

Asterstraat Doetinchem

Onderzoek spoortrillingen

Status	definitief
Versie	002
Rapport	B.2021.0253.00.R001
Datum	6 juli 2021



Colofon

Opdrachtgever	Veluwezoom Verkerk
Contactpersoon opdrachtgever	De heer A. Onstenk
Project	Veluwezoom Verkerk/Asterstraat Doetinchem
Betreft	Trillingsonderzoek
Uw kenmerk	-
Rapport	B.2021.0253.00.R001
Datum	6 juli 2021
Versie	002
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Contactpersoon	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Auteur	ing. R.G. (Reinoud) Fennema 088 346 76 33 rfe@dgmr.nl
Projectadviseur	ing. A.W.N. (Antwan) van Haaren 088 346 76 02 hr@dgmr.nl
2e lezer/secr.	JBV HW

Inhoud

1. Inleiding	4
2. Situatie	5
3. Rekenmodel	6
3.1 Model	6
3.2 Spoor	7
3.3 Bodemeigenschappen	7
3.4 Randvoorwaarden	7
3.5 Rekenmethodiek	8
3.6 Rekenstappen	8
4. Modelvalidatie	9
4.1 Bodem	9
4.2 Overdracht bodem naar gebouw	10
5. Resultaten uitgangssituatie	11
5.1 Blok A “Special”	11
5.2 Blok B “Basis”	11
6. Maatregelen	13
6.1 Blok A “Special” met sloot en diepwand	13
6.2 Blok B “Basis”	14
7. Nabeschuwing en verdere maatregelen	17
8. Conclusies	19

Bijlagen

Bijlage 1	Bodemopbouw
Bijlage 2	Trillingsresponsies (vervormingsbeelden) - uitgangssituatie
Bijlage 3	Trillingsresponsies met maatregelen

1. Inleiding

In opdracht van Veluwezoom Verkerk heeft DGMR Bouw B.V. onderzoek gedaan naar de te verwachten spoortrillingen in en eventueel te nemen maatregelen aan de te bouwen woningen aan de Asterstraat in Doetinchem. Dit bouwplan ligt op korte afstand van de spoorlijn Doetinchem - Winterswijk. Op deze lijn rijdt alleen reizigersmaterieel van Arriva. De minimumafstand van bebouwing tot het spoor is met 15 tot 18 meter zo gering, dat trillinghinder is te verwachten als er geen aanvullende maatregelen worden getroffen. In het verrichte vooronderzoek in het kader van het bestemmingsplan¹ is vastgesteld dat, om te voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-B, er een reductie van 70% nodig is op de geprognoseerde maximum passageniveaus (V_{max}). Om dit te bereiken is door de uitvoerende adviseur een lijst met mogelijke maatregelen en daarbij horende verwachte reducties opgesteld. Hieruit is door de ontwikkelaar een keuze gemaakt.

De belangrijkste maatregel uit deze lijst betreft het realiseren van een spoorssloot in combinatie met een betonnen diepwand. Deze maatregel is getaxeerd op een trillingsreductie van 45%. Daarnaast is gekozen om tussen verdiepingen trillingsisolatie aan te brengen, met een verwachte reductie van 15%.

In dit rapport is door middel van trillingssimulatie met een Eindig Elementen Model (EEM) onderzoek gedaan naar de te verwachten trillingsreductie van maatregelen. Het doel is niet om de te verwachten trillingen in de woningen na te rekenen, maar om de mate van trillingsreductie van de gekozen maatregelen te valideren. Deze moet tenminste 68% bedragen.

Het aanbrengen van trillingsisolatie op meerdere niveaus in een woning brengt naar onze mening risico's met zich mee. Het dynamisch gedrag van zo'n gestapelde constructie is complex en ongewis en daarom adviseren wij om trillingsisolatie te beperken tot één niveau binnen de draagconstructie. Het is in theorie mogelijk om verschillende vloeren trillingsgeïsoleerd op te leggen, maar voor verdiepingvloeren is dit een constructief ingewikkelde kwestie.

Daarom adviseren wij om trillingsisolatie te beperken tot de woningfundatie. Deze wordt mogelijk in tweede instantie onderzocht, nadat de effectiviteit van de spoorssloot met diepwand is vastgesteld.

¹ WeBoost Data trillingsonderzoek

2. Situatie

Figuur 1 toont het stedenbouwkundig plan Asterstraat Doetinchem met de verschillende bouwclusters. Er worden drie woningtypen gebouwd:

- A. Woningtype 'Special', evenwijdig aan het spoor op minimaal 18 meter.
- B. Type 'Basis', haaks op het spoor staat op minimaal 15 meter.
- C. Rug-aan-rug woningen, eveneens haaks op het spoor op minimaal 15 meter.

Vanwege het wat grotere grondplan zijn de rug-aan-rug woningen (C) als minder trillingsgevoelig aangemerkt als het basis woningtype (B). In dit onderzoek zijn de woningtypen A en B door trillingssimulatie in een Eindige Elementen Model (EEM) nader onderzocht. Deze EEM-studie is uitgevoerd voor de in figuur 1 met vette letters A en B aangeven twee woningclusters. De uitkomsten van het onderzoek gelden echter voor alle clusters.

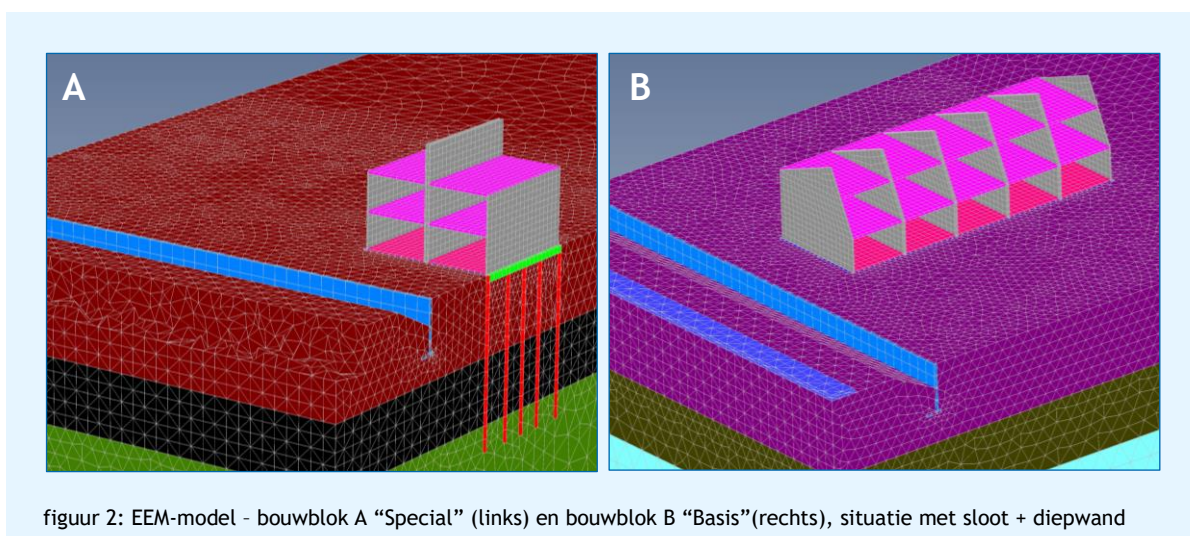


figuur 1: Stedenbouwkundig plan Asterstraat Doetinchem met onderzochte woningtypen A (Special) en B (Basis)

3. Rekenmodel

3.1 Model

Voor de trillingsprognose is een Eindig Elementen Model (EEM) opgesteld van de bodem met een gedeelte van of een geheel blok van woningen. Voor bouwblok A “Special”, dat bestaat uit vier woningen evenwijdig aan het spoor, is ervoor gekozen om de helft van het blok te modelleren, voor bouwblok B “Basis” is het hele blok in het model opgenomen. Figuur 2 toont beide modellen in de situatie met sloot en diepwand. De gevels en pannendaken worden niet getoond.



figuur 2: EEM-model - bouwblok A “Special” (links) en bouwblok B “Basis”(rechts), situatie met sloot + diepwand

Van bouwblok A is slechts de helft gemodelleerd onder toepassing van symmetrievorwaarden in het snijvlak. Dit is gedaan om de modelgrootte en benodigde rekenkracht en rekentijd sterk te beperken, om deze vervolgens ten goede te laten komen aan het verfijnen van de elementgrootte (mesh). De reden hiervoor is de gemeten hoge dominante frequentie in de bodem rond 40 Hz. Om trillingsgolven bij deze frequentie goed te beschrijven, is een 4x zo fijne mesh nodig als bij een frequentie van 10 Hz. De benodigde rekenkracht neemt hierdoor zeer sterk toe. Bouwblok B staat haaks op het spoor en door de verwachte trillingsafname met toenemende afstand tot het spoor, is het onvermijdelijk dit blok in het geheel op te nemen in het model. Door de oriëntatie haaks op het spoor kan het model sowieso al minder breed genomen worden dan het model met bouwblok A en zijn verdere ingrepen ter beperking van rekentijden niet nodig gebleken.

De begane grondvloer betreft een ribcassettevloer opgelegd op randbalken. Hierop worden de woningscheidende wanden geplaatst in een stelmortel. Op de verdiepingen zijn kanaalplaatvloeren toegepast, opgelegd op de woningscheidende wanden. Dynamisch gezien zijn de vloeren aan bovenzijde momentvast verbonden met de wanden en dit is zo in het model geïmplementeerd. In tabel 1 worden de eigenschappen van de verschillende onderdelen gespecificeerd.

tabel 1: eigenschappen constructie

Onderdeel	Materiaal	Massa [kg/m ²]	Massaopslag [kg/m ²]	Damping
Funderingspalen	Mortelschroefpalen 350 mm	--	--	3%
Gevels	100 mm beton + metselwerk	235	--	
Woningscheidende wanden	2 x 100 mm beton	470	--	
Begane grondvloer	Ribcassette 350 mm + 70 mm ZC	210	175 (ZC + 50% variabel)	
Verdiepingsvloeren	Kanaalplaat 200 mm + 70 mm ZC	300	175 (ZC + 50% variabel)	
Dak schuin	Gordingen, dakbeschot, pannen	100	--	

De fundatie wordt ondersteund door vijf mortelschroefpalen per bouwmuur. De kopgevels worden ondersteund door drie palen. Alle palen hebben een doorsnede van 350 mm en worden tot een diepte van variërend van 3,5 tot 4,5 meter boven NAP ingeschroefd. De paallengte bedraagt circa 12 meter voor woningtype A “Special” en 13 meter voor type B “Basis”.

3.2 Spoor

Om de trillingsbelasting van de treinen op de bodem te kunnen aanbrengen, is het spoorbed in het bodemmodel meegenomen. Dit betreft een verhoging van ongeveer 0,5 meter ten opzichte van het maaiveld. Over de lengte van het spoor wordt een lijnvormige trillingsbelasting aangebracht.

3.3 Bodemeigenschappen

Het bodemmodel omvat de bodem tot op 50 meter diepte. De bodemopbouw in de twee modellen is gemodelleerd naar de op 21 april 2021 door IJB Geotechniek uitgevoerde sonderingen.

Voor model A “Special” 1 aangehouden, voor model B “Basis” sondering 11. Beide sonderingen en de gekozen schematische laagopbouw zijn weergegeven in bijlage 1. De bodemopbouw in het model bestaat uit drie zandlagen met een trapsgewijs toenemende stijfheid met de diepte. De mechanische eigenschappen van deze lagen zijn opgenomen in tabel 2.

tabel 2: eigenschappen bodemlagen

Laagomschrijving	Diepte bovenzijde [t.o.v. NAP]	Dichtheid [kg/m ³]	Dyn. E-modulus [MPa]	Dwarscontractie [-]
Model A “Special” - sondering 1				
1: zand los gepakt	+16	1500	60	0,3
2: zand matig vast	+10	1700	150	0,3
3: zand zeer vast	+5	2000	300	0,3
Model B “Basis” - sondering 11				
1: zand los gepakt	+16	1500	85	0,3
2: zand matig vast	+9.5	1700	230	0,3
3: zand zeer vast	+3.5	2000	425	0,3

De stijfheid van bodemlagen heeft veel invloed op de rekenresultaten. Van belang is dat de stijfheid van de bovenste bodemlagen goed overeenkomt met de praktijk opdat de bodem bij ongeveer dezelfde frequenties gevoelig is voor trillingen als in de praktijk en de overdracht van bodem naar gebouwfundatie realistisch is. Dit heeft geleid tot de in tabel 2 vermelde stijfheidswaarden (E-modulus).

3.4 Randvoorwaarden

De onderkant van het model, op 50 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 symmetrievorwaarden aangebracht. Trillingen uitgezonden door de spoorbaan rollen als het ware tussen deze vlakken door van spoor richting gebouw en verder naar de achterzijde van het model. Aan de achterzijde wordt de trillingsenergie afgevangen door middel van dempende elementen.

3.5 Rekenmethodiek

Om de te verwachten trillingen in het bouwblok zo goed mogelijk te prognosticeren, zijn als eerste stap de trillingen van het bodemmodel afgestemd op de gemeten trillingssterkten op maaiveld². Dit is gedaan door de krachtinbreng op de spoorbaan bij te regelen totdat de berekende waarde in iedere frequentieband overeenstemt met de gemeten waarde. 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 zijn de huizenblokken aangebracht in het model en zijn de trillingssterkten in de bebouwing doorgerekend. Berekend zijn de trillingssterkten in de bodem, op constructief stijve punten van het woningcasco (hoek gevel/bouwmuur) en op woningvloeren. Dit is gedaan voor de uitgangssituatie (Hoofdstuk 5) en de situatie met getroffen aanvullende maatregelen (Hoofdstuk 6).

3.6 Rekenstappen

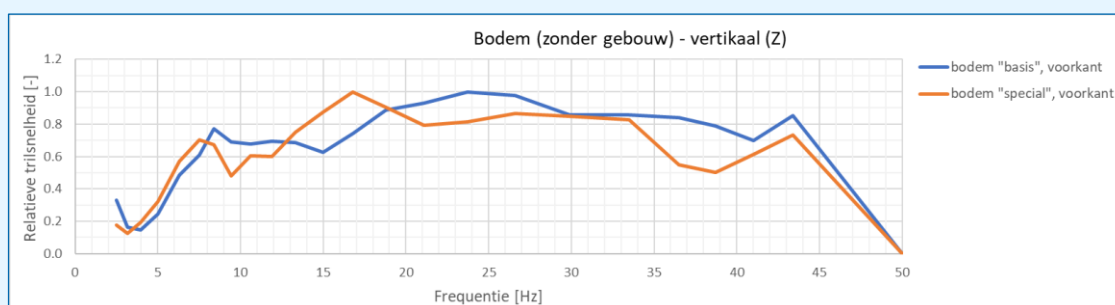
Omdat de dominante frequentie relatief hoog ligt, zijn de berekeningen uitgevoerd in proportionele frequentiestappen. Om het aantal rekenstappen te beperken, is voor frequenties tot 6,3 Hz gerekend met een stapgrootte in 1/3-octaaftand, van 6,3 Hz tot 32 Hz in 1/6-octaaftand en rond de dominante frequenties van 32 Hz tot 40 Hz in 1/12-octaaftand.

² Rapport WeBoostData WBD2013 "Asterstraat Doetinchem- Trillingsonderzoek t.b.v. nieuwbouw", 6 juli 2020

4. Modelvalidatie

4.1 Bodem

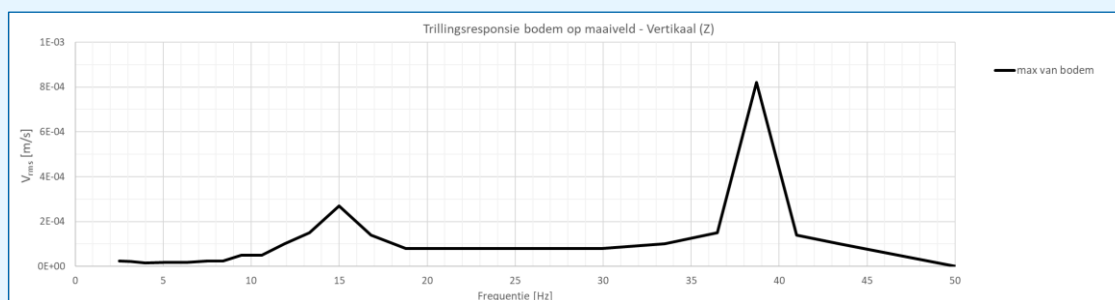
Figuur 3 toont de responsies van de bodem op de rooilijn afstand (van de bebouwing tot het spoor 45 m afstand tot het spoor (15 of 18 meter)) van de beide rekenmodellen “Special” en “Basis”. Deze modellen verschillen onderling iets in bodemopbouw, zie paragraaf 3.3, en daarmee ook in trillingsresponsies op de aangebrachte (uniforme) trillingsbelasting. Te zien is dat beide modellen zich over het hele relevante frequentiegebied van globaal 10 Hz tot 45 Hz gevoelig tonen voor trillingen en trillingen, dus goed worden overgedragen van spoorbaan naar bebouwing.



figuur 3: trillingssterkten op maaiveld (Z), eenheidskracht 0 - 20 Hz

De responsie van de bodem, zie figuur 3, is in overeenstemming gebracht met de gemeten trillingssterkten van treinpassages. Voor een correcte berekening van de effectieve trillingssterkte ($V_{\max}$) is het van belang om treinpassages afzonderlijk te beschouwen. Een “omhullend” spectrum gevormd uit meerdere passages met bijvoorbeeld verschillende rijksnelheden kan leiden tot een overschatting van de gesommeerde trillingssterkte $V_{\max}$. Zo nodig zijn meerdere passages te onderzoeken.

In figuur 4 wordt een trillingsspectrum in de bodem (maaiveld) getoond bij een rijksnelheid van ongeveer 85 km/u. Rond 15 Hz is een trillingsbijdrage te zien afkomstig van de omloopfrequentie van de treinwielen en rond 39 Hz een bijdrage te associëren met de passeerfrequentie van de dwarsliggers. Bij iets hogere of lagere rijksnelheid schuift dit patroon op naar boven dan wel naar beneden. Het getoonde spectrum wordt gebruikt voor de afgebeelde figuren in dit rapport. Voor de resulterende trillingssterkten in de tabellen zijn ook andere snelheden onderzocht.

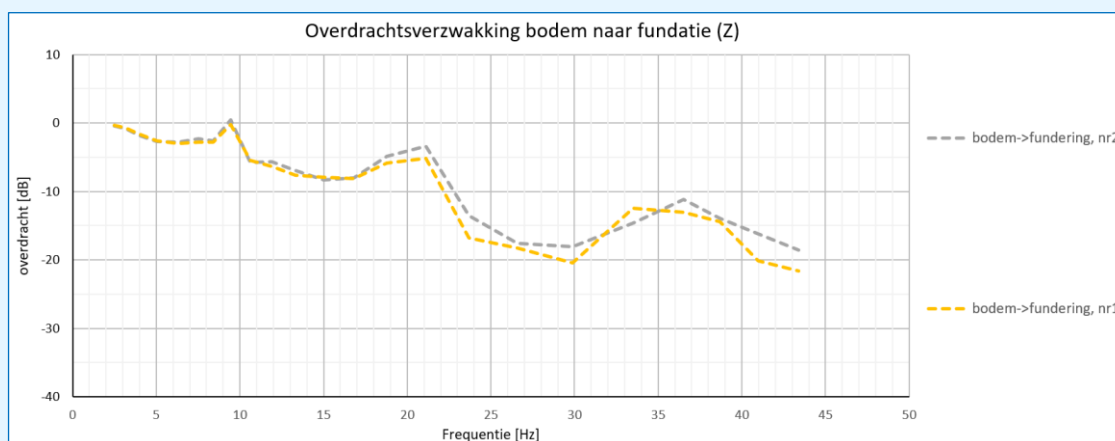


figuur 4: trillingssterkten op maaiveld (Z), afgestemd op meetresultaten

4.2 Overdracht bodem naar gebouw

Voor een realistische trillingssimulatie is het van belang dat de overdrachtsverzwakking van bodem (maaiveld) naar gebouwfundatie zo goed mogelijk overeenkomt met de werkelijkheid. Voor een op palen gefundeerde woning hangt dit sterk af van de bodemeigenschappen in de lagen boven het paalpuntniveau, zoals weergegeven in tabel 2.

In figuur 5 is het berekende overdrachtsspectrum van de bodem (onbebouwde toestand) naar de fundatie van het huizenblok A “Special” afgebeeld. Te zien is dat de verzwakking vanaf 2 Hz geleidelijk aan toeneemt tot waarden van ongeveer 20 dB (factor 10) rond 30 Hz, maar rond de dominante frequenties van 35 tot 40 Hz weer wat lijkt terug te vallen. In dit gebied treden ook eigenfrequenties op in vloeren en wanden, die hun weerslag hebben op het trillingsniveau op de fundatie en dus op de overdracht. De overdrachtsverzwakking herpakt zich vanaf 40 Hz weer tot aan de hoogste berekende frequentie van 43 Hz. De getoonde overdrachtsverzwakking van bodem naar gebouw toont een realistisch verloop en geconcludeerd wordt dat er geen aanpassingen nodig zijn aan de in tabel 2 aangegeven bodemeigenschappen.

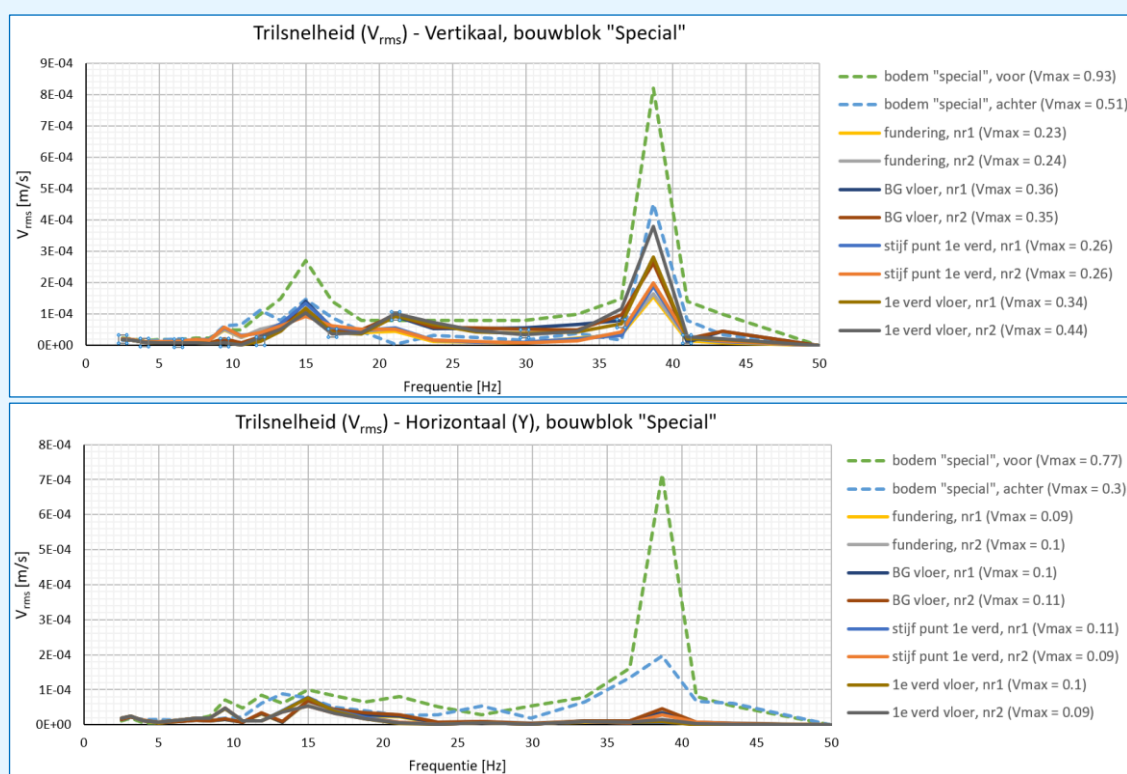


figuur 5: overdrachtsverzwakking bodem (onbebouwd) naar huizenblok A “Special” (verticaal)

5. Resultaten uitgangssituatie

5.1 Blok A “Special”

Figuur 6 toont de berekende trillingsspectra V_{rms} in verticale richting (Z) en in de horizontale richting (Y) haaks op het spoor, voor enkele rekenpunten uit het Blok A “Special”. In de legenda staan de bijbehorende trillingssterkten V_{max} volgens de SBR-B.



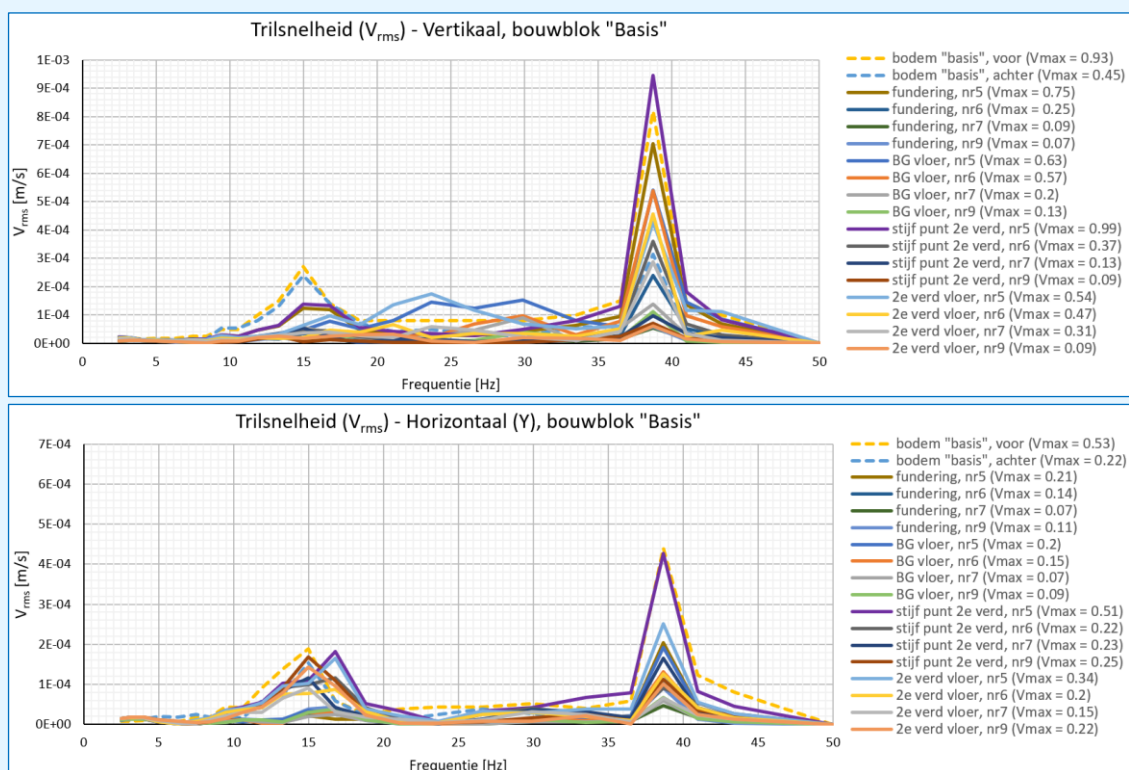
figuur 6: trillingssterkten blok A “Special” in vergelijking met trillingssterkte bodem, verticaal & horizontaal

De in de legenda van figuur 6 aangegeven trillingssterkten V_{max} op vloeren tonen waarden van 0,35 tot 0,44 (mm/s) in verticale richting. In de horizontale richting (Y) haaks op het spoor treden lagere waarden op, tot maximaal 0,11 (mm/s). Dat horizontaal de trillingssterkten zoveel lager zijn, komt hoofdzakelijk doordat bij de dominante frequentie van 39 Hz trillingsversterking van vloeren optreedt. De berekende trillingssterkten (V_{max}) liggen in horizontale richting onder de streefwaarde A2 uit de SBR-B voor woonfuncties (nachtperiode). In verticale richting liggen de trillingssterkten ruim boven deze streefwaarde.

5.2 Blok B “Basis”

In figuur 7 zijn de resultaten voor het Blok B “Basis” weergegeven. Te zien is dat in dit blok de trillingssterkten per woning verschillen vanwege de toenemende afstand per woning tot het spoor. Ook is te zien dat de trillingssterkten in de eerste twee woningen vanaf het spoor hoger zijn dan bij de woningen uit het blok “Special”. De belangrijkste reden hiervoor is dat in de richting haaks op het spoor er minder schijfwerking is van doorlopende wanden. Bij lage frequenties is een oriëntatie van een blok haaks op het spoor vaak beter dan parallel aan het spoor.

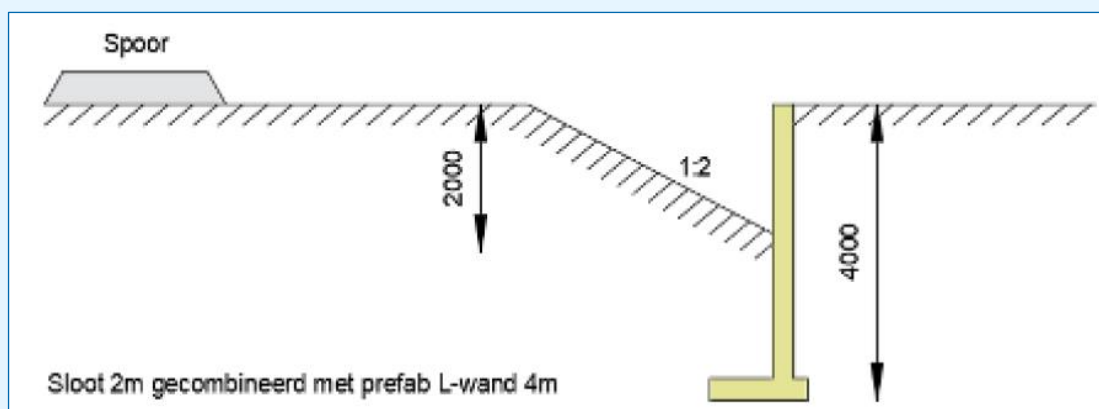
Bij hogere frequenties, waarbij vloeren en wanden in buiging geraken, is dit niet persé het geval en kan zoals hier de buigzaamheid van wanden in combinatie met die van de vloeren voor meer trillingen zorgen. Voor verder van het spoor gelegen woningen wint uiteindelijk het afstandseffect en nemen de trillingssterkten af. De maximale trillingssterkte bedraagt voor de eerste woning vanaf het spoor (hier aangeduid als woning nr5) 0,63 in verticale richting (begane grond) en 0,34 horizontaal (tweede verdieping). Beiden voldoen niet aan de streefwaarden voor de nachtperiode uit de SBR-B. Er zijn, zoals gebleken uit het vooronderzoek¹⁾, dus aanvullende maatregelen nodig.



figuur 7: trillingssterkten blok B "Basis" in vergelijking met trillingssterkte bodem, verticaal & horizontaal

6. Maatregelen

Om te kunnen voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-B zijn voor de vier woningen van Blok A “Special” en tenminste twee van de vijf woningen uit het Blok B “Basis” aanvullende maatregelen nodig. In het vooronderzoek¹⁾ is de benodigde reductie bepaald op tenminste 68% voor de woningen het dichtst bij het spoor. Hiervan is circa 45% te realiseren door het aanbrengen van de in figuur 8 afgebeelde spoorssloot met diepwand. Deze sloot is 2 meter diepe (talud 1:2) en wordt aan woningzijde begrensd door een 4 m diepe keerwand (L-profiel).



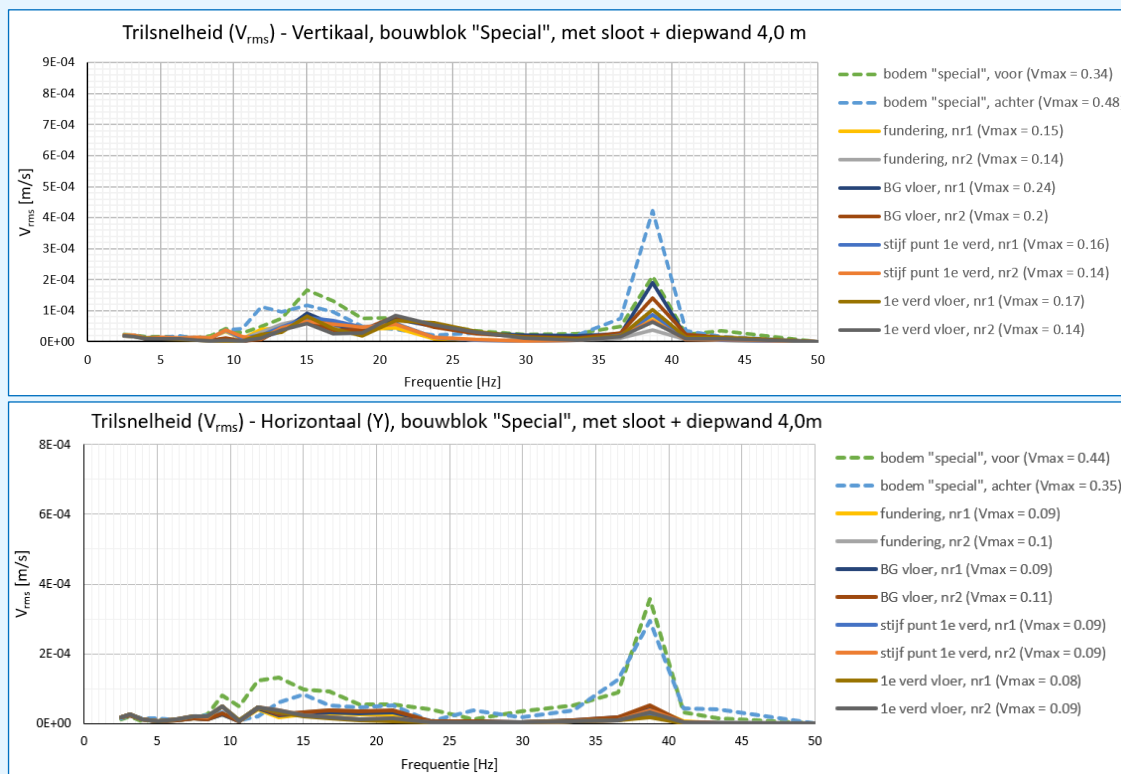
figuur 8: maatregel 2 m diepe spoorssloot met 4 m diepe keerwand

Een verdere 10% trillingsreductie is te realiseren door het aanbrengen van een paalfundering en door het toepassen van een ribcassette vloer (begane grond). Deze twee maatregelen zijn opgenomen in zowel het standaard rekenmodel (uitgangssituatie) alsook in het model met maatregelen en komen daarmee niet tot uitdrukking in het onderlinge vergelijk. Het doorrekenen van dergelijke zeer bescheiden effecten is, gezien de nauwkeurigheid van dit soort simulaties, ook niet mogelijk. Ook het ontkoppelen van woningvloeren ter waarde van een geraamde 15% winst zit niet in het maatregelenpakket.

6.1 Blok A “Special” met sloot en diepwand

Figuur 9 toont de berekende trillingsspectra V_{rms} in verticale richting (Z) en in de horizontale richting (Y) haaks op het spoor, na getroffen maatregel “sloot + diepwand”.

De trillingssterkten V_{max} op vloeren van Blok A “Special” zijn door het treffen van de maatregel “sloot + diepwand” gedaald van 0,35 tot 0,44 (uitgangssituatie) naar 0,14 tot 0,24 (mm/s) in verticale richting. In de horizontale richting (Y) haaks op het spoor zijn de trillingssterkten nauwelijks veranderd en bedraagt de hoogste trillingssterkte 0,11 (mm/s). In verticale richting is de daling in trillingssterkte gemiddeld 48%, maar in horizontale richting is het effect dus gering, gemiddeld 7%. De verwachting dat de sloot met diepwand ongeveer 45% reductie geeft, komt dus uit voor zover het de verticale richting betreft en een dominante frequentie van 39 Hz opgewekt bij een rijsnelheid van ongeveer 85 km/u. Dit is echter wel de richting waarin juist een reductie nodig is.



figuur 9: trillingssterkten blok A "Special" na maatregel "sloot + diepwand", verticaal & horizontaal

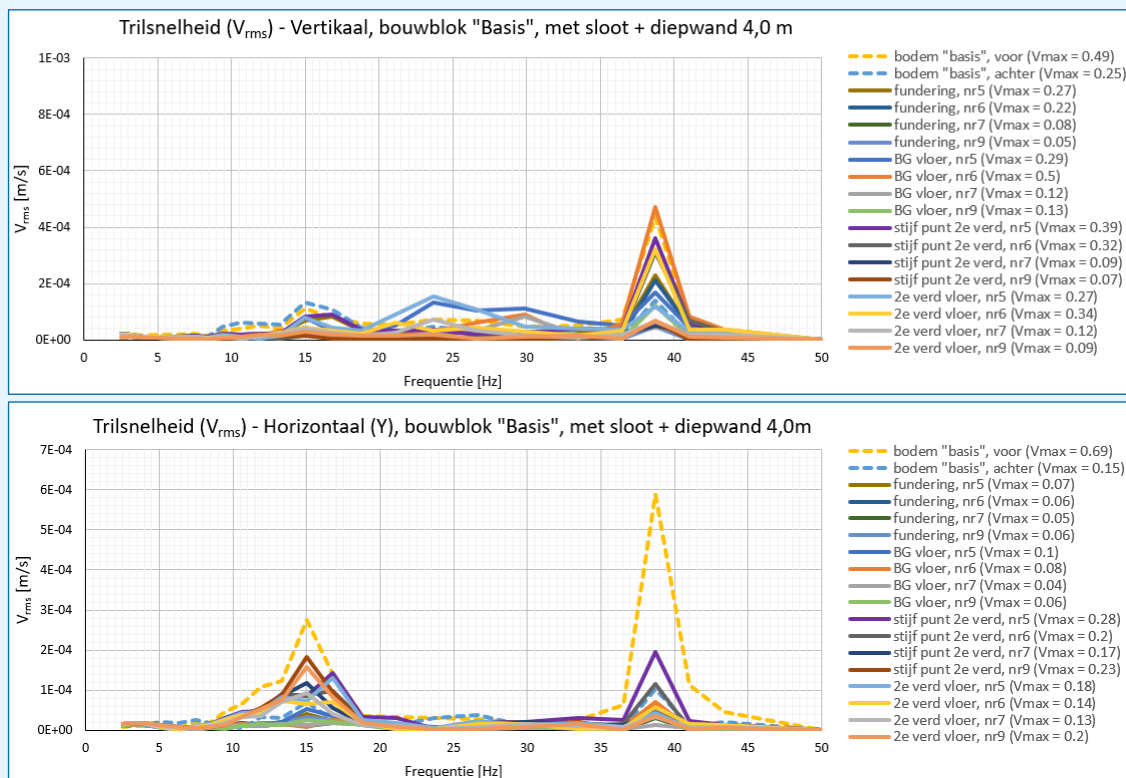
In tabel 3 worden naast de resultaten voor een rijsnelheid van 85 km/u (zie legenda figuur 6 en figuur 9) ook de berekende trillingssterkten voor een lagere rijsnelheid van 72 km/u gegeven. Te zien is dat bij de lagere rijsnelheid van 72 km/u de trillingssterkten in verticale richting in de uitgangssituatie toenemen. De effectiviteit van de sloot met diepwand neemt op de maatgevende verticale richting niet af maar zelfs wat toe, van gemiddeld 40% bij 85 km/u naar 65% bij 72 km/u.

tabel 3: Berekende trillingssterkten $V_{\max}$ voor verschillende rijsnelheden, Blok A "Special"

Snelheid	Vloer	Uitgangssituatie		Sloot + diepwand	
		$V_{\text{eff,max,V}}$ Nr.1/2	$V_{\text{eff,max,H}}$ Nr.1/2	$V_{\text{eff,max,V}}$ Nr.1/2	$V_{\text{eff,max,H}}$ Nr.1/2
85 km/u	bg	0,36/0,35	0,10/0,11	0,24/0,20	0,09/0,11
	1 ^e	0,34/0,44	0,10/0,09	0,17/0,14	0,08/0,09
72 km/u	bg	0,57/0,46	0,13/0,14	0,19/0,16	0,14/0,15
	1 ^e	0,40/0,42	0,11/0,11	0,15/0,13	0,14/0,14

6.2 Blok B "Basis"

In figuur 10 zijn de resultaten voor Blok B "Basis" weergegeven na het treffen van de maatregel "sloot + diepwand". Te zien is dat de trillingssterkten $V_{\max}$ op vloeren van Blok B "Basis", door het treffen van de maatregel "sloot + diepwand", zijn gedaald van maximaal 0,63 op de dichtst bij het spoor liggende woning (Nr.5) (uitgangssituatie) naar maximaal 0,29 (mm/s) in verticale richting. In de horizontale richting (Y) haaks op het spoor zijn de trillingssterkten gedaald van maximaal 0,34 op de tweede verdieping van woning Nr.5 naar 0,18 (mm/s). De daling in zowel verticale alsook de horizontale richting bedraagt ongeveer 50%.



figuur 10: trillingssterkten Blok B "Basis" na maatregel "sloot + diepwand", verticaal & horizontaal

Op de tweede woning vanaf het spoor, in figuur 10 aangeduid met Nr.6, lijkt wat vreemds aan de hand. Op de tweede verdiepingvloer neemt de trillingssterkte in verticale richting maar gering af en op de begane grond neemt deze zelfs toe. De berekende effectiviteit van de sloot met diepwand beperkt zich in verticale richting tot slechtst 14%. Dit heeft te maken met reflecties in de bodem op diepere lagen en waar deze gereflecteerde golf aan het oppervlak opduikt en combineert met oppervlaktegolven. Omdat laagscheidingen in het rekenmodel abrupt zijn, zonder geleidelijk in elkaar overlopende bodemlagen of plooiingen in het scheidingsvlak, zijn dit soort reflecties meer uitgesproken dan in de praktijk. Een tweede reden voor de toename is de ligging van eigenfrequenties in vloeren en wanden. Deze treden op in het frequentiegebied rond 15 à 20 Hz, maar ook in het frequentiegebied van 30 Hz tot 40 Hz. Een kleine verschuiving van de eigenfrequentie richting de frequentie van een rekenstap kan relatief grote verschillen opleveren, zowel omhoog als omlaag. Juist om deze reden zijn meerdere berekeningen uitgevoerd met snelheidsverschillen van treinen, dus met verschillende ligging van dominante aanstootfrequenties.

In tabel 4 worden behalve de resultaten voor een rijsnelheid van 85 km/u (zie waarden legenda figuur 7 en figuur 10) ook de berekende trillingssterkten voor een lagere rijsnelheid van 72 km/u gegeven. Te zien is dat bij de lagere rijsnelheid van 72 km/u de trillingssterkten op de eerste woning Nr.5 in verticale richting in de uitgangssituatie wat toenemen, maar op de tweede woning Nr.6 juist afnemen. Ook de effectiviteit van de sloot met diepwand neemt op de eerste woning af tot 23%, maar op de tweede woning juist toe tot 35%. Beide snelheden beschouwend kan gesteld worden dat de sloot met diepwand een gemiddelde effectiviteit heeft van ongeveer 40% op de eerste twee woningen van Blok B "Basis".

tabel 4: Berekende trillingssterkten V_{max} voor verschillende rijksnelheden, Blok B "Basis"

Snelheid	Vloer	Uitgangssituatie		Sloot + diepwand	
		$V_{eff,max,V}$	$V_{eff,max,H}$	$V_{eff,max,V}$	$V_{eff,max,H}$
		Nr.5/6/7/9	Nr.5/6/7/9	Nr.5/6/7/9	Nr.5/6/7/9
85 km/u	bg	0,63/0,57/0,20/0,13	0,20/0,15/0,07/0,09	0,29/0,50/0,12/0,13	0,20/0,15/0,07/0,09
	2 ^e	0,54/0,47/0,31/0,09	0,34/0,20/0,15/0,22	0,27/0,34/0,12/0,09	0,10/0,08/0,04/0,06
72 km/u	bg	0,75/0,34/0,21/0,22	0,12/0,10/0,08/0,07	0,58/0,22/0,23/0,17	0,13/0,10/0,08/0,07
	2 ^e	0,53/0,25/0,15/0,17	0,39/0,24/0,25/0,24	0,40/0,18/0,12/0,13	0,24/0,17/0,18/0,22

7. Nabeschuwing en verdere maatregelen

De resultaten voor het Blok A “Special” lijken na aanleg van een sloot met diepwand net te voldoen (na gebruikelijke afronding) aan de streefwaarde voor de nachtperiode uit de SBR-B. De berekende variatie in trillingssterkten bij verschillende rijnsnelheden sluit echter niet uit dat incidenteel de streefwaarde licht wordt overschreden.

Voor Blok B “Basis” is de situatie anders. Door het soms samenvallen van specifieke eigenfrequenties van vloeren, in het frequentiegebied van 30 tot 40 Hz, met aanstootfrequenties in het treinspectrum zijn de berekende trillingssterkten in verticale richting in de eerste twee woningen vanaf het spoor erg grillig gebleken. Dit heeft onder andere te maken met de oriëntatie van het blok haaks op het spoor, waardoor de woningscheidende wanden minder weerstand bieden tegen de vanuit het spoor aankomende trillingsgolven. Daarbij moet worden opgemerkt dat de in tabel 4 aangegeven meer extreme waarden voor de eerste woning slechts optreden bij sommige passages, die met de meest ongunstige snelheid passeren.

Voor de derde tot en met de vijfde woning van Blok B “Basis” voldoen de trillingssterkten in de uitgangssituatie al nagenoeg aan de streefwaarden uit de SBR-B, maar voor de eerste twee woningen is dit zeker niet het geval. Als de sloot met diepwand wordt aangelegd, verbetert het wooncomfort in deze twee woningen sterk, maar ook als de ‘oprispingen’ op de vloeren van de tweede woning bij een sloot + diepwand als modelmatige kwesties worden beschouwd, is er behoefte aan verdere reductie van de trillingssterkte om te voldoen aan de SBR-B. Voor de begane grond vloer kan dit mogelijk gerealiseerd worden door deze trillingsgeïsoleerd op te leggen, maar dit vermindert dan ook de stijfheid van de woningconstructie. Voor de verdiepingvloeren is dit geen optie, want dan moet de gehele verdieping inclusief binnenwanden verend opgelegd worden, hetgeen een wankel constructie oplevert.

De meest zekere en beproefde methode is dan ook het afveren van de bovenbouw ten opzichte van de fundatie, wat de bovenbouwconstructie als geheel ongemoeid laat. Met trillingsisolatie onder de woning kan het ontbrekende stuk van de benodigde reductie gerealiseerd worden. Daarbij zijn er twee varianten mogelijk, een slapverende oplegging of stijfverend. De tweede mogelijkheid richt zich op het isoleren van de dominante trillingen in het frequentiegebied tussen 30 en 40 Hz en naast het reduceren van trillingen ook op het beperken van constructiegeluid in de woning. De eerste maatregel doet hetzelfde, maar richt zich op het realiseren van hogere isolatiewaarden over een breder frequentiegebied en deze oplossing is, mits goed uitgevoerd, ook minder afhankelijk van het spoorgebruik ofwel de treintypen die er rijden. In het geval de sloot met diepwand kunnen worden aangelegd, is er een beperktere isolatiebehoefte dan wanneer dit niet het geval is en kan in principe worden volstaan met een stijfverende oplegging. Als deze maatregel niet kan worden gerealiseerd, dan is een slapverende oplegging een betere keuze. Beide maatregelen worden hieronder kort omschreven.

Slapverende oplegging

Oplegging op stalen schroefveren. Hiervoor is onder het kader van randbalken een tweede dragend kader of vloerplaat aan te leggen, waarop de trillingsisolatoren (veren) worden geplaatst.

Hierop rust de bovenbouwconstructie die op zich geen grote aanpassingen behoeft, maar mogelijk dat de lengte van bouwblokken beperkt moet worden. Van belang bij een slapverende oplegging is dat het afgeveerde deel goed vrijgehouden wordt van de omringende bodem (indringende grond), omdat dit afbreuk doet aan de trillingsisolatie. De afveerfrequentie van de stalen schroefveren hoeft voor het huidige spoorgebruik niet extreem laag te zijn. Omdat de dominante frequenties in het treinspectrum pas beginnen vanaf 8 Hz, volstaat hier een afveerfrequentie van ten hoogste 5 Hz.

Stijfverende oplegging

Oplegging op rubber blokken met een goed gecontroleerde afveerfrequentie van 16 tot 18 Hz.

Dit moeten rubber blokken van hoge kwaliteit zijn die weinig veroudering en verandering van eigenschappen met de jaren vertonen. Deze rubber 'pads' kunnen ingevoegd worden tussen de funderingspalen en de randbalken. Deze worden opgenomen in een inkassing in de randbalk.

8. Conclusies

De uitgevoerde trillingsberekeningen voor de twee woningblokken A “Special” en B “Basis” laten zien dat met de aanleg van een 2 m diepe sloot plus 4 m diepe diepwand er trillingsreducties mogelijk zijn van globaal 40% (Blok B) tot 50 à 60% (Blok A). De exacte reductie hangt daarbij af van de stijfheid van de bovenste bodemlagen. Voor Blok A is de berekende effectiviteit wat groter vanwege de lagere aangetroffen bodemstijfheid dan op de locatie van Blok B. Met name voor Blok B blijft de effectiviteit wat achter bij de beoogde effectiviteit van 68%, maar daarbij moet worden opgemerkt dat de toegeschreven 10% effectiviteit voor de paalfundatie en het toepassen van een ribcassettevloer al zijn meegenomen in de uitgangssituatie en dus niet tot uitdrukking komen in het onderling vergelijk. Hiervoor gecorrigeerd is er voor Blok A dus geen significant verschil tussen de beoogde reductie van 68% en de berekende reductie. Voor Blok B mist er nog wel zo’n 20% reductie. Dit lijkt nog maar een kleine stap, maar houdt in dat de trillingssterkten vanaf de nu berekende waarden met nog minstens een factor 1,5 gereduceerd moeten worden.

Als de omschreven sloot met diepwand wordt aangelegd, dan is dit volgens de berekeningen net voldoende om in Blok A “Special” te voldoen aan de streefwaarde uit de SBR-B, ook al is een incidentele overschrijding niet uit te sluiten. Zonder sloot en diepwand is trillingsisolatie onder de woningen de meest aangewezen en effectieve maatregel.

Voor het dwars op het spoor geplaatste Blok B “Basis” geldt dat alleen in de eerste twee tot mogelijk drie woningen gezien vanaf het spoor niet voldaan wordt aan de streefwaarden. Na aanleg van een sloot met diepwand voldoet de derde woning, maar de eerste twee woningen nog niet. De sloot en diepwand hebben bij dit bouwblok een mindere effectiviteit dan in het geval van Blok A en er is dus zeker behoefte aan een aanvullende maatregel om trillingen verder te reduceren. Geadviseerd wordt om dit in te vullen met trillingsisolatie onder de woningen, in te voegen onder de dragende randbalken. Als de sloot en diepwand worden aangelegd, is ongeveer nog een factor 1,5 extra reductie nodig hetgeen gerealiseerd kan worden met rubber blokken tussen paalkop en randbalken.

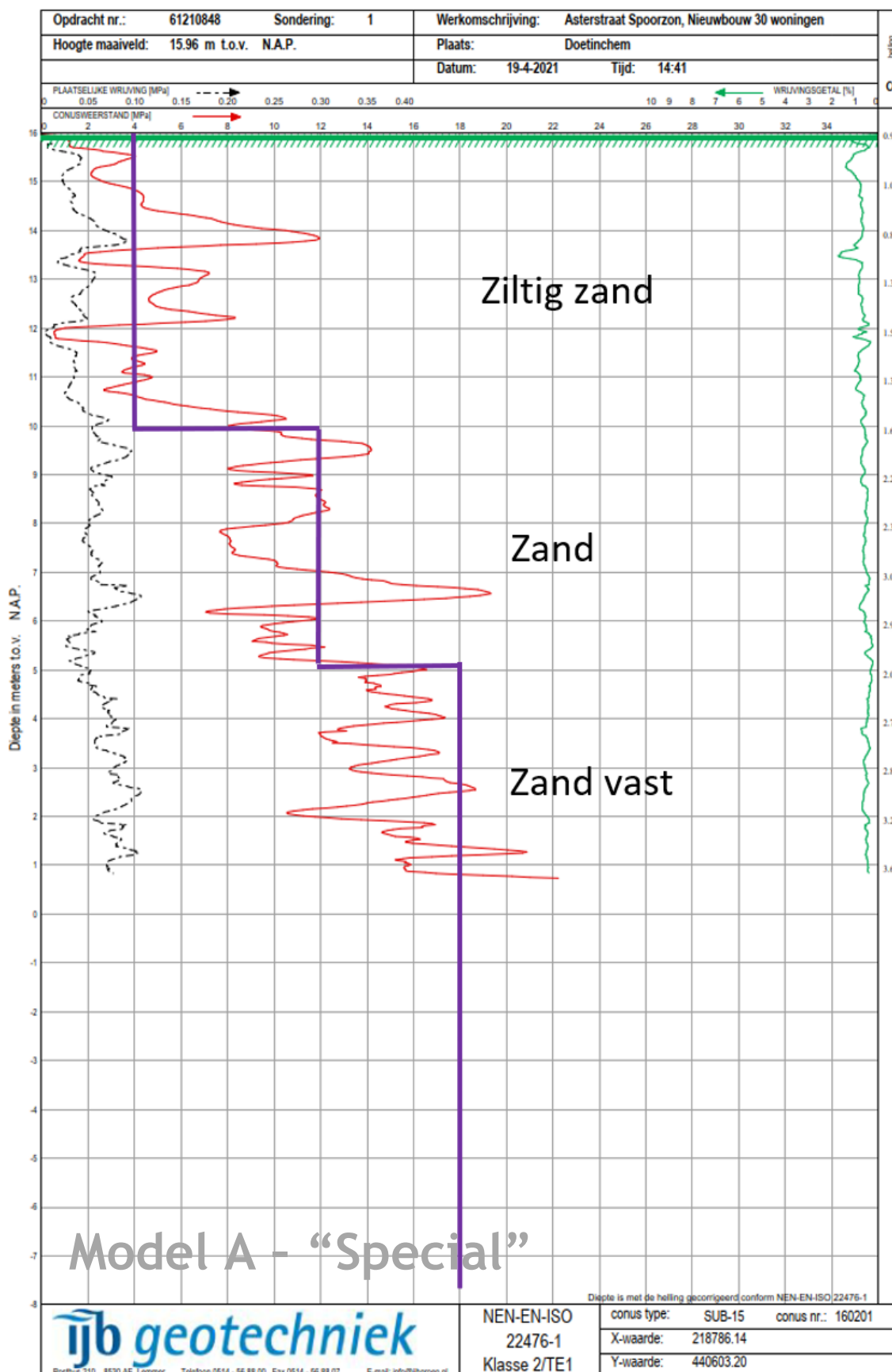
Als de sloot en diepwand niet worden aangelegd, is een factor 3 reductie nodig (-68%) en dan is de meest effectieve en goed te dimensioneren vorm het toepassen van een slapverende oplegging in de vorm van stalen schroefveren. Deze worden dan geplaatst onder de randbalken en hiervoor is een ondersteunend betonkader of betonplaat nodig.

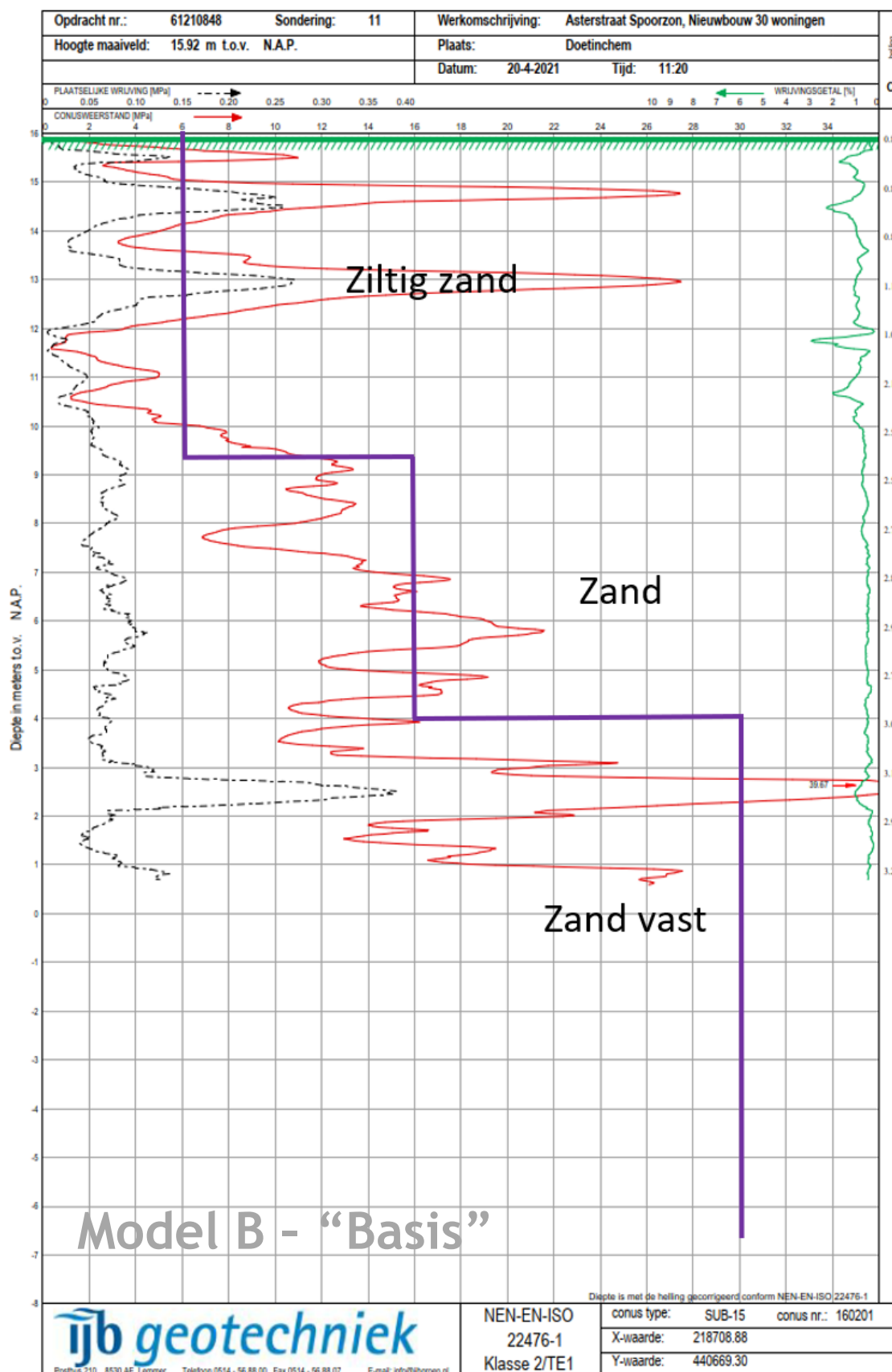


ing. A.W.N. (Antwan) van Haaren
DGMR-Bouw B.V.

Bijlage 1

Titel	Bodemopbouw
Omvang	2
Toelichting	Sondering Nr.1 & 11, uitgevoerd door IJB Geotechniek in 2021

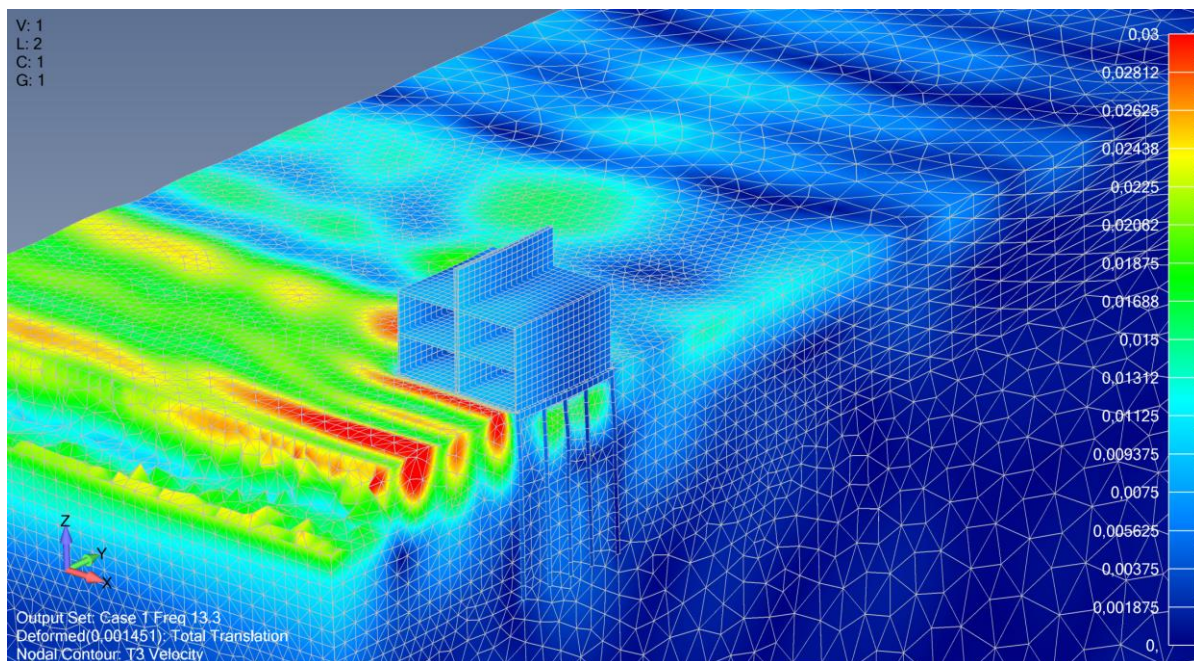




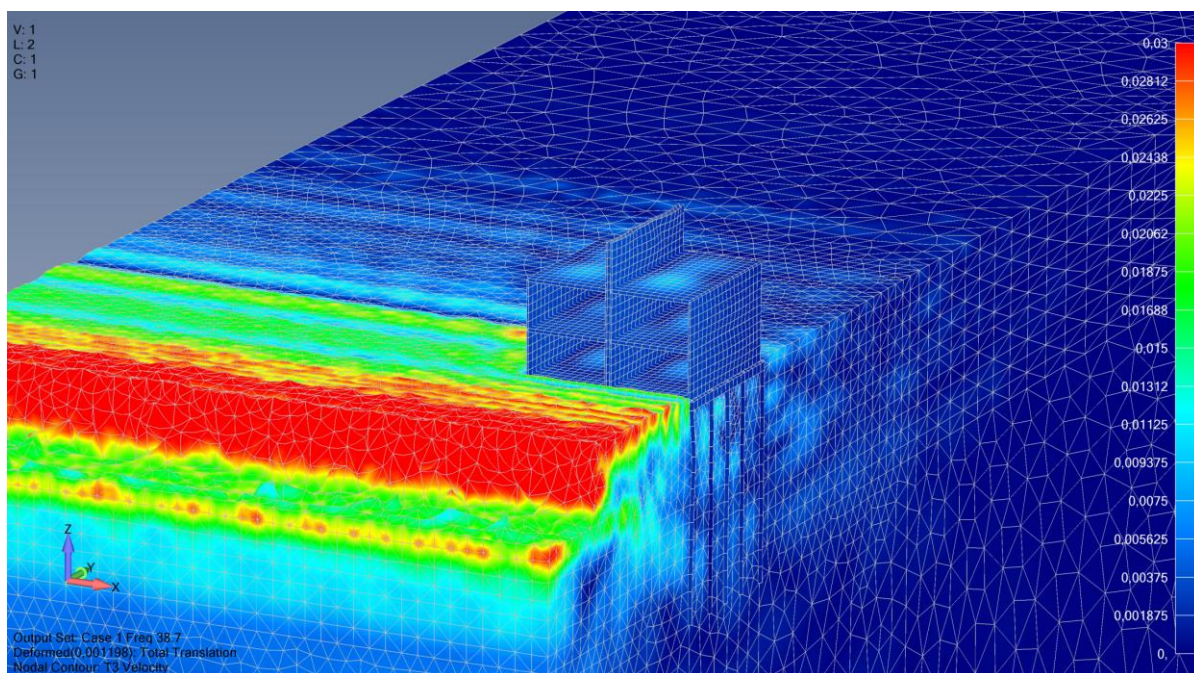
Bijlage 2

Titel	Trillingsresponsies (vervormingsbeelden) - uitgangssituatie
Omvang	2
Toelichting	Trillingscontouren V_{rms} in Z-richting

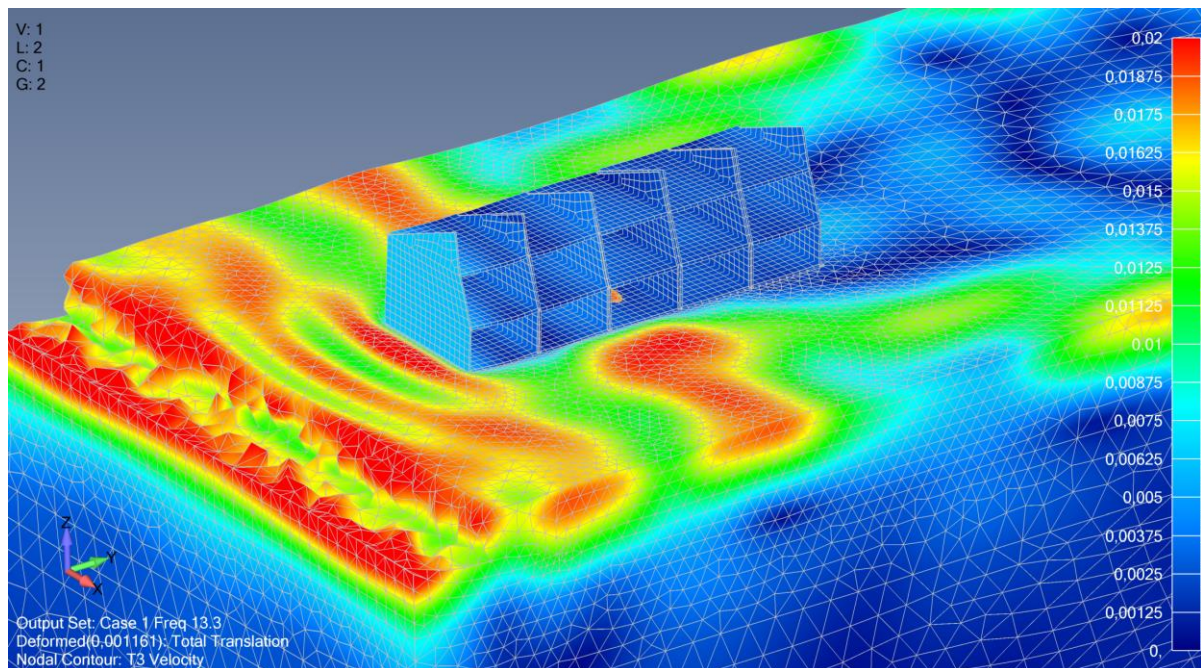
Blok A “Special”, 13 Hz - Trillingssterkte bodem neemt toe, lichte reactie huizenblok



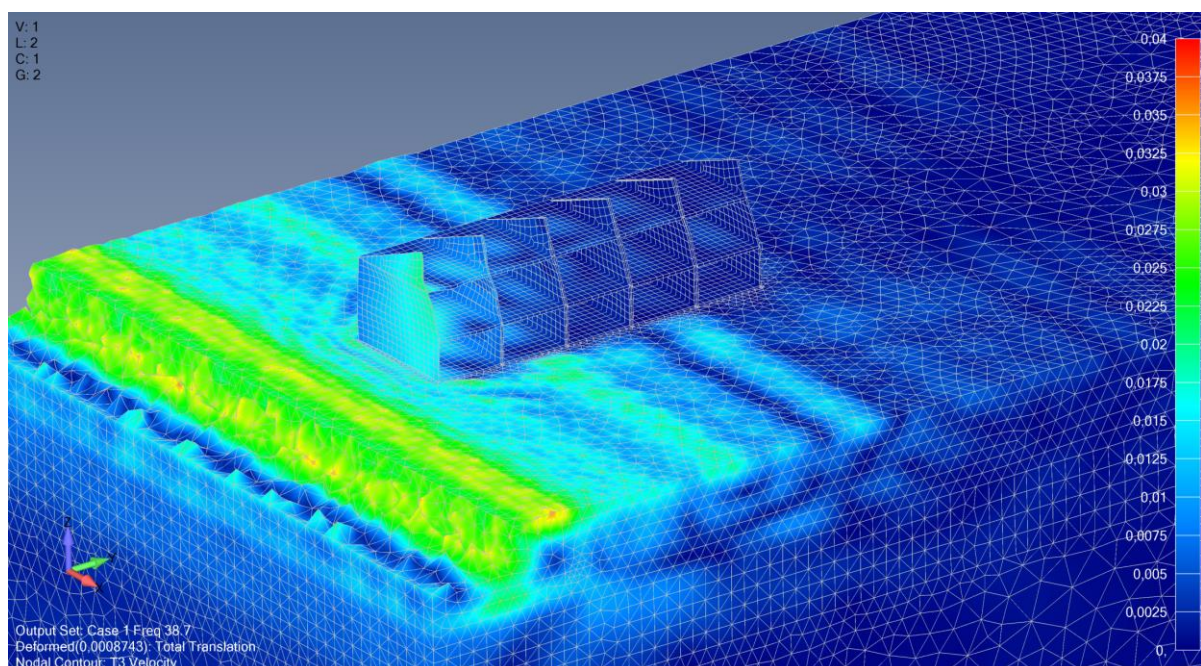
Blok A “Special”, 39 Hz - Trillingen bodem oppervlakkiger, vloeren raken in eigenfrequentie



Blok B “Basis”, 13 Hz - Trillingen bodem beïnvloedt door huizenblok, lichte vervorming voorzijde blok



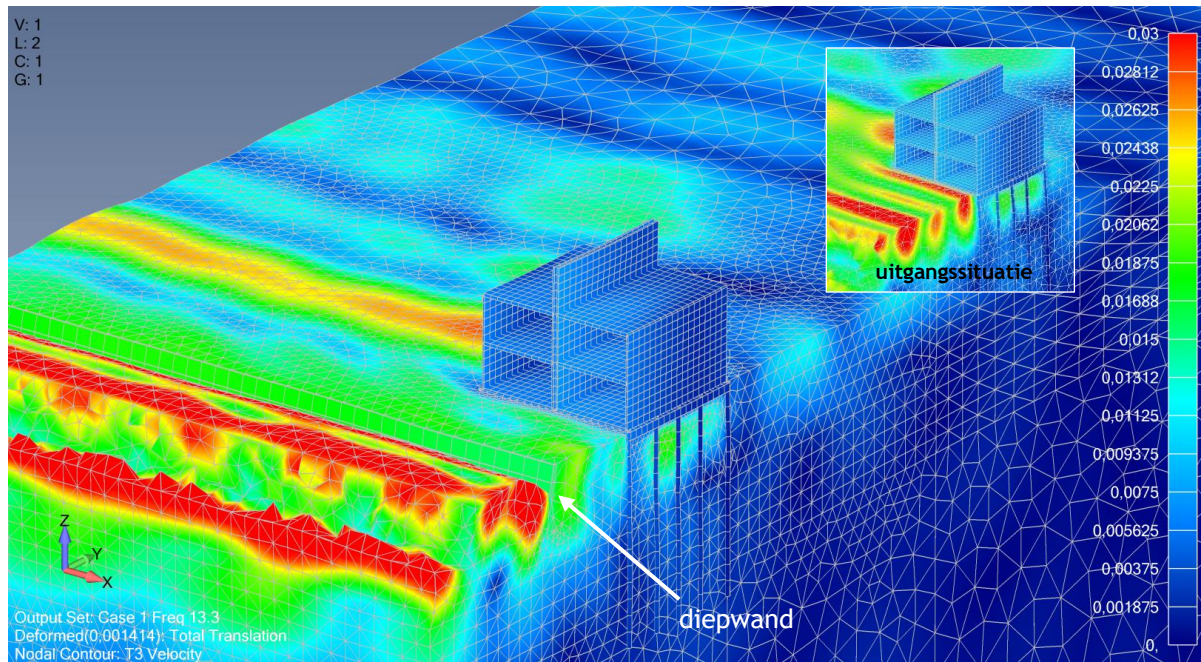
Blok B “Basis” 39 Hz - Sterke trillingsafname met de afstand, sterke vervorming vloeren + wanden eerste woning



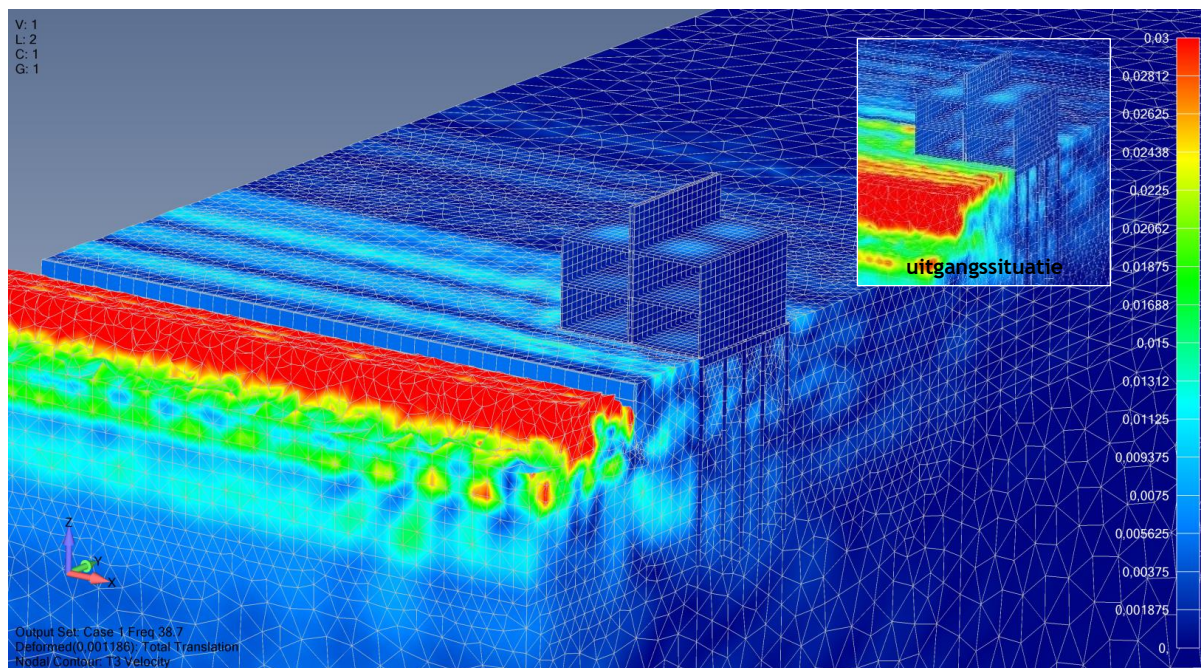
Bijlage 3

Titel	Trillingsresponsies met maatregelen
Omvang	2
Toelichting	Sloot + diepwand

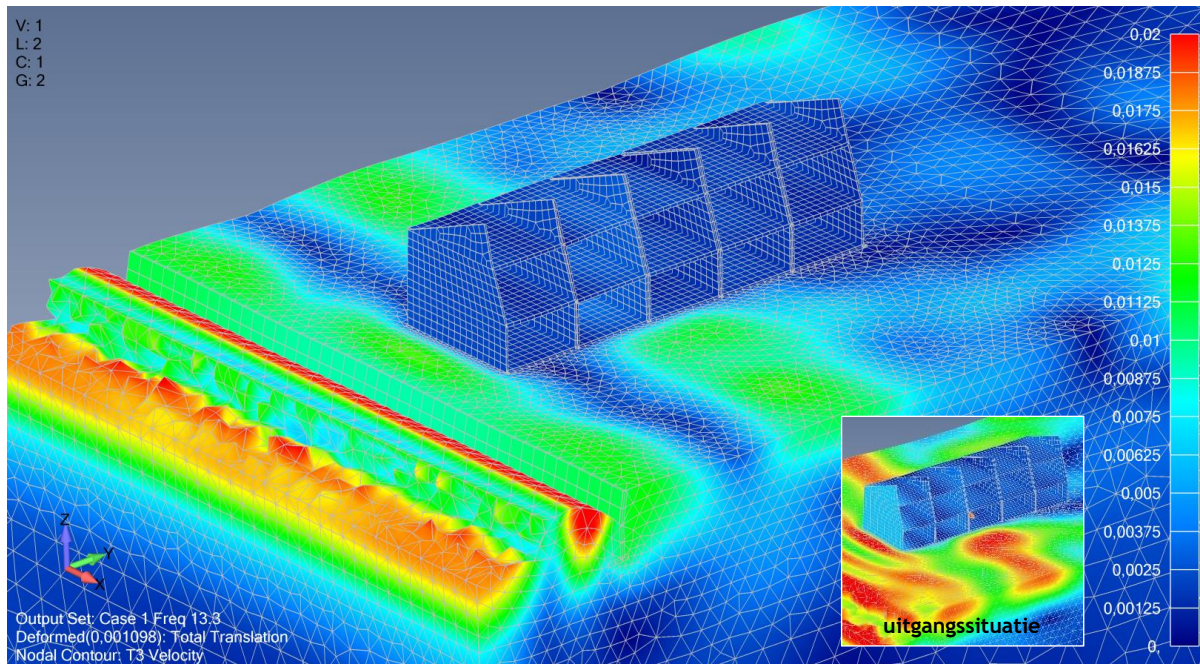
Blok A “Special” met sloot + diepwand, 13 Hz - Achter diepwand minder trillingen op maaiveld



Blok A “Special”, met sloot + diepwand, 39 Hz - Achter diepwand minder trillingen op maaiveld



Blok B “Basis”, 13 Hz - Trillingen bodem beïnvloedt door huizenblok, lichte vervorming voorzijde blok



Blok B “Basis” 39 Hz - Sterke trillingsafname met de afstand, sterke vervorming vloeren + wanden eerste woning

