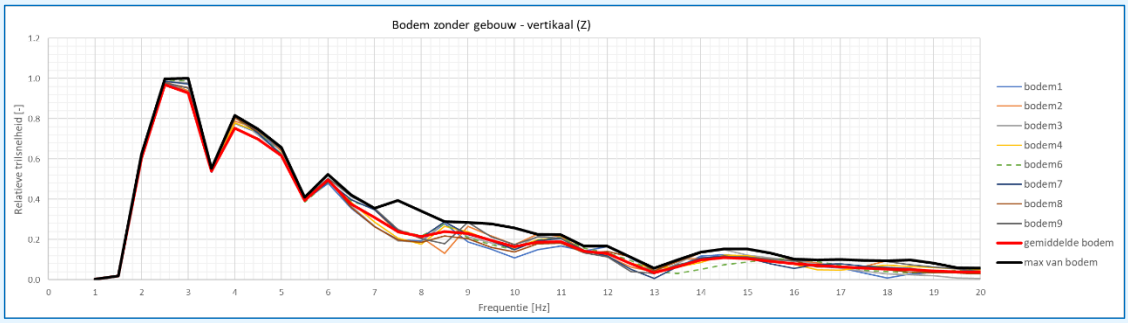
Om de te verwachten trillingen in het bouwblok zo getrouw mogelijk te kunnen prognosticeren, zijn als eerste stap de trillingen van het bodemmodel op maaiveld zo goed mogelijk afgestemd op de gemeten trillingssterkten. Dit is gedaan in een kaal bodemmodel, dus nog zonder het huizenblok. Van dit model is het gemiddelde van de trillingssterkte binnen de projectie van het bouwblok getuned op de uitgevoerde trillingsmetingen, door het bijregelen van de krachtinput op de (denkbeeldige) spoorbaan totdat de berekende waarde overeenstemt met de gemeten waarde. Dit is spectraal gedaan voor alle frequentiestappen in het berekende frequentiedomein van 0 tot 20 Hz. Nadat de trillingen in verticale richting in overeenstemming zijn gebracht, is nog een check gedaan op de trillingen in horizontale richting haaks op het spoor.

Na het afstemmen van de rekenbelasting op de maaiveldmetingen is het gebouwmodel (huizenblok) aangebracht in de bodem en zijn de te verwachten trillingssterkten doorgerekend op de aangebrachte krachtinput op de spoorbaan.
In deze berekeningen zijn de te verwachten trillingssterkten in de bodem onder het bouwblok en op een selectie van constructief stijve punten (hoek gevel/bouwmuur) en woningvloeren bepaald. Behalve inzicht in de te verwachten trillingssterkten op de woningvloeren, geeft dit ook inzicht in de overdrachtsverzwakking van bodem naar gebouwfundatie.

4. Resultaten

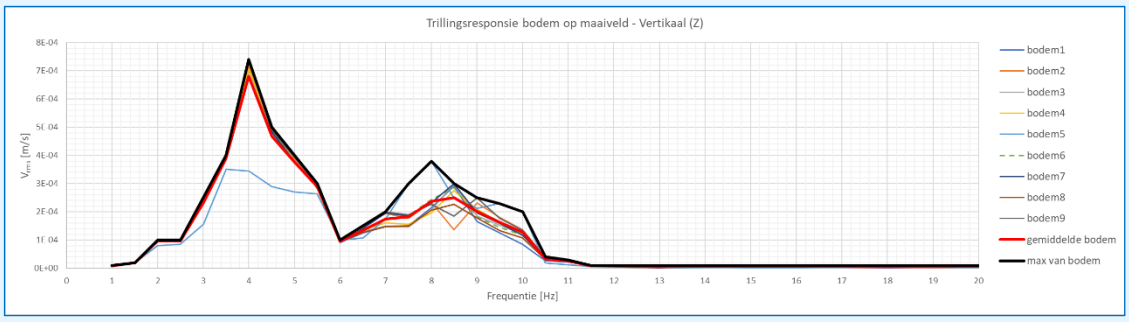
4.1 Bodemmodel

Figuur 6 toont de responsie van de bodem op een constante kracht over het frequentiebereik van 0 tot 20 Hz (sweep) in verticale richting op de positie van de spoorbaan. De responsie toont de genormaliseerde trillingsgevoeligheid van de bodemopbouw in het model bij de betreffende aanstootfrequenties. Te zien is dat de bodem in het model gevoelig is voor trillingen tussen 2 Hz en 6 Hz. Bij deze frequenties worden spoortrillingen relatief goed overgedragen door de bodem.



figuur 6: trillingssterkten op maaiveld (Z), eenheidskracht 0 – 20 Hz (Bodemprofiel 60)

Om de responsie van de bodem, zie figuur 6, in overeenstemming te brengen met de gemeten trillingssterkten tijdens treinpassages, is het verschil tussen beide aangebracht als correctieterm op de krachtaanstoting. Daaropvolgend is een hernieuwde berekening gedaan om te verifiëren dat het gemeten trillingsspectrum in de bodem op maaiveld overeenstemt met het trillingsspectrum volgens het model. Het maximum spectrum over de meetpunten is daarbij als leidend genomen. In figuur 7 worden de berekende trillingssterkten (spectraal) op maaiveld binnen het bouwvlak getoond. Te zien is dat er boven 11 Hz geen substantiële trillingsbijdragen meer zijn die van belang zijn voor het kunnen voldoen aan de trillingseisen (streefwaarden SBR-B). De dominante frequenties liggen rond 4 Hz en rond 8 Hz en deze houden verband met respectievelijk de hoge aslasten van de zware kolentreinen en de onderhoudstoestand van de treinwielen.



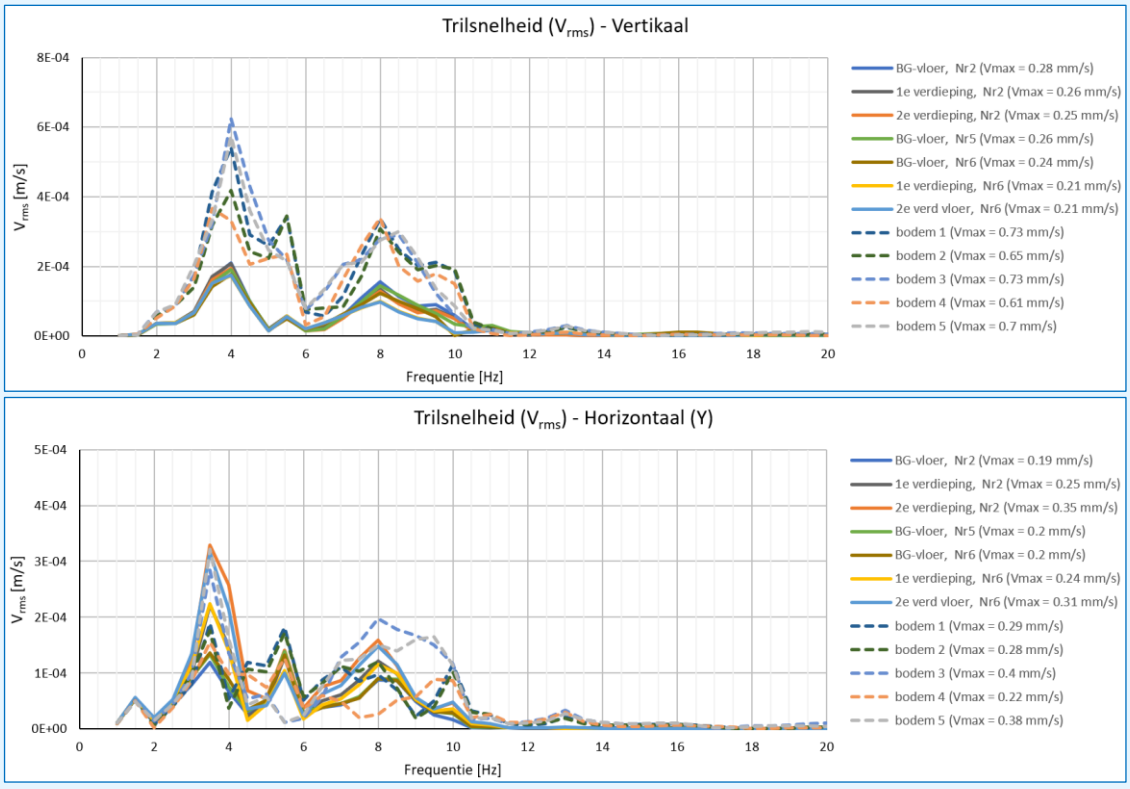
figuur 7: trillingssterkten op maaiveld (Z), afgestemd op meetresultaten

4.2 Model bodem plus gebouw

Na het tunen van de krachtaanstoting op de gemeten trillingssterkten in de bodem is het (gedeeltelijke) gebouwmodel aangebracht en zijn de trillingsresponsies (0 – 20 Hz met stapgrootte 0,5 Hz) doorgerekend. Bijlage 2 toont de resultaten voor de dominante frequenties 2 tot 10 Hz uit het doorlopen frequentiegebied van 0 tot 20 Hz. Afgebeeld zijn het vervormingsbeeld, met de daarin herkenbare golfpatronen in de bodem, en het ingezoomde beeld waarbij het kleurgebruik is afgestemd op de op vloerniveau optredende trillingssterkten.

4.2.1 Trillingsresponsies gebouw

Figuur 8 toont grafisch de berekende trillingsresponsies V_{rms} in verticale richting (Z) en in de horizontale richting (Y) haaks op het spoor, voor enkele vloerpunten uit het model. De punten zijn gekozen op basis van maximaal optredende trillingssterkte. In de legenda staan de bijbehorende trillingssterkten V_{max} overeenkomstig de SBR-B.



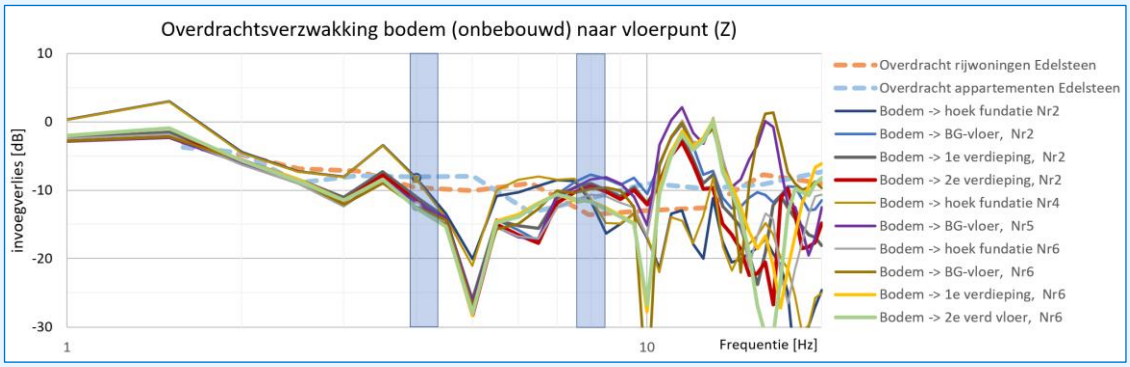
figuur 8: trillingssterkte vloeren bouwblok 2B2 in vergelijking met trillingssterkte bodem, verticaal & horizontaal

De in de legenda van figuur 8 aangegeven trillingssterkten V_{max}, behorende bij de getoonde trillingsspectra, tonen voor de vloeren van bouwblok 2B2 trillingssterkten van 0,21 tot 0,28 mm/s. Dit is meer dan de streefwaarde van 0,2 uit de SBR-B (nachtperiode), maar aanmerkelijk minder dan de in de vooronderzoeken geuite verwachtingen. In de maatgevende horizontale richting (Y) haaks op het spoor treden op de bovenste (tweede) verdieping nog iets hogere waarden op, tot maximaal 0,35 (mm/s). Dit komt door de achterwaartse kantelbeweging van het bouwblok op het funderingssysteem rond 3,5 à 4 Hz.

Zowel verticaal als horizontaal is deze kantelbeweging het meest van belang voor het kunnen voldoen aan de trillingseis. Daarnaast is in verticale richting ook het frequentiegebied van 6 tot 10 Hz van belang.
Hoewel in zowel verticale als horizontale richting niet voldaan wordt aan de streefwaarde van 0,2 zijn de berekende trillingssterkten lager dan in de in vooronderzoeken geïndiceerde waarden. De belangrijkste reden hiervoor is de grotere overdrachtsverzwakking van bodem naar gebouw ten opzichte van waar tijdens de vooronderzoeken mee is gerekend.

4.2.2 Overdracht bodem naar gebouw

Uit de grafiek voor de verticale richting in figuur 8 blijkt dat de verzwakking van bodem naar midden vloer in deze richting ongeveer (gemiddeld) een factor 4 ofwel 12 dB bedraagt. Dit geldt zowel bij de dominante frequentie van 3,5 à 4 Hz alsook rond 8 Hz.
In figuur 9 zijn de uit de meetdata bepaalde overdrachtsspectra van de bodem (onbebouwde toestand) naar de diverse vloerpunten en enkele hoekpunten op de fundatie van bouwblok 2B2 afgebeeld. Te zien is dat de verzwakking vanaf 1 Hz snel toeneemt tot waarden van meer dan 10 dB (factor 3) vanaf ongeveer 5Hz. In de figuur zijn ook de gemeten overdrachtsspectra aan het appartementencomplex en blok rijwoningen aan de Edelsteen/Maansteen (overzijde spoor) afgebeeld. Te zien is dat op twee van de drie opgevraagde fundatiepunten uit het model de gemeten overdrachtsverzwakkingen, van 8 à 10 dB, overeenkomen met de berekende verzwakking. Het derde punt, uit de meest rechtse woning (Nr6), presteert iets beter met een verzwakking van ongeveer 12 dB. Bij de andere dominante frequentie van rond 8 Hz liggen de overdrachtsverzwakkingen eveneens dicht bij de meetwaarden, maar iets ongunstiger.



figuur 9: overdrachtsverzwakking bodem (onbebouwd) naar gebouw (verticaal)

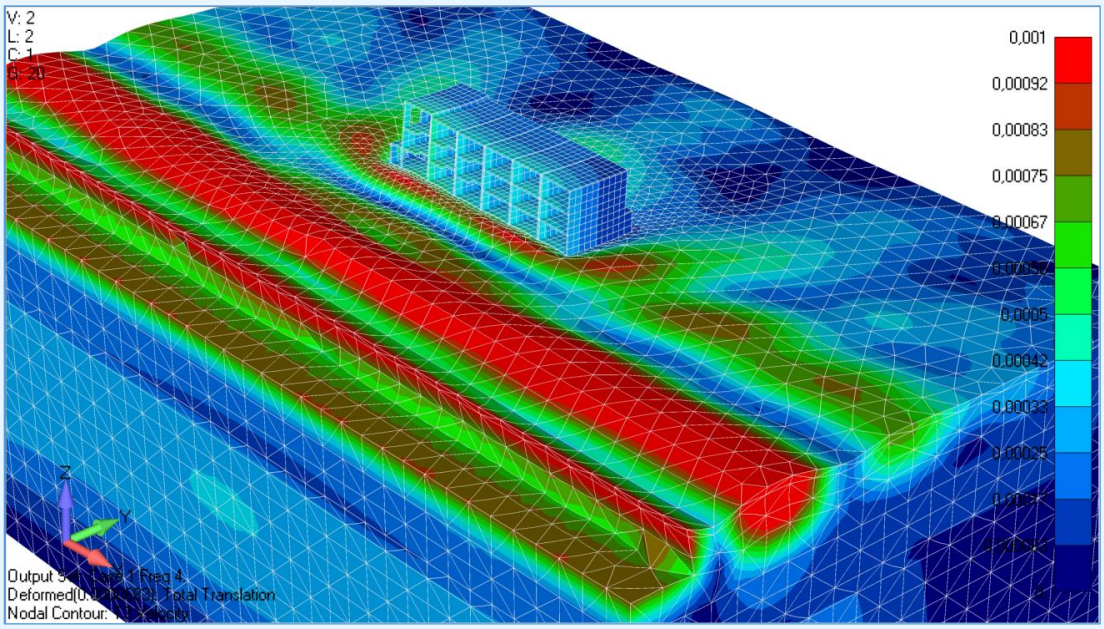
Vanaf 11 Hz vertonen de overdrachtscurven in figuur 9 een zeer grillig beeld. De verklaring daarvoor is dat er in dit frequentiegebied nagenoeg geen energie zit in het aanstootspectrum. De spectra worden in dit deel bepaald door allerhande resonanties in het gebouwmodel en de keuze van het referentiepunt heeft daarbij veel invloed op de uitkomsten. In het frequentiegebied dat ertoe doet, tot 10 Hz, presteert het model echter naar behoren, met uitzondering van rond 6 Hz waar er eveneens nauwelijks trillingsenergie wordt aangeboden in het inputspectrum, zie figuur 7.

De berekende en ook gemeten overdrachten in het frequentiebereik tot 10 Hz maken duidelijk dat de overdrachtsverzwakking van bodem naar fundatie in dit geval groter is dan de in onderzoeken vaak gehanteerde vuistregel van geen verzwakking bij frequenties tot 10 Hz.

Ook de vaak geziene vuistregel van een factor 2 ofwel 6 dB verzwakking op de gesommeerde trillingssterkte Vmax is in klei- en veenbodems lang niet altijd passend en dat geldt hier ook.

4.2.3 Analyse bepalende trilvormen

In figuur 10 wordt de dominante trilvorm bij 4 Hz getoond, waarin zichtbaar is dat het gebouw als een nagenoeg stijve doos achterover kantelt op de vanaf het spoor aankomende trillingsgolven in de bodem. Het kantelpunt ligt daarbij niet ver onder het fundatieniveau. Verlaging van het trilniveau vergt bij deze frequentie dat deze kantelbeweging onderdrukt wordt door ofwel een verhoging van de gebouwmassa ofwel door substantiële verstijving van het funderingssysteem (palen) ten opzichte van de aanwezige bodemstijfheid in de toplagen. Bij gegeven gebouwmassa houdt dit in het verhogen van de stijfheid van de paalfundering, wat met name in horizontale richting niet eenvoudig is. Het toepassen van trillingsisolatie tussen funderingssysteem en gebouwcasco is ook een mogelijkheid, maar het moet daarbij gaan om zeer slappe veren vanwege de lage aanstootfrequenties bij zware goederentreinen.

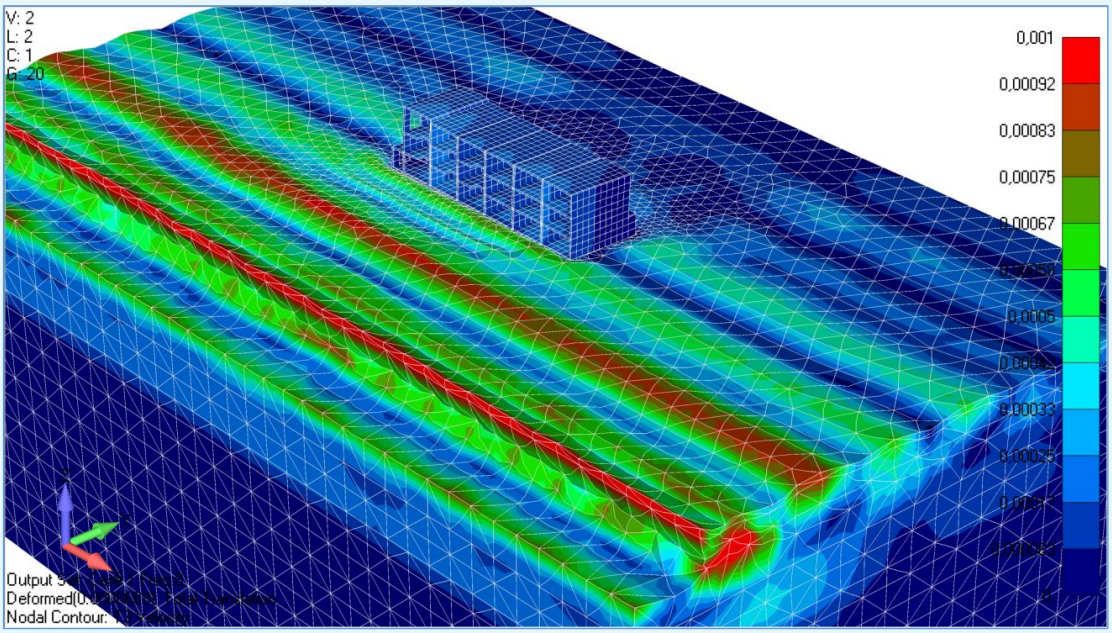


figuur 10: trilvorm 4 Hz – gebouw kantelt achterover op aankomende trillingsgolven in de bodem

Rond 8 Hz treedt meer vervorming op in het huizenblok, maar nog geen sterke resonantie van vloeren, zie figuur 11. De vloeren zijn dan nog relatief stijf zijn en deze gaan pas vanaf 14 Hz meer meetrillen. In dat frequentiegebied treedt echter weinig aanstoting door treinpassages op. Omdat het aandeel van trillingen tussen 6 en 10 Hz op de totale trillingssterkte van vloeren beperkt is, heeft het verstijven van vloeren en wanden slechts beperkt effect op de totale trillingssterkte.

De vergelijking tussen figuur 10 en figuur 11 laat zien dat rond 4 Hz het gebouw meer meetrilt met de bodem en daarmee geen of minder luwende werking heeft op bodemtrillingen achter het gebouw. Bij 8 Hz is dat wat meer het geval en zijn trillingen op maaiveld achter het gebouw lager dan op gelijke afstand tot het spoor op een positie naast het gebouw.

Bouwwerken tussen het spoor en een te beschouwen verderaf gelegen bouwwerk kunnen dus invloed hebben op het trilgedrag.



figuur 11: trilvorm 8 Hz – vervormingen gebouw nemen toe en gebouw luwt ook het achterliggende gebied

5. Maatregelen

5.1 Mogelijke maatregelen

De berekende trillingssterkten op de maatgevende vloerpunten zijn met een V_{max} van 0,27 in verticale richting en 0,31 in horizontale richting hoger dan de streefwaarde van 0,2 uit de SBR-B en geldend voor de nachtperiode. Zoals in paragraaf 4.2.3 aangegeven, wordt dit grotendeels veroorzaakt door voor-/achterwaartse kantelbeweging van het huizenblok bij 3,5 à 4 Hz op de fundering en in de bodem. Bij gegeven woningtype en afmetingen betekent dit dat alleen maatregelen die ingrijpen op de overdracht van bodem naar fundatie effectief kunnen zijn, afgezien van maatregelen aan het spoor en eventueel in het overdrachtspad (bodem).
Praktisch betekent dit dat de volgende maatregelen in aanmerking komen:

- verhogen van de funderingsstijfheid;
- trillingsisolatie tussen fundering en randbalken.

5.1.1 Verhogen stijfheid fundering

Onder het huizenblok worden al palen toegepast met een lengte van 15 tot 17 meter. Bij deze lengte heeft verdere toename van de lengte nauwelijks invloed meer. Dit betekent dat alleen het laten toenemen van het aantal palen en/of de paaldiameter nog open zijn voor toepassing. Omdat er in dit project al prefab palen van hoge betonkwaliteit worden toegepast, is er qua betonkwaliteit weinig winst meer te bereiken. Uit oogpunt van behoud van archeologische bodemschatten is het niet toegestaan om meer palen onder het huizenblok te gaan toepassen. Het verhogen van de paaldikte behoort wel tot de mogelijkheden. Om het effect daarvan te beoordelen, zijn alle palen onder het huizenblok één slag in dikte verhoogd: van 420 naar 500 mm, van 350 naar 420 mm en van 290 naar 350 mm. Dit betekent een toename van de drukstijfheid van de palen met 40% en een toename van de buigstijfheid met 100%. De palen onder de uitbouw van de eindwoning en de tuinmuur zijn hiervan uitgezonderd.

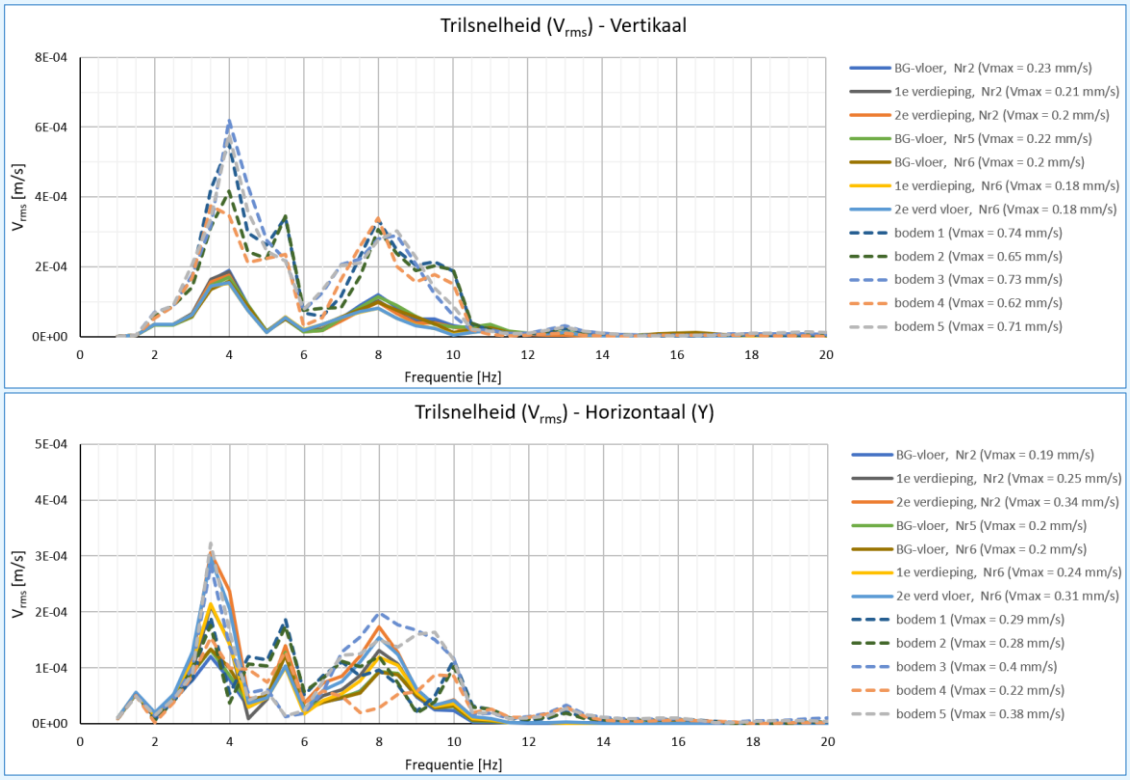
5.1.2 Trillingsisolatie tussen fundering en randbalken

Omdat het in dit geval gaat om trillingen met een zeer lage frequentie is het nodig om een zeer slappe vorm van trillingsisolatie op te nemen tussen fundering en randbalken. Om bij 3,5 à 4 Hz al trillingen te isoleren, mag de afveerfrequentie niet hoger zijn dan zo'n 2,5 Hz. Dit is bijna ook de ondergrens wat bij dit soort toepassingen nog haalbaar is. Qua trillingsisolatie gaat het niet alleen om de verticale afveerfrequentie. Met name de kantelbeweging van het huizenblok op de veren is van belang en deze kantelfrequentie pakt afhankelijk van de horizontale stijfheid van de veren wat lager uit, hetgeen weer gunstig is voor de trillingsisolatie. Om deze lage afveerfrequenties te kunnen bereiken, zijn stalen schroefveerpakketten nodig die een groot deel van de beschikbare ruimte van de randbalken onder de bouwmuren in beslag zullen nemen.
Om het effect van trillingsisolatie te beoordelen, wordt uitgegaan van veerpakketten met een afveerfrequentie bij nominale belasting van 2,5 Hz en waarbij de horizontale (afschuif) stijfheid 100% van de verticale stijfheid bedraagt.

5.2 Effect maatregelen

5.2.1 Dikkere palen

In figuur 12 zijn de berekende responsies voor dezelfde vloerpunten als in figuur 8 afgebeeld, maar nu onder toepassing van dikkere funderingspalen.



figuur 12: trillingsresponsie vloeren bouwblok 2B2 versus trillingssterkte bodem, zwaardere funderingspalen

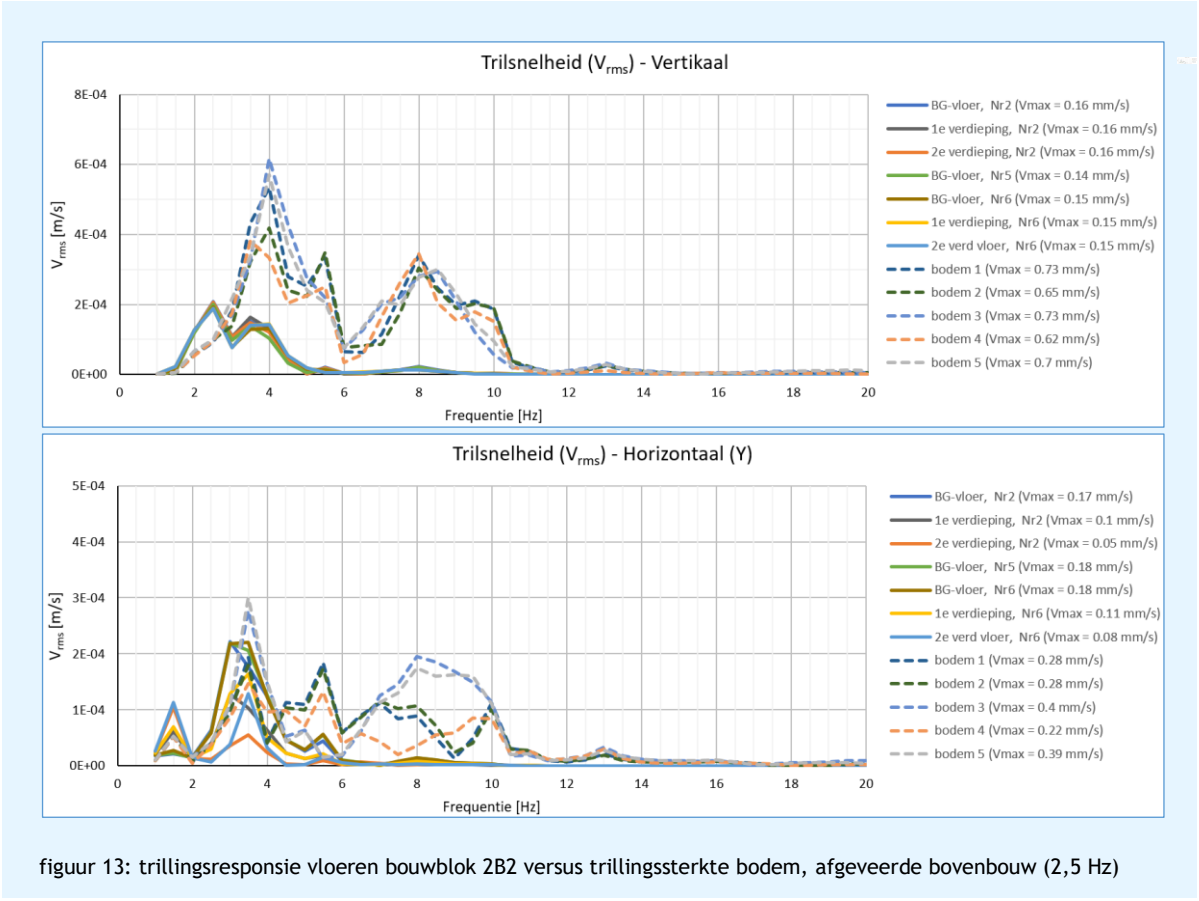
In figuur 12 is te zien dat de trillingssterkten in verticale richting met ongeveer 20 % zijn afgenomen als gevolg van het dikker uitvoeren van de funderingspalen. De winst treedt vooral op in het frequentiegebied rond 8 Hz waarin vervormingen van het woningcasco beginnen. De winst bij 4 Hz, dus op de kantelfrequentie is marginaal. Per saldo nemen de trillingssterkten op de vloeren in verticale richting af van 0,21 tot 0,28 met 420/350/290 mm dikke palen naar 0,18 tot 0,23 (mm/s) met 500/420/350 mm dikke palen.

In horizontale richting heeft het verdikken van de funderingspalen een verwaarloosbare invloed. Het verschil blijft beperkt tot één honderdste ten opzichte van de berekende waarden zonder paalverstijving.

De dikkere palen hebben dus vooral een effect op de verticale trillingen, maar dan vanwege de stijfheidverhogende werking op de draagconstructie en niet zozeer vanwege het onderdrukken van de kantelbeweging. Conclusie hieruit is dat de toplaag van de bodem (kleilaag) al zodanig stijf is dat het funderingssysteem hier in horizontale richting nog maar weinig aan toevoegt en min of meer meebeweegt met de bodembeweging. Verder verstijven heeft daardoor ook geen zin. Met de huidige woningconstructie zijn trillingen tot 0,3 à 0,4 (mm/s) op de tweede verdieping dus niet uit te sluiten. Op de eerste verdieping ligt dit in de orde van 0,2 tot 0,3 en op de begane grond wordt voldaan aan de streefwaarde A2 van 0,2.

5.2.2 Trillingsisolatie

In figuur 13 zijn de responsies voor dezelfde vloerpunten afgebeeld als in de uitgangssituatie (figuur 8), maar nu met trillingsisolatie opgenomen tussen fundering en randbalken. Hiervoor is het kader van randbalken dubbel uitgevoerd, één kader (met palen) onder de veren en één erboven. Daartussen zijn (stalen) schroefveren aangebracht met een verticale afveerfrequentie van 2,5 Hz.

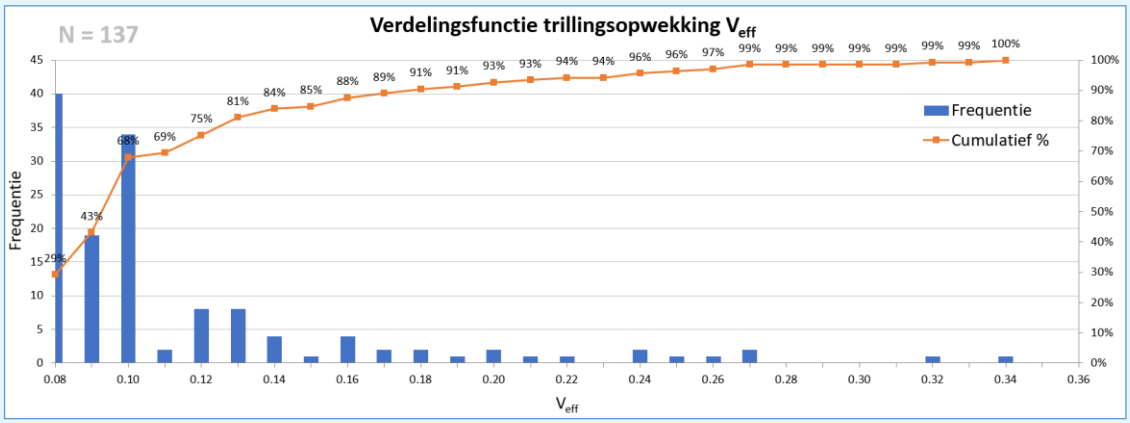


figuur 13: trillingsresponsie vloeren bouwblok 2B2 versus trillingssterkte bodem, afgeveerde bovenbouw (2,5 Hz)

In figuur 13 is de 2,5 Hz afveerfrequentie van de veren terug te zien en in verticale richting levert deze een niet verwaarloosbare bijdrage aan de trillingssterkte V_{max}. Rond de voorheen dominante frequentie van 4 Hz is nu een geringe verlaging van de trillingssterkte opgetreden, maar de meeste winst zit in het frequentiegebied rond 8 Hz. Daarin treedt nu nog maar weinig aanstoting van het woningcasco op, door de isolatie van de veren. De trillingssterkten in zowel verticale als horizontale richting zijn nu lager dan de streefwaarde A2 van 0,2 uit de SBR-B.
De trillingsbeweging is door het invoegen van trillingsisolatie anders dan in de uitgangssituatie zonder maatregelen. In plaats van dat de woning kantelt (trilt) om een punt onder maaiveld ligt de bewegingspool nu in de woning en is er in horizontale richting geen toename meer naar hogere verdiepingen. De berekende trillingssterkten in horizontale richting zijn zelfs hoger op de begane grond, maar voldoen dus aan de streefwaarde (A2) uit de SBR-B.

6. Toetsing

In hoofdstukken 4 en 5 zijn de verwachte maximale effectieve trillingssterkten V_{max} berekend met en zonder maatregelen, geldend voor de maatgevende (zwaarste) treinpassage. Omdat deze in geen van de gevallen voldoet aan de onderste streefwaarde A1 uit de SBR-B moet ook de gemiddelde trillingssterkte V_{per} over de beoordelingsperiode (dag/avond/nacht) worden bepaald. Deze moet voldoen aan de streefwaarde A3. Om deze V_{per} te kunnen berekenen, moet het aantal treinen per categorie, goederen- of reizigerstreinen, bekend zijn, maar ook de verdelingsfunctie qua trillingsopwekking. De in H5 berekende trillingssterkte wordt door slechts een fractie van de passerende goederentreinen opgewekt, maar merendeel van de treinen zal leiden tot aanmerkelijk lagere trillingssterkten. Voor het bepalen van deze verdelingsfunctie wordt gebruikgemaakt van de trillingsmetingen verricht aan de overzijde van het spoor aan de Edelsteen. In figuur 14 wordt deze verdelingsfunctie getoond op basis van de meetwaarden aan de Edelsteen.



figuur 14: verdelingsfunctie trillingssterkte V_{eff} in bodem aan de Edelsteen/Maansteen

Uit de verdelingsfunctie blijkt dat een trillingssterkte van 80% van de V_{max} (in dit geval V_{max} = 0,34) nog maar door 1% van de treinen ofwel twee treinen in de 48-uurs meetperiode wordt overschreden. Daarbij zijn alle goederen- en reizigerstreinen beschouwd die resulteerden in een $V_{eff,max}$ > 0,08 in de bodem, in totaal 137 treinen. Deze verdelingsfunctie wordt in de V_{per}-berekening toegepast.

Uit de gedane bodemmetingen op de bouwlocatie (Raaigras) is gebleken dat de trillingsopwekking van reizigerstreinen hooguit 25% bedraagt van die van de zwaarste goederentreinen. Met een berekende V_{max} van 0,35 in de uitgangssituatie, dus zonder maatregelen aan het ontwerp, betekent dit dat reizigerstreinen geen voelbare trillingen (V_{max} < 0,1) zullen opwekken en dus niet meetellen in de V_{per}-berekening. Het gaat daarin dus alleen om de goederentreinen.

De goederentreinpassages blijken naar rato verdeeld over de dag-, avond- en nachtperiode, 50% reed overdag, 20% in de avond en 30% in de nacht. Dit betekent dat er in V_{per}-bepaling geen significant onderscheid is naar D/A/N-periode. Dit onderscheid wordt daarom achterwege gelaten.

In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de berekende V_{max-} en V_{per}-waarden per onderzochte variant. Hieruit blijkt dat de V_{per} in alle gevallen ruim voldoet aan de streefwaarde A3 van 0,05 uit de SBR-B. De V_{max} voldoet alleen aan de streefwaarde (A2 nieuwe situaties) als er trillingsisolatie wordt toegepast tussen fundatie en randbalken. Zonder maatregelen zal ongeveer 30% van de goederentreinen (5 per dag) de streefwaarde A2 van 0,2 (nieuwe situaties) overschrijden en ongeveer 5% van de goederentreinen (1 per dag) heeft een $V_{eff,max}$ hoger dan 0,3 tot aan de maximaal berekende waarde van 0,35.

tabel 2: berekende trillingssterkten V_{max} en V_{per}

	Berekend		Toetswaarden[1)]	
	$V_{eff,max,V}$	$V_{eff,max,H}$	V_{max}	V_{per}
Uitgangssituatie	0,28	0,35	0,3	0,02
Zwaardere funderingspalen	0,23	0,34	0,3	0,02
Trillingsisolatie bovenbouw	0,16	0,18	0,2	0,01

1) overschrijdingen streefwaarde in rood aangegeven

7. Conclusies en aanbevelingen

Bepalend voor de trillingsproblematiek op de locatie Hofstad 4b zijn de zware goederentreinen die een sterke dynamische belasting op de bodem geven bij een zeer lage frequentie van 4 Hz.
De bodem in en rond Houten is door de opbouw met afwisselend klei- en zandlagen extra gevoelig voor deze frequentie. De simulaties laten zien dat het gebouwcasco van blok 2B2 en alle andere bouwblokken (2B1 en 2B3) liggend op dezelfde lijn, bij deze frequentie een kantelbeweging (achterover) maken op de vanuit het spoor aanrollende trillingsgolven in de bodem. Deze trilvorm is dominant in de totale trillingssterkte in de woningen. Behalve deze trilvorm is er verticaal ook nog een substantiële trillingsbijdrage in het frequentiegebied rond 8 Hz, het gebied waarin een slechtere wielkwaliteit van treinwielen zich uit.

Zonder maatregelen liggen de berekende trillingssterkten op woningvloeren (verticaal) tussen 0,21 tot 0,28 (mm/s) en horizontaal op de verdiepingen tussen 0,21 en 0,35. Daarmee voldoet de toetswaarde van 0,3 niet aan de streefwaarde van 0,2 uit de SBR-B (nachtperiode).

In verticale richting is er enige verbetering mogelijk door de fundering uit te voeren met zwaardere funderingspalen. Daarmee is ongeveer 15 % verbetering te realiseren.
Horizontaal hebben deze dikkere palen maar zeer weinig effect, ongeveer 5 %. Daarmee blijft de toetswaarde op 0,3 en wordt de streefwaarde van 0,2 volgens de berekeningen nog niet gehaald.

De horizontale trillingen zijn door verdere maatregelen aan het woningcasco niet verder te verlagen omdat dit casco zich in de betreffende trilvorm als stijve constructie gedraagt. Ook het nog zwaarder uitvoeren van de funderingspalen heeft weinig zin omdat deze meebewegen met de omringende bodem, omdat het stijfheidsverschil tussen beide te klein is.

Om onvoorwaardelijk te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-B is het nodig om trillingsisolatie op te nemen tussen fundatie en randbalken. Deze trillingsisolatie moet bestaan uit slappe veren met een afveerfrequentie van ten hoogste 2,5 Hz. Zonder deze maatregel overschrijdt naar verwachting 30% van de goederentreinen de streefwaarde A2 van 0,2 licht, maar slechts 5% (1 per dag) overschrijdt een trillingssterkte van 0,3. De gemiddelde trillingssterkte zal door het beperkte aantal treinen dat leidt tot voelbare trillingen met en zonder maatregelen aan de constructie ruim voldoen aan de streefwaarde A3 van 0,05.

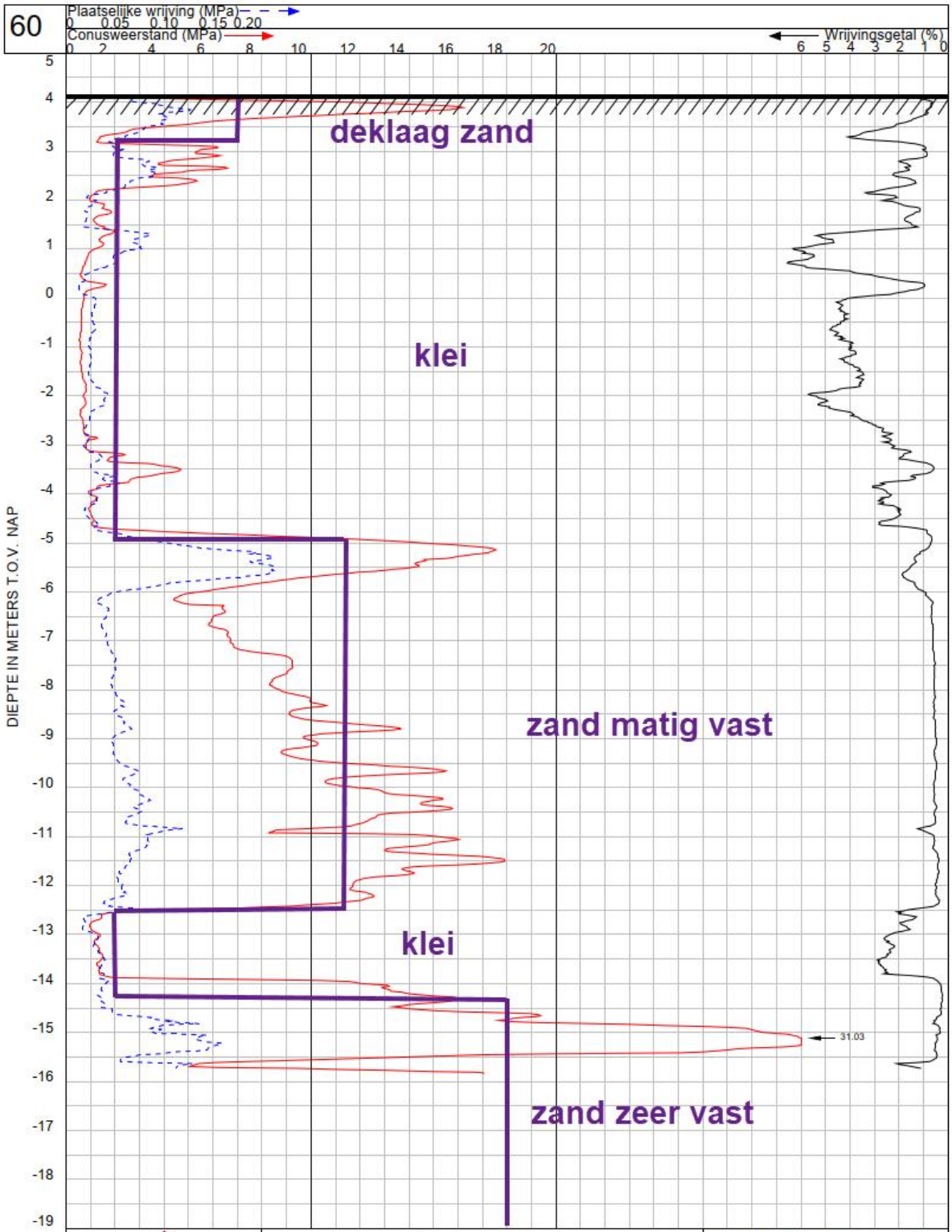
Het afveren van de gehele bovenbouw op de fundatie brengt hoge kosten met zich mee en draagt gezien het beperkte aantal overschrijdingen maar zeer beperkt bij aan een beter woon- en leefklimaat.
Naar onze mening is deze maatregel in deze situatie dan ook niet doelmatig.

[redacted]

DGMR Bouw B.V.

Bijlage 1

Titel	Bodemopbouw
Omvang	1
Toelichting	Sondering Nr.60, uitgevoerd door [redacted] Geotechniek in 2018



GEO- EN MILIEUTECHNIEK b.v.

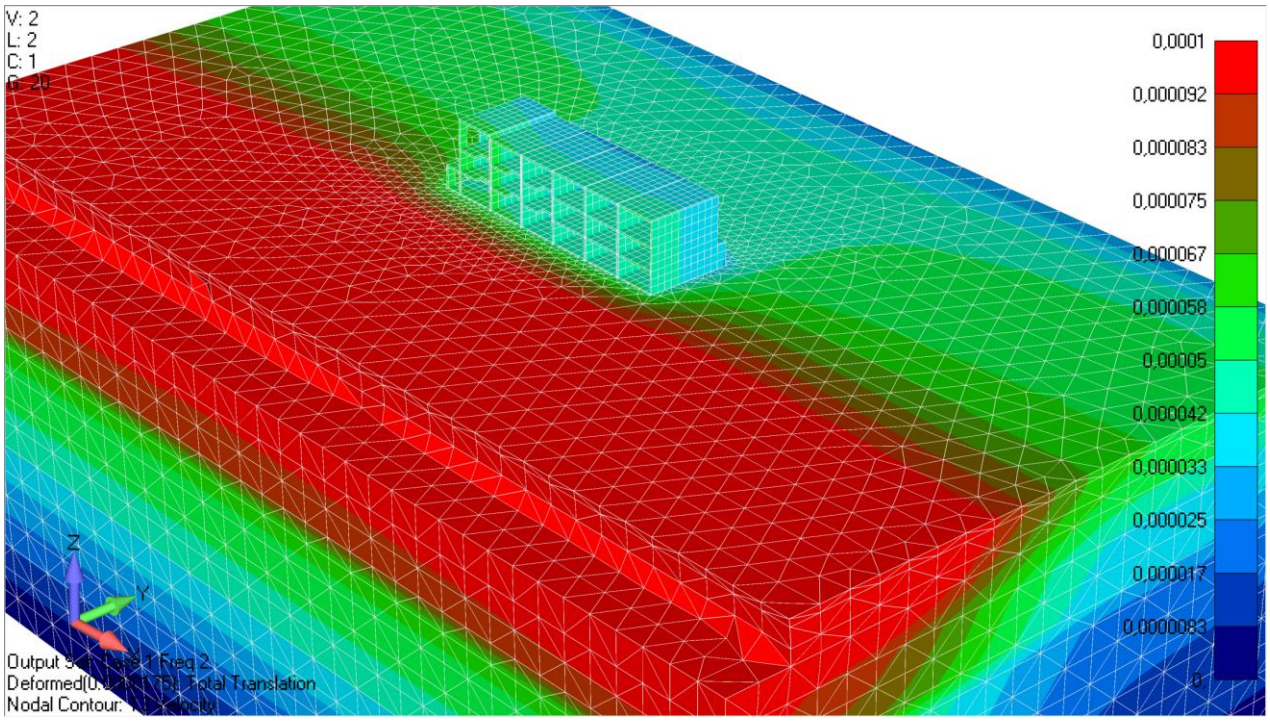
Plaats : **Houten**	**OPDRACHT NR: 117228**
Maaiveld : 4.15 m t.o.v. NAP Uitgevoerd : 4-7-2018 conus : CF-15 140118 Omschrijving : Houten nieuwbouw woningen en appartementen	SONDERING : 60

10-7-2018 uitgevoerd volgens NEN-EN-ISO 2276-1: 2012/C1: 2013, toepassingsklasse 3 1/1

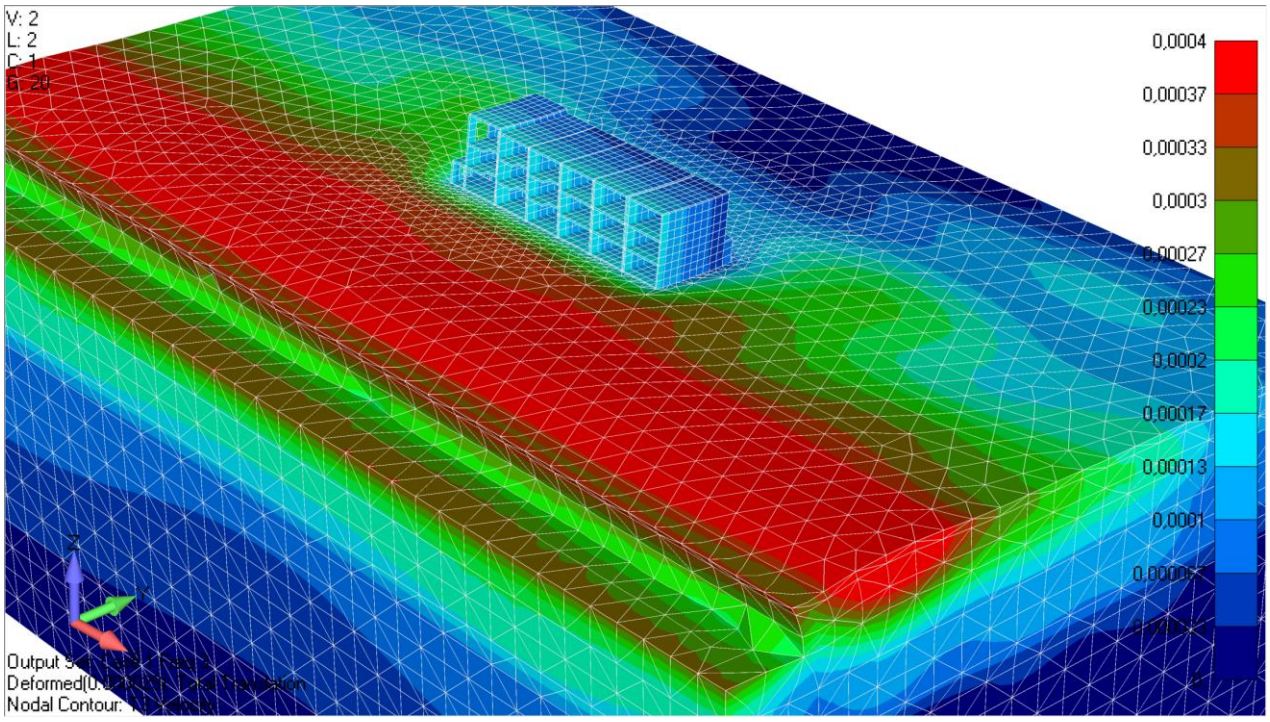
Bijlage 2

Titel	Trillingsresponsies (vervormingsbeelden) - uitgangssituatie
Omvang	4
Toelichting	Trillingscontouren V_{rms} in Z-richting

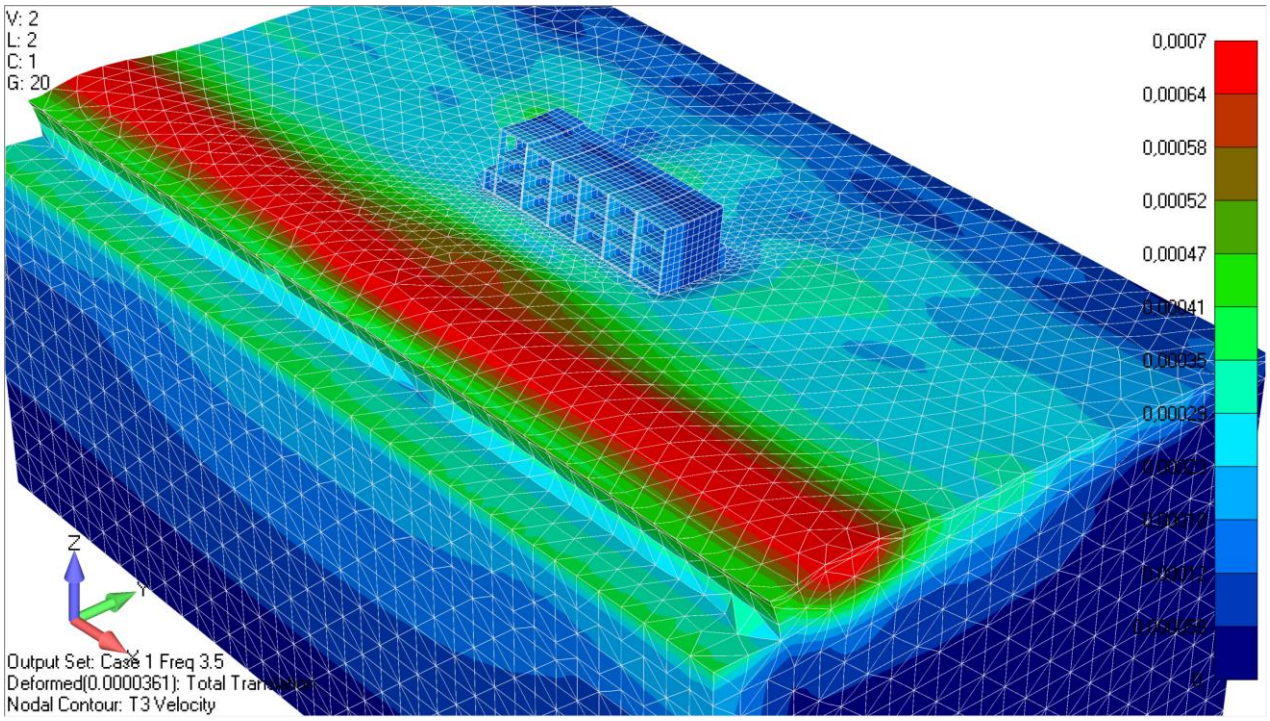
Trilvorm 2 Hz - Opwekking drukgolf in de bodem, trillingsdiepte lijkt groot maar niveaus laag



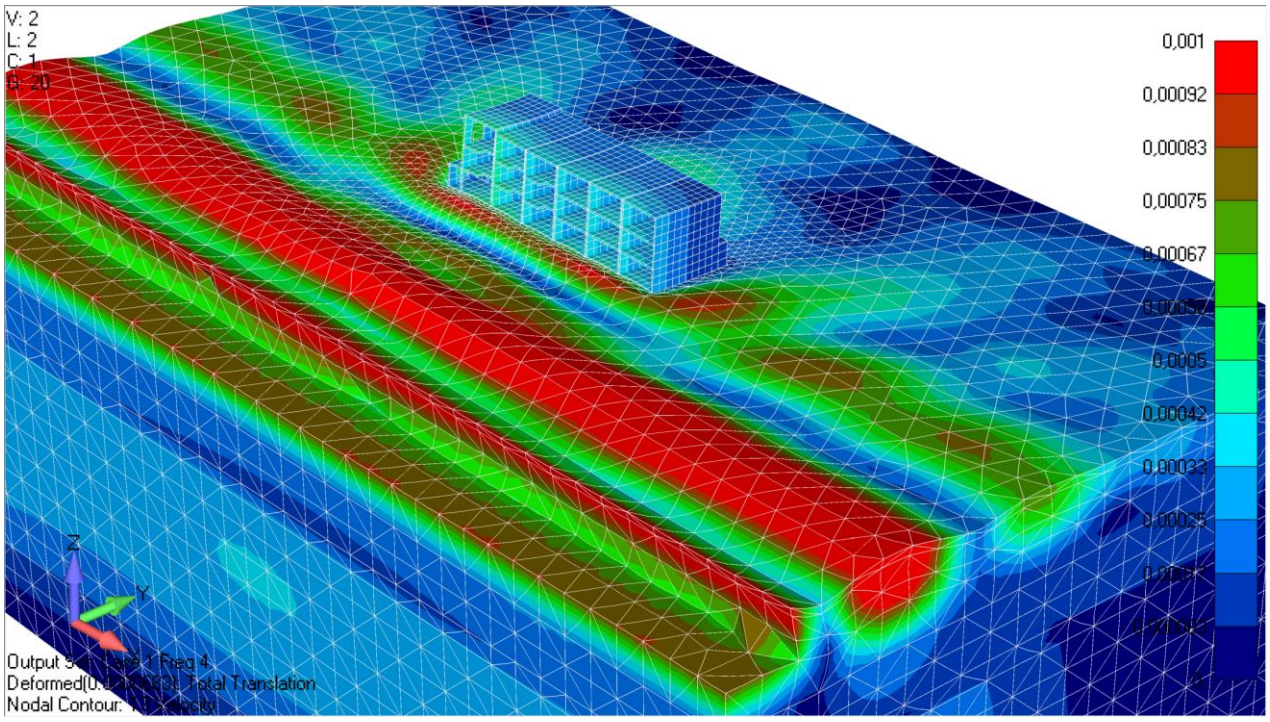
Trilvorm 3 Hz - Trillingen oppervlakkiger (tot 2e kleilaag), huizenblok wordt beweeglijker



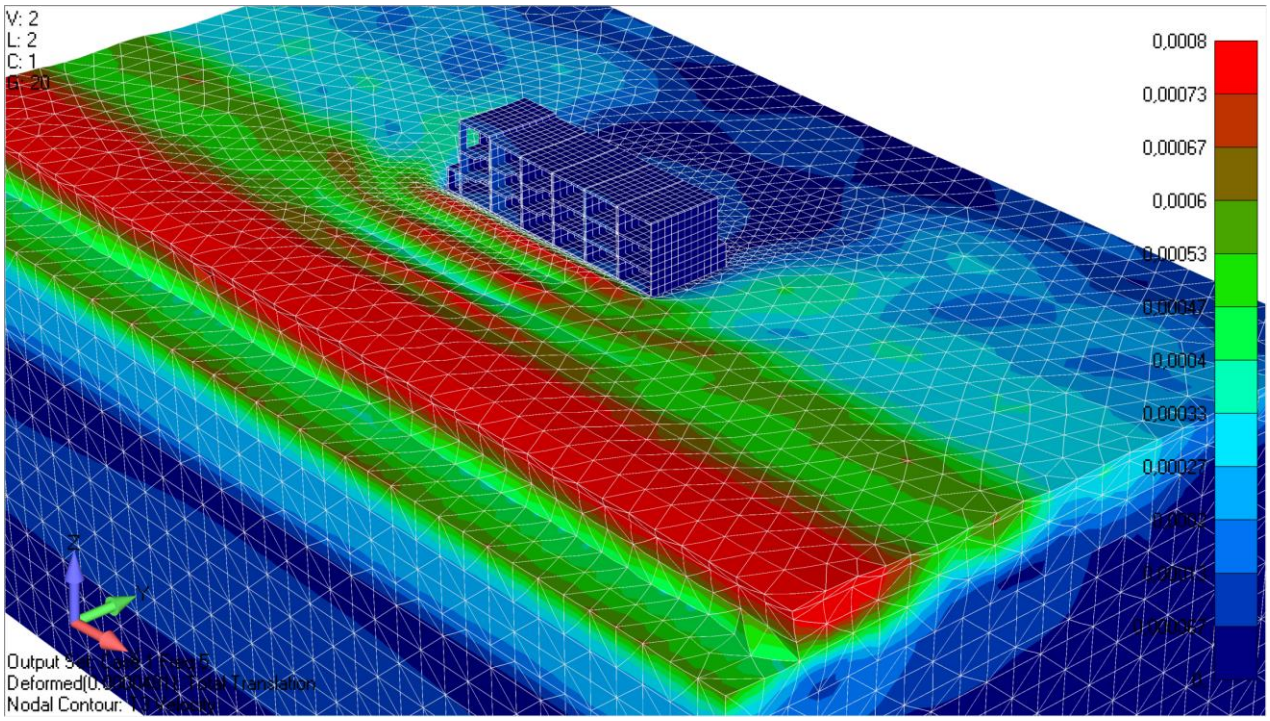
Trilvorm 3,5 Hz – Overgang drukgolven naar oppervlaktegolven, huizenblok wordt beweeglijker



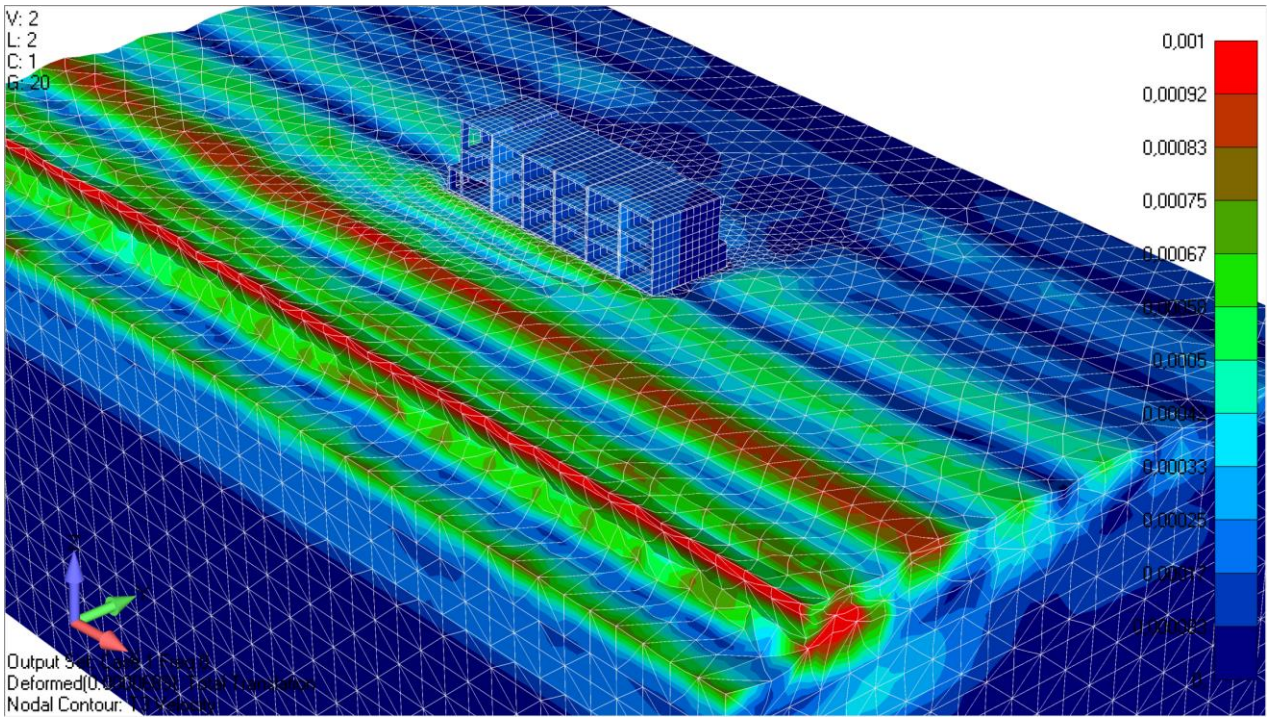
Trilvorm 4 Hz – Achterover kantelen huizenblok op aanrollende trillingsgolven (tot 1e kleilaag)



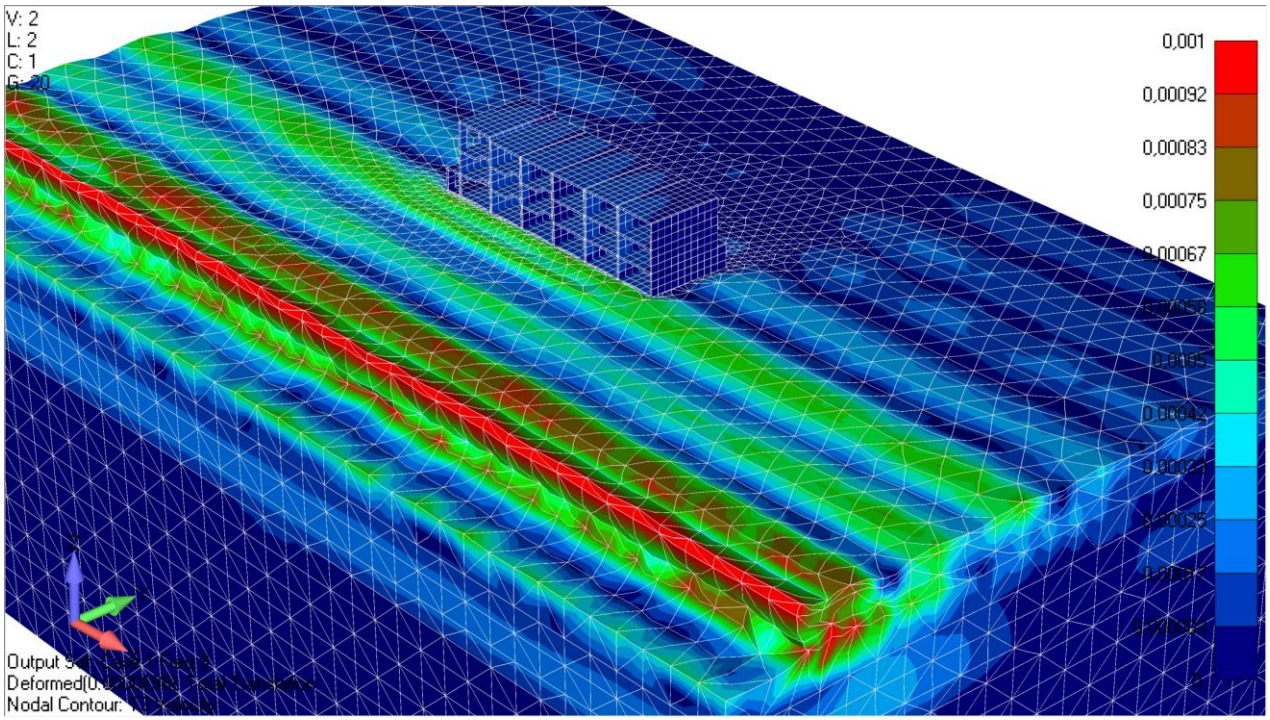
Trilvorm 5 Hz - Kantelbeweging neemt af, bodem achter huizenblok begint te luwen



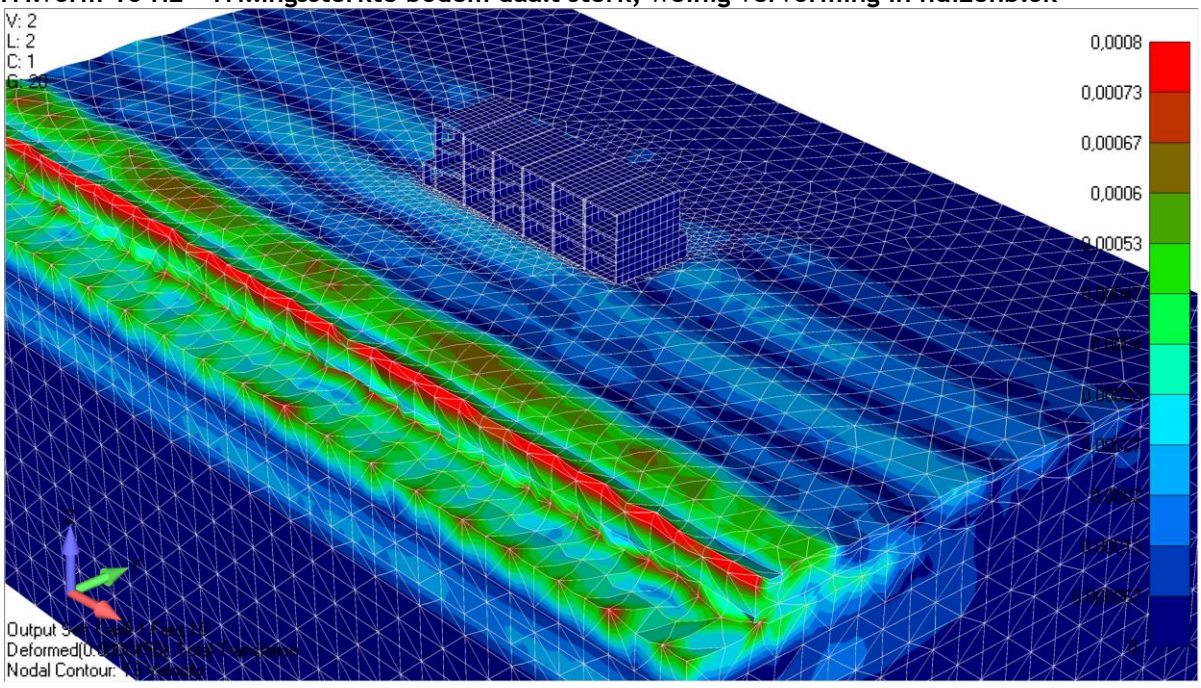
Trilvorm 8 Hz - Bodemtrillingen nemen toe, golflengte korter, vervorming huizenblok groter



Trilvorm 9 Hz - Bodemtrillingen en vervormingen huizenblok nemen weer af



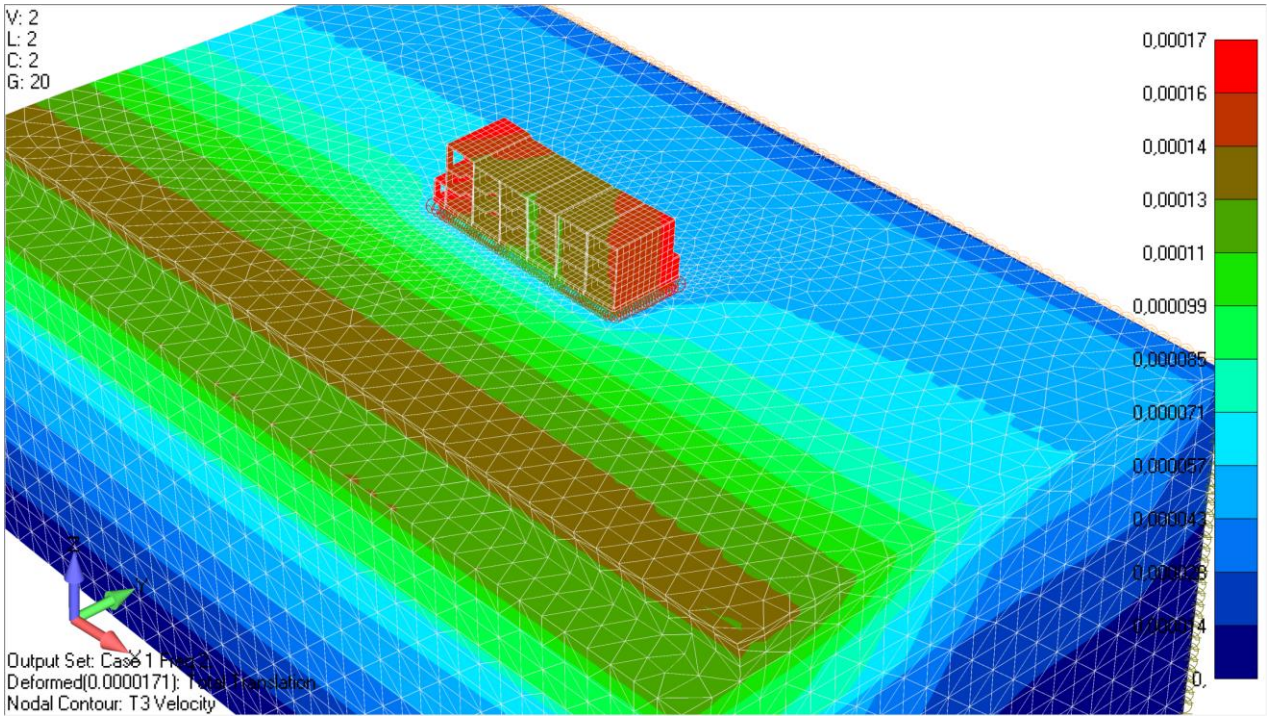
Trilvorm 10 Hz - Trillingssterkte bodem daalt sterk, weinig vervorming in huizenblok



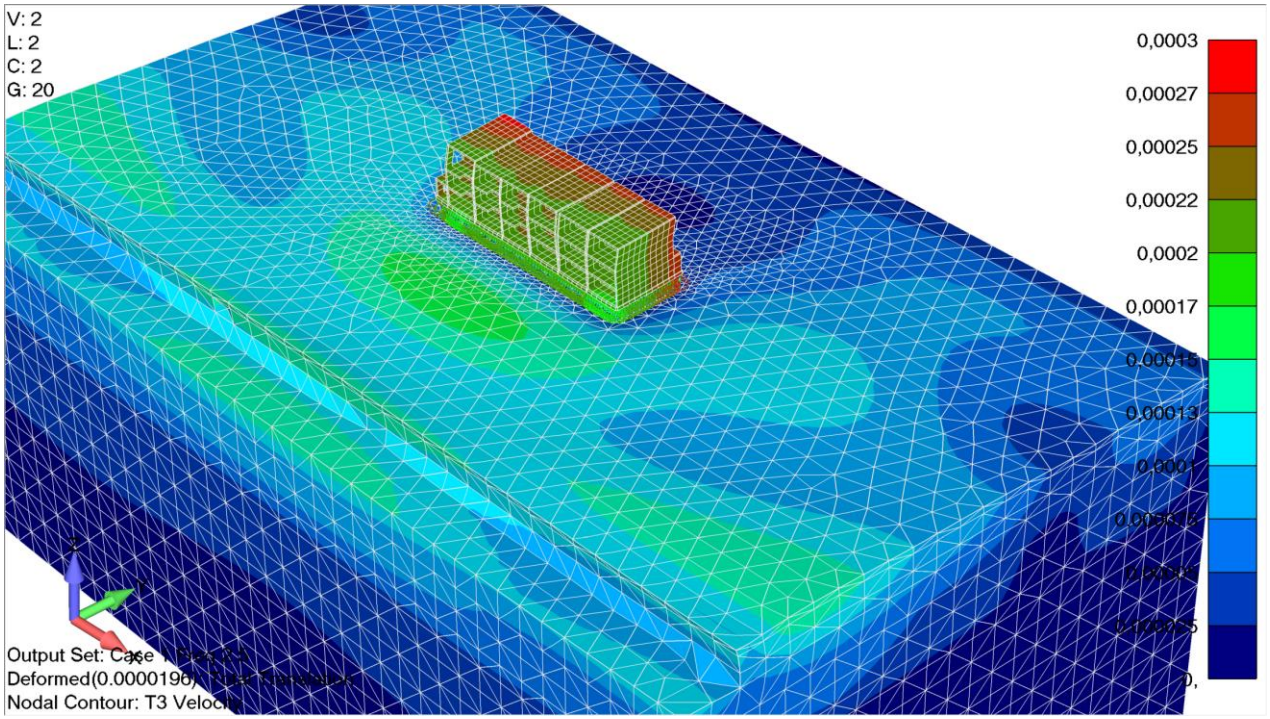
Bijlage 3

Titel	Trillingsresponsies - Bovenbouw trillingsgeïsoleerd
Omvang	4
Toelichting	Trillingscontouren V_{rms} in Z-richting

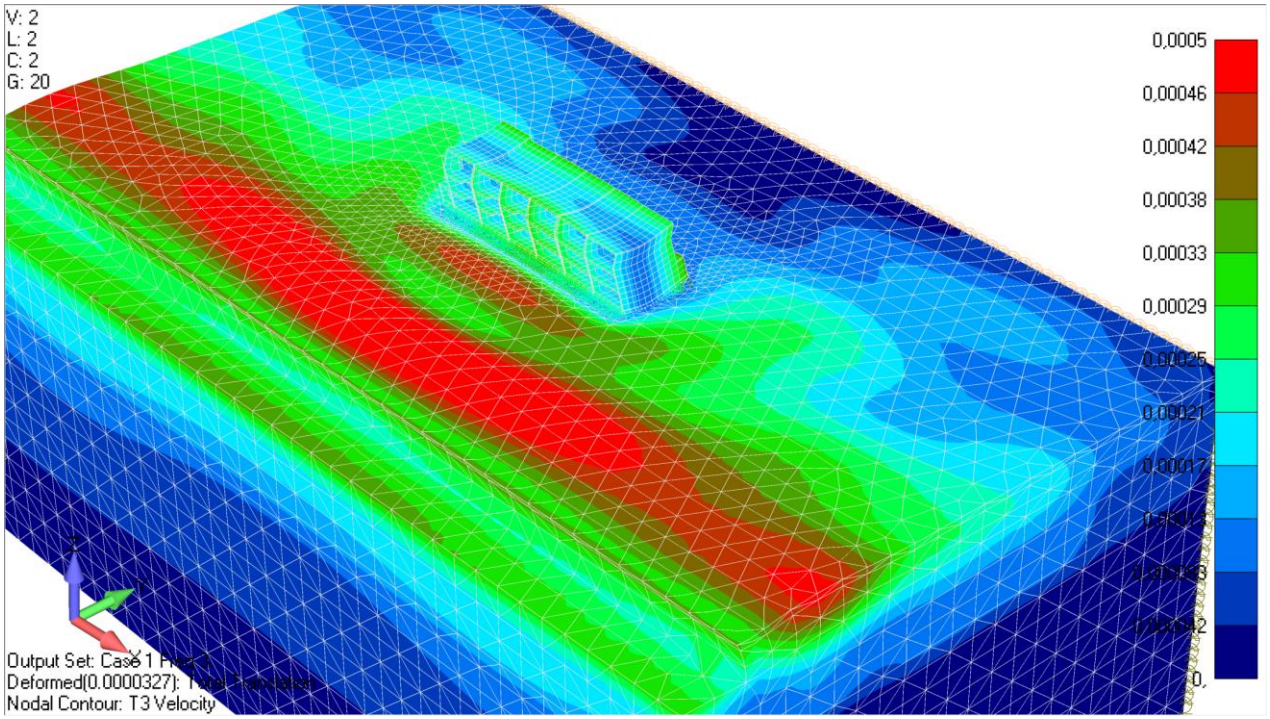
Trilvorm 2 Hz – Trillingssterkte huizenblok groter dan bodem (opslingering), maar niveaus laag



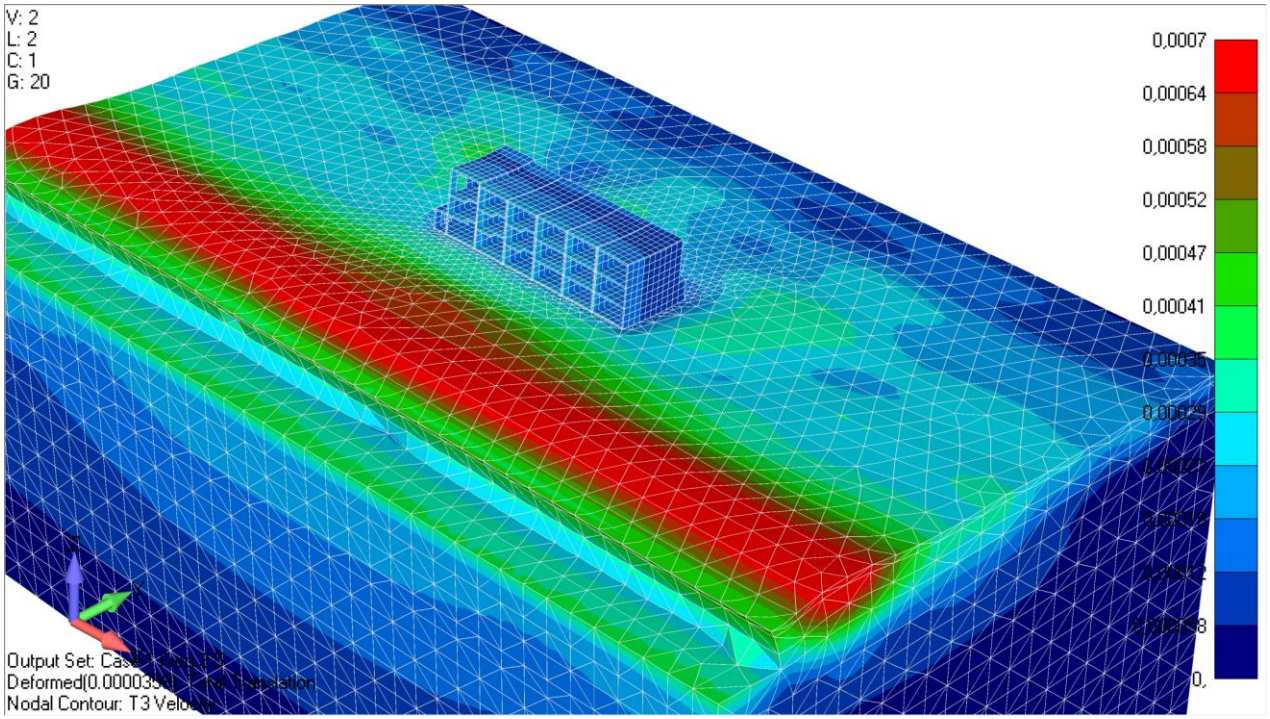
Trilvorm 2,5 Hz – Verticaal opslingering huizenblok op veren, niveaus in bodem laag



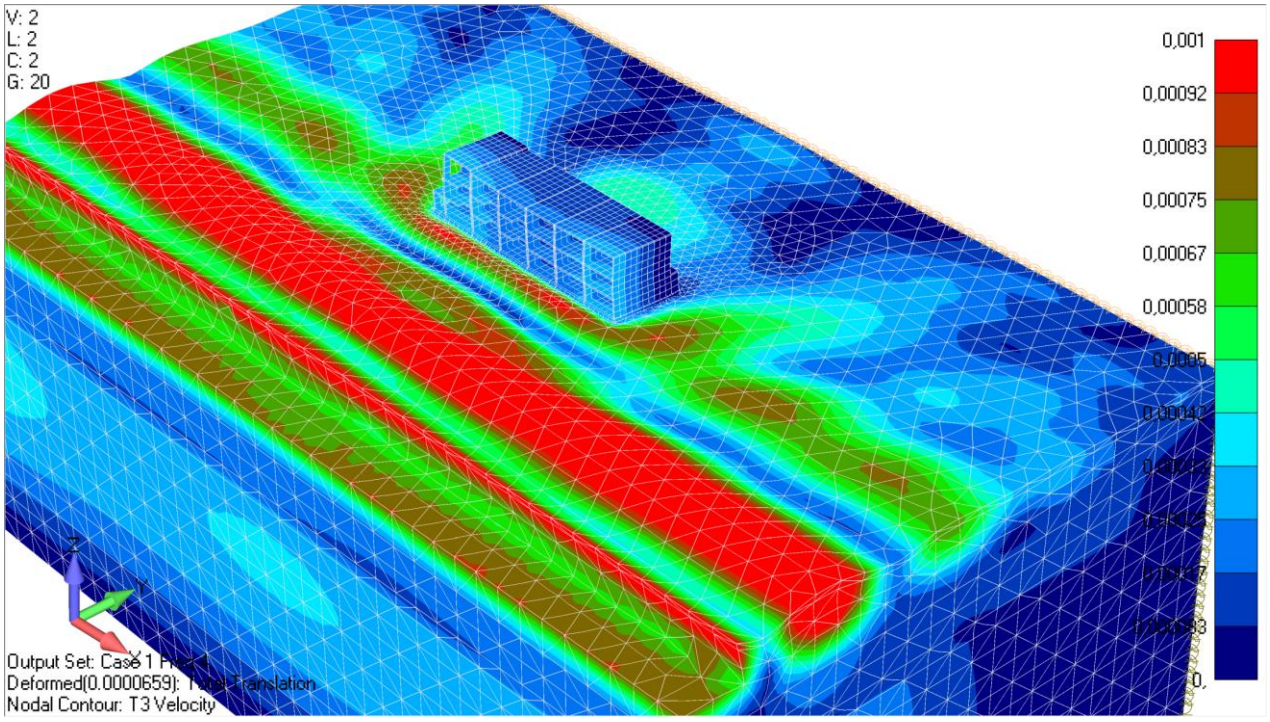
Trilvorm 3 Hz - Trillingen bodem nemen toe en kantelbeweging en vervorming huizenblok



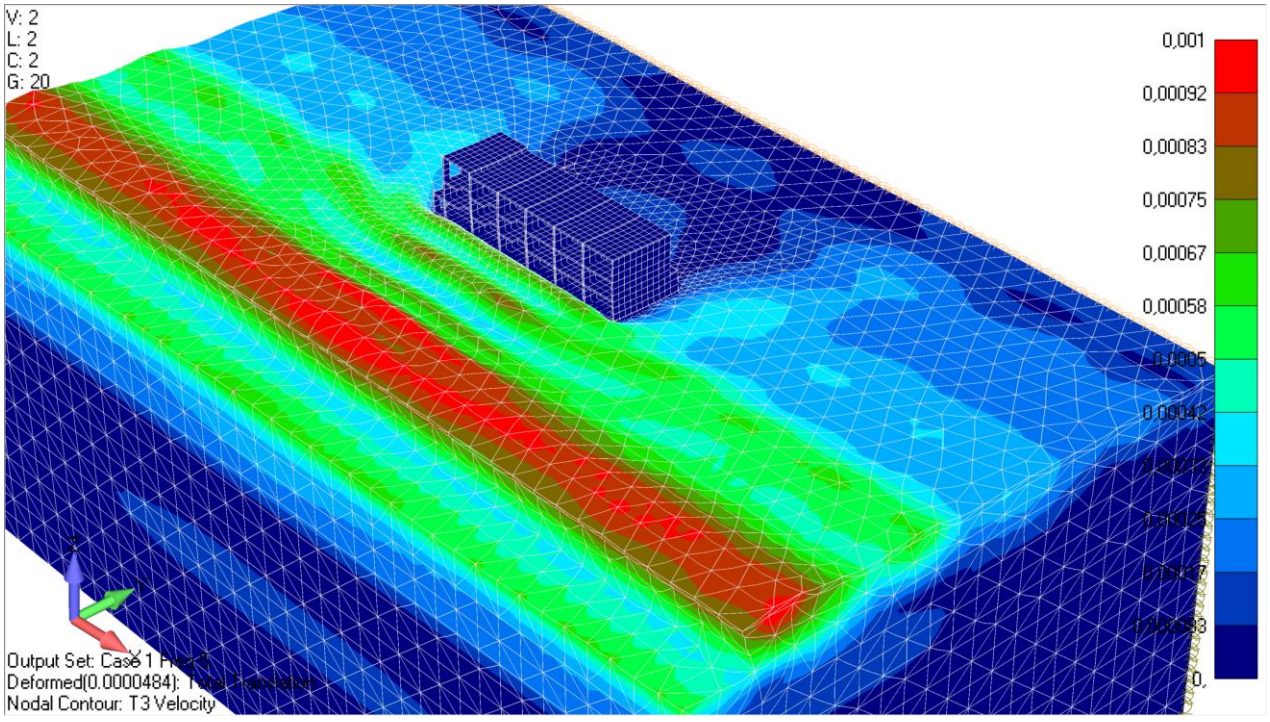
Trilvorm 3,5 Hz - Trillingen bodem nemen verder toe, beweeglijkheid huizenblok neemt af



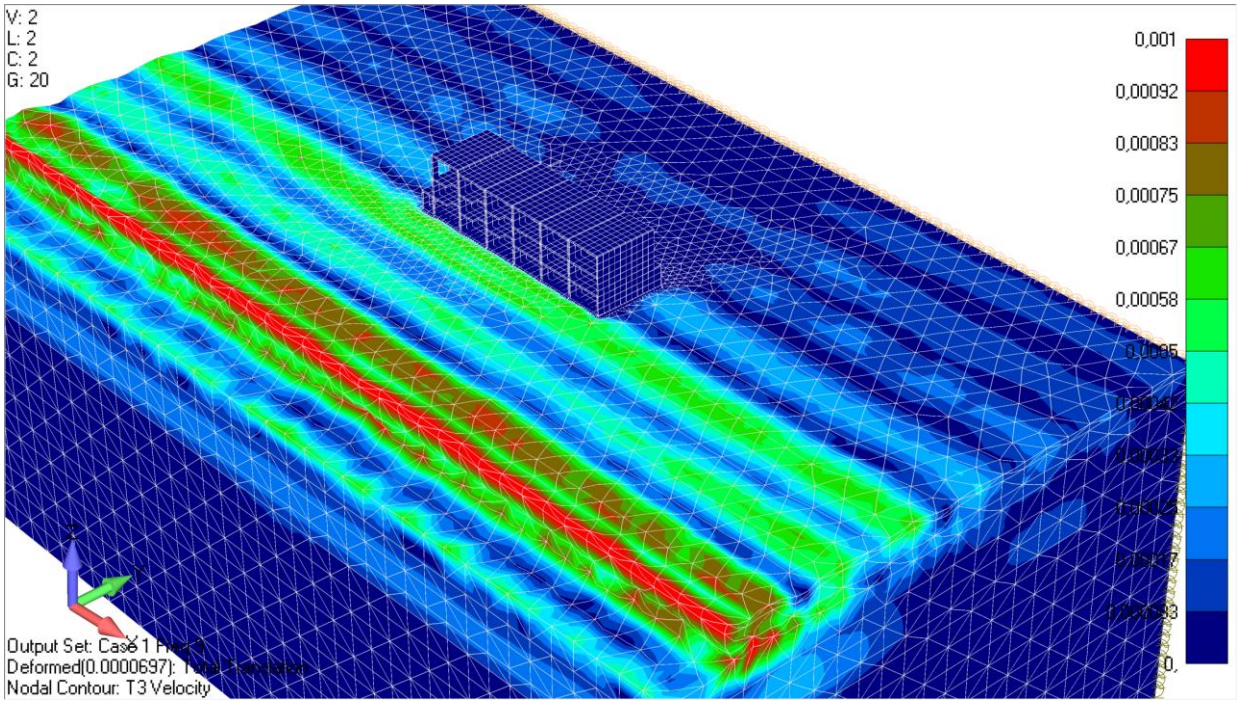
Trilvorm 4 Hz - Trillingen bodem nemen nog verder toe, maar beweging huizenblok constant



Trilvorm 5 Hz - Huizenblok beweegt nauwelijks nog mee op trillingsgolven bodem



Trilvorm 7 Hz - Golflengte bodemtrillingen wordt korter, huizenblok reageert steeds minder



Trilvorm 8 Hz - Bodemtrillingen nemen toe, golflengte wordt korter, huizenblok in rust

