RailTube

Rapportage Praktijkproef

MIS7
Martin's Imagineering Studio

Samenvatting

In het kader van het IBS programma van ProRail worden een aantal innovatieve maatregelen tegen trillingen door spoor en spoorverkeer getest en onderzocht. Eén van die maatregelen, door MIS7 in samenwerking met TNO ontwikkeld, zijn de Railtubes. Dit is een grid van verticaal geplaatste buizen in de bodem, inclusies, die tot een afname van trillingen achter de buizen moeten leiden. Karakteristiek van het RailTube concept is dat de trillingsreductie plaats vindt in een specifiek frequentiegebied (bandgap). Doel van dit project was het realiseren en testen van het concept alsmede het bouwen en valideren van een 3D eindige elementen model van het systeem, dat in toekomstige situaties als basis kan dienen om de vereiste configuratie onder de condities van de nieuwe situatie te bepalen. Tevens wordt er zicht gekregen op de methode en de kosten (Business case) van het aanleggen van een RailTube grid in de bodem en of het gebruik van een bio-afbreekbare kunststof als materiaal voor de buizen toepasbaar is.De test heeft plaatsgevonden op het terrein van MIS7 aan de Beilerstraat in Westerbork. Ter voorbereiding van de proef zijn verschillende metingen en sonderingen in de grond gedaan. Deze gegevens zijn mede gebruikt om aan de hand van een analytisch model de configuratie van de RailTubes te bepalen. Het beoogde frequentiegebied voor deze proef was 25 Hz-40Hz. Aan de hand van deze analytische modelberekeningen is besloten een grid van 4 x 4 buizen aan te leggen met een hart op hart afstand tussen de buizen van 4,0 meter. De aanleg van het grid vond plaats door per positie een gat te boren met een doorsnede van 110 cm en een diepte van 500 cm. In dat gat werd een cluster van 3 buizen geplaats met ieder een doorsnede van 50 cm. De buizen werden ter fixatie omstort met bentoniet en grind. De bouw is in twee fasen uitgevoerd. Eerst is een grid van 4 x 3 buizenclusters aangelegd, waarna een trillingsreductie test heeft plaatsgevonden om vervolgens het 4 x 4 grid compleet te maken en nogmaals een trillingsreductie test uit te voeren. Dit om inzicht te krijgen in het verschil in effectiviteit van een grid met 3 of 4 rijen inclusies. In opdracht van ProRail zijn door Movares vier metingen gedaan om de effectiviteit van de RailTubes te bepalen, met behulp van een kunstmatige trillingsbron (valproef):

- Nul-meting
- Een grid van 4x3 lege Railtubes
- Een grid van 4x4 Railtubes gevuld met water
- Een grid van 4x4 lege Railtubes

De valproefmetingen hebben geleid tot de volgende conclusies vanuit Movares over de effectiviteit van de Railtubes om trillingen te reduceren:

Onder 20 Hz hebben de Railtubes zowel toenamen als afnamen van +/- 2 dB.

Tussen 20 Hz en 32 Hz is een consistente afname van trillingen gemeten op de meetpunten 12m, 20m, 28m en 44m achter het 4 x 4 grid.

- 2-5 dB bij nameting 1 (4x3 grid met lege buizen)
- 2-10 dB bij nameting 2 (4x4 grid gevuld met water)
- 2-9 dB bij nameting 3 (4x4 grid met lege buizen)

Boven 32 Hz is er een sterke variatie in het effect per meetpunt en frequentie, en kunnen moeilijk uitspraken gedaan worden over de effectiviteit. De uitkomst van de metingen is in lijn met het principe van de RailTubes, die reductie van de trillingen beoogd in een specifiek frequentiegebied. De breedte van het frequentiegebied waar reductie optreedt is 12 Hz, beoogd was een breedte van 15 Hz. Het frequentiegebied was aan de hand van het analytische model berekend te starten vanaf 25 Hz waar de metingen aangeven dat vanaf 20 Hz de reductie start. De verwachte toename van de effectiviteit met het aanbrengen van een extra rij in het grid wordt bevestigd door de metingen. Daarnaast blijft de effectiviteit van de maatregel in tact bij een met water gevulde buis.
Binnen het project is een 3D eindige elementen model van de bodem gebouwd op basis van de sonderingen in de bodem en gevalideerd aan de hand van de 0-meting door Movares van de bodem zonder de RailTubes. Vervolgens zijn in het model de RailTubes gemodelleerd. Dit model reproduceert de gemeten trillingsreductie niet. Ook niet na verschillende modificaties die binnen het kader van dit project mogelijk waren en kon dus niet gevalideerd worden. De simulaties geven trillingsreductie te zien bij frequenties boven de 60 Hz.
Vanuit de business case analyse is gebleken dat de toepassing van stalen buizen het beste scoort. De stalen buizen kunnen namelijk na gebruik weer hergebruikt worden, wat het een zeer goed alternatief biedt ten opzichte van de biopolymeren buizen. Wanneer we kijken naar de kosten dan scoort deze variant verreweg het beste. Door bovendien de toepassing van de bovenmaatse maat van 1.016 tot 1.120 cm en een iets langere lengte, denken we ook dat de effectiviteit van de reductie van trillingen nog meer ten goede komt. De geraamde vaste kosten per project tot 1.000m lengte worden geraamd op 75 kEuro en de variabele kosten per m spoor vanaf 12 m worden geraamd op de variant met stalen buizen op 2,1 kEuro tot 4,3 kEuro. De methode kent ook een nadeel ten aanzien van andere trilling dempende maatregelen, het heeft relatief veel ruimte nodig. Anderzijds heeft het ook een groot voordeel. RailTube hoeft niet in de spoorzone te worden aangelegd en kan buiten die zone worden geïnstalleerd wat de voorbereiding en uitvoering een stuk eenvoudiger maakt en dus ook goedkoper. De conclusie van het project is dat het trillingsreducerende effect van de RailTube concept in de praktijk kwalitatief aansluit bij wat het analytisch model voorspeld. De gevonden bandgap loopt van 20 Hz tot 32 Hz, bij een verwachte bandgap van 25 Hz tot 40 Hz. De metingen konden in het kader van dit project niet onderbouwd worden met de resultaten van een simulatie aan de hand van een 3D eindige elementen model. De aanbeveling is om te onderzoeken of het haalbaar is om alsnog te komen tot een model dat de situatie tijdens de proef zo goed mogelijk benaderd en zo ja dit model te bouwen en na te gaan of de resultaten daarvan wel bruikbaar zijn om de effectiviteit van RailTubes te voorspellen. Dit, omdat de meetresultaten die de praktijk laat zien bemoedigend zijn om te komen tot een gerichte en effectieve maatregel in het frequentiegebied rond 20 Hz. TNO ziet nog een mogelijkheid van een andere vorm van modellering. We

stellen dan ook voor, gezien de potentie van het systeem, een aanvullende project uit te voeren, waarbij dat aanvullende model wordt gebouwd in combinatie met de aanleg van een vergelijkbaar fononisch kristal, maar dan van het intrillen van 16 (grid van 4x4) stalen buizen in combinatie met een meetprogramma. De kosten hiervan worden geraamd tussen de 100 kEuro en 150 kEuro.

Summary

As part of ProRail's IBS program, a number of innovative measures against vibrations caused by rail and rail traffic are being tested and investigated. One of these measures, developed by MIS7 in collaboration with TNO, is the Railtubes. This is a grid of vertically placed tubes in the bottom, inclusions, which should lead to a decrease in vibrations behind the tubes. Characteristic of the RailTube concept is that the vibration reduction takes place in a specific frequency range (bandgap). The aim of this project was to realize and test the concept as well as to build and validate a 3D finite element model of the system, which in future situations can serve as a basis to determine the required configuration under the conditions of the new situation. The method and the costs (Business case) of constructing a RailTube grid in the soil and whether the use of a biodegradable plastic as a material for the pipes is applicable are also examined. The test took place on the site of MIS7 on the Beilerstraat in Westerbork. In preparation for the test, various measurements and probes have been made in the ground. This data was also used to determine the configuration of the RailTubes on the basis of an analytical model. The intended frequency range for this trial was 25 Hz-40Hz. Based on these analytical model calculations it was decided to build a grid of 4 x 4 tubes with a heart at heart distance between the tubes of 4.0 meters. The construction of the grid took place by drilling a hole per position with a diameter of 110 cm and a depth of 500 cm. In that hole a cluster of 3 tubes was placed, each with a diameter of 50 cm. The spaces between the tubes were covered with bentonite and gravel for fixation. The construction was carried out in two phases. First a grid of 4 x 3 tube clusters was constructed, after which a vibration reduction test took place to complete the 4 x 4 grid and perform another vibration reduction test. This is to gain insight into the difference in effectiveness of a grid with 3 or 4 rows of inclusions. On behalf of ProRail, Movares made four measurements to determine the effectiveness of the RailTubes, using an artificial vibration source (fall test):

- Zero measurement
- A grid of 4x3 empty Railtubes
- A grid of 4x4 Railtubes filled with water
- A grid of 4x4 empty Railtubes

The drop test measurements led to the following conclusions from Movares about the effectiveness of the Railtubes to reduce vibration:

Below 20 Hz, the Railtubes have both increases and decreases of +/- 2 dB.

Between 20 Hz and 32 Hz, a consistent reduction of vibrations is measured at the measuring points 12m, 20m, 28m and 44m behind the 4 x 4 grid.

- 2-5 dB at first reduction measurement (4x3 grid with empty tubes)
- 2-10 dB at second reduction measurement (4x4 grid filled with water)
- 2-9 dB at third reduction measurement (4x4 grid with empty tubes)

Above 32 Hz there is a strong variation in the effect per measuring point and frequency, and it is difficult to make statements about the effectiveness. The result of the measurements is in line with the principle of the RailTubes, which aims to reduce vibrations in a specific frequency range. The width of the frequency range where reduction occurs is 12 Hz, intended was a width of 15 Hz. The frequency range was calculated using the analytical model to start from 25 Hz where the measurements indicate that the reduction starts from 20 Hz. The expected increase in effectiveness with the addition of an extra row in the grid is confirmed by the measurements. In addition, the effectiveness of the measure remains intact with a water-filled tube. Within the project, a 3D finite elements model of the soil was built on the basis of the probes in the soil and validated on the basis of the 0-measurement by Movares of the soil without the RailTubes. Subsequently, the RailTubes were modelled in the model. This model does not reproduce the measured vibration reduction. Not even after several modifications that were possible within the framework of this project and could therefore not be validated. The simulations show vibration reduction at frequencies above 60 Hz.
The business case analysis showed that the application of steel pipes scores best. The steel tubes can be reused after use, which offers a very good alternative compared to the biopolymer tubes. When we look at the costs, this variant scores by far the best. In addition, by applying the oversize size from 1,016 to 1,120 cm and a slightly longer length, we also think that the effectiveness of the reduction of vibrations is even more beneficial. The estimated fixed costs per project up to 1,000m length are estimated at 75 kEuro and the variable costs per m track from 12 m are estimated on the steel tube variant at 2,1 kEuro to 4,3 kEuro. The method also has a disadvantage compared to other vibration damping measures, it needs a relatively large amount of space. On the other hand, it also has a great advantage. RailTube does not have to be installed in the railway zone and can be installed outside that zone, which makes the preparation and execution a lot easier and therefore cheaper. The conclusion of the project is that the vibration-reducing effect of the RailTube concept in practice is qualitatively in line with what the analytical model predicts. The bandgap found runs from 20 Hz to 32 Hz, with an expected bandgap from 25 Hz to 40 Hz. In the context of this project, the measurements could not be substantiated with the results of a simulation using a 3D finite element model. The recommendation is to investigate whether it is feasible to arrive at a model that approximates the situation as closely as possible during the trial and, if so, to build this model and to check whether the results are useful to predict the effectiveness of RailTubes. This is because the measurement results that the practice shows are encouraging to arrive at a targeted and effective measure in the frequency range around 20 Hz. TNO sees another possibility of a different form of modelling. We therefore propose, given the potential of the system, to carry out an additional project, in which that additional model is built in combination with the construction of a similar phononic crystal, but then of the trembling of 16 (grid of 4x4) steel tubes in combination with a measurement program. The estimated cost is between 100 kEuro and 150 kEuro.

1. Inhoudsopgave

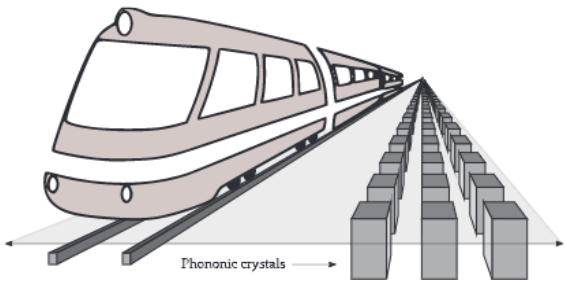
Samenvatting 2
1. Inhoudsopgave 6
2. Inleiding 7
2.1 Het RailTube concept 7
2.2 Theoretische achtergrond 7
3. Opzet van de praktijkproef 9
3.1 Doel praktijkproef 9
4. Voorbereiding en uitvoering van de proeven 10
4.1 Definitieve keuze locatie praktijkproef 10
4.2 Voorbereidende werkzaamheden en afsluitende werkzaamheden 10
4.3 Uitvoering van de proeven 14
4.4 Einde proef vrijmaken testlocatie 15
5. Resultaten van de proeven 15
5.1 Vergelijking 0-meting en 4x3 grid met lucht gevulde buizen 16
5.2 Vergelijking 0-meting en 4x4 grid met lucht gevulde buizen 16
5.3 Vergelijking 0-meting en 4x4 grid met water gevulde buizen 18
6. Eindige Elementen Modelering 19
6.1 Bouw van het model 19
6.2 Simulatie resultaten 20
6.3 Discussie modelering 25
7. Business case analyse 25
7.1 Kosten 25
8. Conclusies en aanbevelingen 28
8.1 Effectiviteit maatregel 29
8.2 Validatie van het rekenmodel 29
8.3 Conclusie 29
8.4 Aanbevelingen 29
Bijlage A, Rapportage Geotechnisch onderzoek Fugro 30
Bijlage B, Rapportage metingen Movares 31

2. Inleiding

ProRail heeft, in opdracht van de Minister van I&W, de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (hierna IBS) opgezet. Doel van dit programma is te komen tot doelmatige bronmaatregelen om overlast vanwege spoortrillingen te voorkomen. De IBS bevat een mix van onderzoek en ontwikkeling voor fundamentele kennis, opdoen van praktijkervaringen en onderlinge kennisuitwisseling. Als onderdeel van de IBS zijn praktijkproeven met trillingsreducerende maatregelen aan de infrastructuur uitgevoerd. Het doel van deze praktijkproeven is het beschikbaar krijgen van beslisinformatie (effecten, neveneffecten, kosten) voor bredere implementatie van potentiële bronmaatregelen. Binnen dit kader is een SBIR programma opgezet waarvan de RailTubes één van de voorgestelde oplossingen is waarvan een praktijkproef is uitgevoerd.

2.1 Het RailTube concept

Eén van de oplossingsrichtingen binnen de SBIR, is aangedragen door MIS7. De oplossing betreft het aanbrengen van een zogenaamd fononisch kristal naast de spoorbaan.

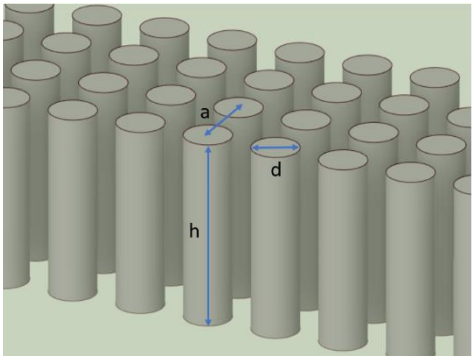


figuur 1: Schematische weergave van een fononisch kristal naast de rijbaan (Figuur uit Albino et al. (2019))

Een fononisch kristal (zie figuur 1) bestaat uit een aantal rijen en kolommen pilaren van materiaal dat wat betreft de 'trillings' eigenschappen sterk afwijkt van de omliggende bodem, Daardoor komt een trillingsreducerende werking tot stand. Het is een passieve oplossing. Er hoeft geen energie worden toegevoegd er zijn geen bewegende delen en de constructie bevindt zich buiten de spoorbaan, doch kan aangelegd worden binnen de zone van 25 meter naast de buitenste spoorstaaf. Daarnaast wordt een 100% biologische en 100% recyclebare oplossing beoogd, door de pilaren te produceren van biopolymeren met afbraaktrigger (patent MIS7 BV en PJ Milieu).

2.2 Theoretische achtergrond

Fononische kristallen bestaan uit regelmatige rijen en kolommen van inclusies (zie figuur 2 met buizen/cilinders als inclusies) gemaakt van een materiaal dat sterk afwijkt in stijfheid en/of dichtheid van het basismateriaal. Het werkingsprincipe van fononische kristallen is gebaseerd op Bragg diffractie en destructieve interferentie. Het frequentiegebied, waarin fononische kristallen werkzaam zijn, is afhankelijk van zowel de geometrische eigenschappen als de materiaaleigenschappen van de bodem en de inclusies. Een schematische weergave van een fononisch kristal is weergegeven in figuur 2 waarbij de inclusies de vorm van buizen/cilinders hebben. Met inclusie worden binnen deze context een verticale buis bedoeld, gevuld met lucht of water.



figuur 2: Schematische afbeelding van een fononisch kristal

De afhankelijkheden van de verschillende geometrische eigenschappen en materiaaleigenschappen kunnen in het algemeen kwalitatief als volgt worden omschreven:

- a **- Afstand van hartlijn tot hartlijn:**
  De afstand tussen de hartlijnen van de inclusies heeft invloed op het frequentiegebied waarin het fononisch kristal werkt. Hoe groter de afstand, hoe lager de frequenties die worden tegengehouden.
- d **– Afmeting of diameter en vorm van de inclusies/pilaren:**
  De diameter van de pilaren heeft invloed op de grootte van het frequentiegebied dat wordt tegengehouden (dit noemen we bandgap) en op de mate van reductie. Kort gezegd zorgt een grotere relatieve diameter, ten opzichte van afstand a, voor een grotere bandgap. Bij een te kleine relatieve diameter kan het gebeuren dat er helemaal geen bandgap is. Grotere diameter- buizen zorgen ook voor een grotere reductie van de trillingen.
- h **– Diepte van de buizen**
  De diepte van de buizen heeft vooral invloed op de mate van trillingsreductie die wordt bereikt door het fononisch kristal. Hoe dieper de inclusies, hoe effectiever de reductie.
- **Aantal rijen:**
  Hoe meer rijen er worden toegevoegd aan het fononisch kristal, hoe effectiever de trillingsreductie. In de literatuur is een experiment beschreven die bij vier rijen reeds een reductie van 10 dB laat zien bij de centrale frequentie.
- **Grondeigenschappen:**
  De grondeigenschappen hebben invloed op zowel de hoogte van de frequenties die worden tegengehouden als op de grootte van de bandgap. Hoe stijver de grond, hoe hoger de geluidssnelheid, en dus hoe groter de benodigde afstand a en diameter d om dezelfde frequenties tegen te houden.
- **Materiaal van de inclusies** (de feitelijke buizen):
  De materiaaleigenschappen van de inclusies hebben ook zowel invloed op de hoogte van de frequenties als de grootte van de bandgap. Een groter verschil in golfsnelheid tussen het materiaal van de inclusie en de omliggende grond geeft een grotere trillingsreductie.

3. Opzet van de praktijkproef

3.1 Doel praktijkproef

Het doel van de praktijkproef was:

- Het beschikbaar krijgen van informatie over de effecten en kosten van de voorgestelde RailTube bronmaatregel
- De validatie van de verwachtte gevoeligheid van de effectiviteit van de RailTube bronmaatregel voor variatie in het aantal toe te passen buizen.
- Tot een gevalideerd driedimensionaal eindige elementen model te komen dat in voldoende mate het in de werkelijkheid gemeten gedrag kan simuleren, zodat in toekomstige situaties, op basis van een model aangepast aan de daar onderhavige condities, de werking voorspeld kan worden.

3.1.1 Onderzoeksvraag

De hoofdonderzoeksvraag is:

- Kan het RailTube systeem ingezet worden om trillingen binnen de specifieke frequentieband van 25 Hz tot 40 Hz te dempen en wat is het trillingsreducerende effect binnen het hele frequentiegebied van 1 Hz tot 100 Hz.

Sub vragen zijn:

A. Welke maximale trillingsreductie in een gekozen frequentiegebied is haalbaar met een 4 x 4 fononisch kristal met een diepte van 5 meter bestaande uit een cluster van 3 buizen met ieder een doorsnede van 50 cm, waarbij de onderlinge afstand tussen de clusters via modelberekeningen is bepaald om trillingsreductie te geven in de beoogde frequentieband?

Hypothese 1: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 10 dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 4 Hz binnen het frequentiegebied van 25 Hz – 40 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

Hypothese 2: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 5dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 15 Hz binnen het frequentiegebied van 25 Hz – 40 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

Hypothese 3: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 2dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 75Hz binnen het frequentiegebied van 20 Hz – 100 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

B. Welke maximale trillingsreductie in een gekozen frequentiegebied is haalbaar met een 4 x 3 fononisch kristal t.o.v. een 4 x 4 fononisch kristal?

Hypothese 4: Bij een 4 x 3 fononisch kristal ten opzichte van een 4 x 4 fononisch kristal blijft de breedte van de beoogde frequentieband waarover trillingsreductie plaats vindt ongeveer gelijk de trillingsreductie over het hele gebied neemt echter met ca. 33% af.

C. Wat is de invloed van water i.p.v. lucht in de buizen van een fononisch kristal?

Hypothese 5: De trillingsreductie door een fononisch kristal bestaande uit met lucht gevulde buizen verschilt van een fononisch kristal met dezelfde omvang maar dan tot grondwaterniveau gevuld met water. De hypothese is dat het dempend effect afneemt. Analytische berekeningen of 2D-simulaties zijn niet toereikend om een voorspelling van de mate van afname van het dempend effect vooraf in te schatten.

D. Is de bio afbreekbare PLA geschikt om een buis te produceren van 5 meter lang een diameter van 50 cm en een wanddikte van 6 mm?

Hypothese 6: Het is mogelijk een bio afbreekbare buis van PLA te produceren met een doorsnede van 50 cm, een dikte van 6 mm en een lengte van 5 meter en die te plaatsen in een boorgat en daarna weer te verwijderen.

E. Is het fononisch kristal een kosteneffectieve oplossing voor het dempen van trillingen ten opzichte van reeds bestaande maatregelen uit de maatregelencatalogus van ProRail?

Hypothese 7: Het installeren van een fononisch kristal is qua kosten vergelijkbaar met bestaande maatregelen doch kan een grotere trillingsreductie bereiken op de meest storende frequenties ook in het lagere frequentiegebied (25 Hz).

4. Voorbereiding en uitvoering van de proeven

4.1 Definitieve keuze locatie praktijkproef

In overleg met ProRail gekozen de proef plaats te laten vinden op het terrein van MIS 7 zelf aan de Beilerstraat 7 9431 TA Westerbork. De locatie is weergegeven op foto 1.

Foto 1:Proeflocatie in Westerbork

4.2 Voorbereidende werkzaamheden en afsluitende werkzaamheden

4.2.1 Bodemonderzoek/sonderingen

Als input voor de modelberekeningen, is kennis van de samenstelling van de bodem ter plekke van de testlocatie noodzakelijk. Op de locatie zijn drie SCPT-sonderingen uitgevoerd door het bedrijf Fugro. De rapportage van Fugro (rapport 2423-241983 | 21-02-2024) is opgenomen in bijlage B. Opmerking daarbij is dat deze metingen geen gegevens bevat over de eerste 1,5 meter onder het maaiveld. In het model is daarom aangenomen dat deze grondlaag dezelfde eigenschappen heeft als de laag die als eerste is gemeten (na 1,5 meter) dit is in lijn met openbare gegevens van andere metingen in de provincie Drenthe. Daarnaast heeft bodemonderzoek plaats gevonden over de milieukundige samenstelling van de bodem. Verder is een klic melding verzorgd, zodat duidelijk is waar en welke kabels en leidingen zich bevinden, zodat schade wordt voorkomen bij het boren.

4.2.2 0-meting

Het RailTube systeem heeft als karakteristiek dat het ontworpen kan worden om een specifieke frequentieband te dempen (bandgap). Het is dan ook noodzakelijk te bepalen hoe de frequentieafhankelijke demping van de grond op de testlocatie er uit ziet. Gezien het feit dat de gekozen locatie niet direct langs het spoor ligt, is gekozen voor een kunstmatige trillingsbron. Verder is bij de metingen zoveel mogelijk het door ProRail opgestelde Uniform Meetprotocol aangehouden. Voor de keuze van de kunstmatige trillingsbron is in overleg met ProRail gekeken naar rapportage van Dekra. Dekra heeft vastgesteld dat DIN SPEC 45673-3 (bijlage A) qua kunstmatige trillingsbron al heel goed beschrijft wat er nodig is om aan te sluiten bij het Uniform Meetprotocol. Op basis van deze DIN SPEC 45673-3 is er voor gekozen een valgewicht in te zetten als kunstmatige trillingsbron. Gedurende de loop van het project is het gebruik van deze kunstmatige trillingsbron zelfs opgenomen als optie in het Uniform Meetprotocol. Het bedrijf Movares heeft de metingen uitgevoerd en daarbij het valgewicht ingezet. De specificaties van het valgewicht zijn:

Foto 2: trlillingsbron Movares.

Valgewicht: Massa van 80 kg
Valhoogte: 2 m
Slagplaat: 0.3 x 0.3 meter

De 0-meting heeft plaatsgevonden op 15 april 2024. De resultaten van de meting is gerapporteerd door Movares in rapport D79-WGA-HS-RAP-25000262 versie 2.0.

4.2.3 Proefplaatsing

Na het verrichten van de 0-meting heeft tevens een eerste proefplaatsing van de bio afbreekbare PLA-buis plaatsgevonden om te bepalen of deze buis goed te plaatsen is Gebleken is dat de plaatsing volgens plan verliep, net als de verwijdering. Gemonitord is of opdrijving van de buizen plaats vond, maar dat was niet het geval. De toepassing van bentoniet prop met grindomstorting bleek voldoende te zijn om de buizen op hun plaats te houden.

Foto 3: uitvoering proefplaatsing en verwijdering (hier verwijdering)

4.2.3 Modelering ter bepaling omvang fononisch kristal

Op basis van de gegevens van de SCPT-sonderingen (tabel 1) is een analytische modelberekening gemaakt over de omvang van het fononisch kristal.

Gegevens SCPT-sonderingen (gemiddeld over de eerste 5 meter)		
Rho:	Massadichtheid	1888 kg/m^3
G:	schuifmodulus	9,94 . 10^7 Pa
Cs:	Snelheid schuif golven	227 m/s
Cr:	Snelheid Raleigh golven	196 m/s

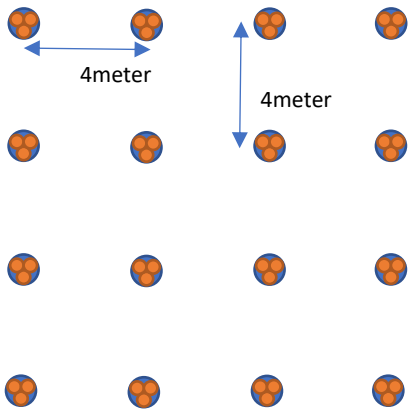
Tabel 1, SCPT gegevens

Uit deze analytische modelberekening en de resultaten van de nulmetingen van Movares kwamen de volgende opties voor de afstand a in meters tussen de buizenclusters en de gewenste frequentieband waarbij de trillingsreductie op moet treden:

a = 4,90 m Uitgaande van de SCPT data in de eerste 5 meter en een laagste frequentie in de bandgap van 20Hz

a = 3,92 m Uitgaande van de SCPT data in de eerste 5 meter en een laagste frequentie in de bandgap van 25Hz

Op basis van deze berekeningen is in overleg met ProRail is besloten een afstand a van 4.00 meter aan te houden voor de afstand tussen de buizenclusters. Dit ook om er voor te zorgen dat het meetpunt op 25 meter van de bron precies buiten het fononisch kristal valt. De buizenclusters zelf bestaan uit een configuratie van 3 buizen met een doorsnede van 50 cm en een diepte van 5 meter. De keuze om gebruik te maken van een buizencluster van 3 buizen in plaats van een enkele buis van kunststof met een doorsnede van 100 cm werd ingegeven door het feit dat de laatste een redelijk uitzonderlijke maat is voor kunststof en daardoor aanmerkelijk duurder dan 3 standaard kunststofbuizen met een doorsnede van 50 cm. Om de clusters te plaatsen wordt een boorgat gemaakt met een doorsnede van 1,00 meter. Om opdrijven van de buizen te voorkomen als gevolg van de opwaartse druk van het grondwater is de ruimte rondom en tussen de buizen opgevuld met bentoniet. De configuratie is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Schematisch RailTube configuratie

4.2.5 Productie buizen

De bio afbreekbare PLA buis is uiteindelijk geproduceerd met een 3D printer. Dit heeft plaatsgevonden in Heerenveen. Deze buis heeft eenzelfde wanddikte als de overige PVC buizen: 12 mm. De overige buizen zijn gebruikte PVC buizen met een lengte van 5 m, een diameter van 500 mm en een wanddikte van 12mm.

Foto 4: printen van de biopolymerenbuis (PLA)

4.2.6 Aanleg Fononisch Kristal

Op foto 5 (start eerste cluster) en foto 6 (start aanleg 4e rij van clusters) is de aanleg van RailTube weergegeven. Tijdens de aanleg is gebleken dat het lastig was drie buizen in een cluster met elkaar te verbinden. Getracht is de drie buizen binnen het cluster zoveel mogelijk tegen elkaar aan te plaatsen. Omdat deksels zijn gebruikt om de onderzijde af te dichten, kon niet voorkomen worden dat de buizen op enkele centimeters van elkaar geplaatst moesten worden. Tijdens de aanleg bleek ook dat een cluster van drie buizen moeilijk te richten waren in het boorgat. Niet helemaal voorkomen kon worden dat de buizen zich enigszins verdraaiden t.o.v. een loodlijn. De ruimte om de buizen in het boorgat is omstort

Foto 5: start aanleg RailTube 1e cluster

Foto 6: Aanleg 4e rij van clusters

met bentoniet en grind, wat goed verliep. Tijdens het inhijsen zijn de buizen met water gevuld, zodat de buizen niet opdreven na plaatsing in het met boorspoeling gevulde boorgat. Tijdens het boren, bleken zich stenen in de bodem te bevinden, wat de voortgang van de aanleg niet ten goede kwam. Hierdoor kon een enkele cluster van buizen niet op de gewenste diepte van 5m aangebracht (circa 30cm twee stuks). Ter plaatse van de laatste cluster, is de buis van biopolymeren geplaatst. Dit is weergegeven op foto 7, waarbij de witte buis (linker van de drie) de biopolymeren buis is en de anderen de PVC buizen.

Foto 7: Aanleg laatste cluster met de biopolymerenbuis

4.3 Uitvoering van de proeven

Na de nulmeting zijn in overleg met ProRail drie proeven uitgevoerd. Eén met een met lucht gevuld fononisch kristal van 3 x 4 clusters, één met een met lucht gevuld fononisch kristal van 4 x 4 clusters en één met water gevuld fononisch kristal van 4 x 4 clusters. In onderstaande foto is een bovenaanzicht gegeven van de meetlocatie.

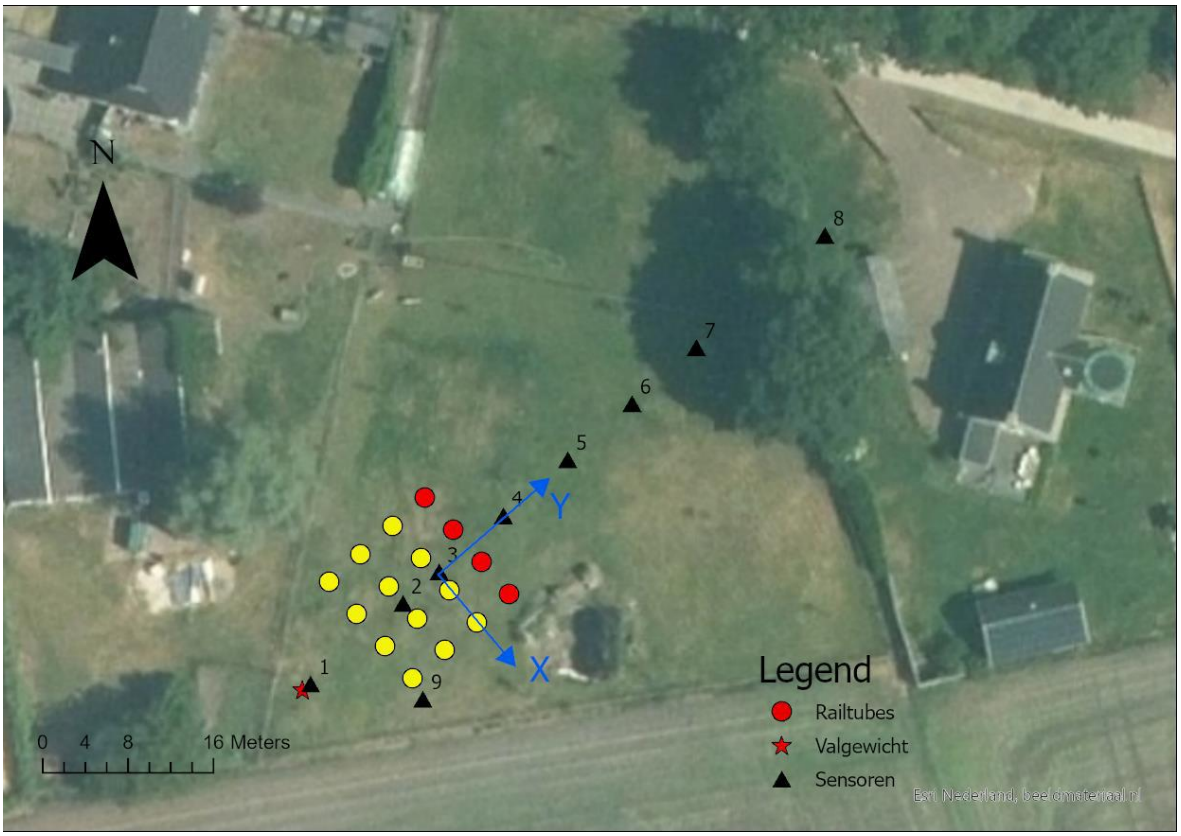


Foto 8: Luchtfoto van de locatie met de positionering van de clusters (gele en rode bollen) en de sensoren (zwarte driehoeken)
Geel is het 4x3 grid geel + rood is de extra rij voor het 4x4 grid

De gebruikte meetopstelling zag er als volgt uit:

- 1 sensor op het valgewicht voor de bepaling van het bronsignaal (shock accelerometer), positie 1 in foto 8
- 1 referentiesensor op maaiveld op 1 meter afstand van het valgewicht, positie 1 in foto 8
- 1 meetpunt in het midden van het 4x3 grid, op 12.5 meter afstand van het valgewicht, positie 2 in foto 8
- 1 meetpunt in het grid op 17 meter van het valgewicht, positie 3 in foto 8
- Een meetraai van 5 sensoren (8, 16, 24, 32 en 48 meter van de sensor op 17 meter van het valgewicht)
    - Posities 4 tot en met 8 in foto 8
- 1 referentiesensor op maaiveld op 11.3 meter afstand van het valgewicht, positie 9 in foto 8

De gevolgde werkwijze is in detail door de uitvoerende partij Movares beschreven in hoofdstuk 3 van bijlage B.

4.3.1 Proef 1, kristalrooster 4 x 3 met clusters van 3 buizen gevuld met lucht

Na de proefplaatsing, zijn drie rijen clusters (inclusies) van 3 buizen geplaatst (geel in foto 8). Op 12 juli 2024 heeft deze proef plaatsgevonden.

4.3.2 Proef 2, kristalrooster 4 x 4 met clusters van 3 buizen gevuld met water

Deze proef heeft op 4 december 2024 plaatsgevonden.

4.3.3 Proef 3, kristalrooster 4 x 4 met clusters van 3 buizen gevuld met lucht

Deze proef heeft op 3 december 2024 plaatsgevonden.

4.4 Einde proef vrijmaken testlocatie

Op … 2025 zijn de buizen verwijderd en de gaten weer opgevuld met de grond vrijgekomen bij de boringen.

5. Resultaten van de proeven

De meetresultaten van de proeven zijn vastgelegd in de rapportage van MOVARES D79-WGA-HS-RAP-25000262 versie 2.0 (bijlage B). In de volgende paragrafen worden deze kort besproken. Waarbij aangetekend moet worden dat TNO de meetresultaten ook geanalyseerd heeft, waarbij voor de correcties op het afwijkend gedrag van het

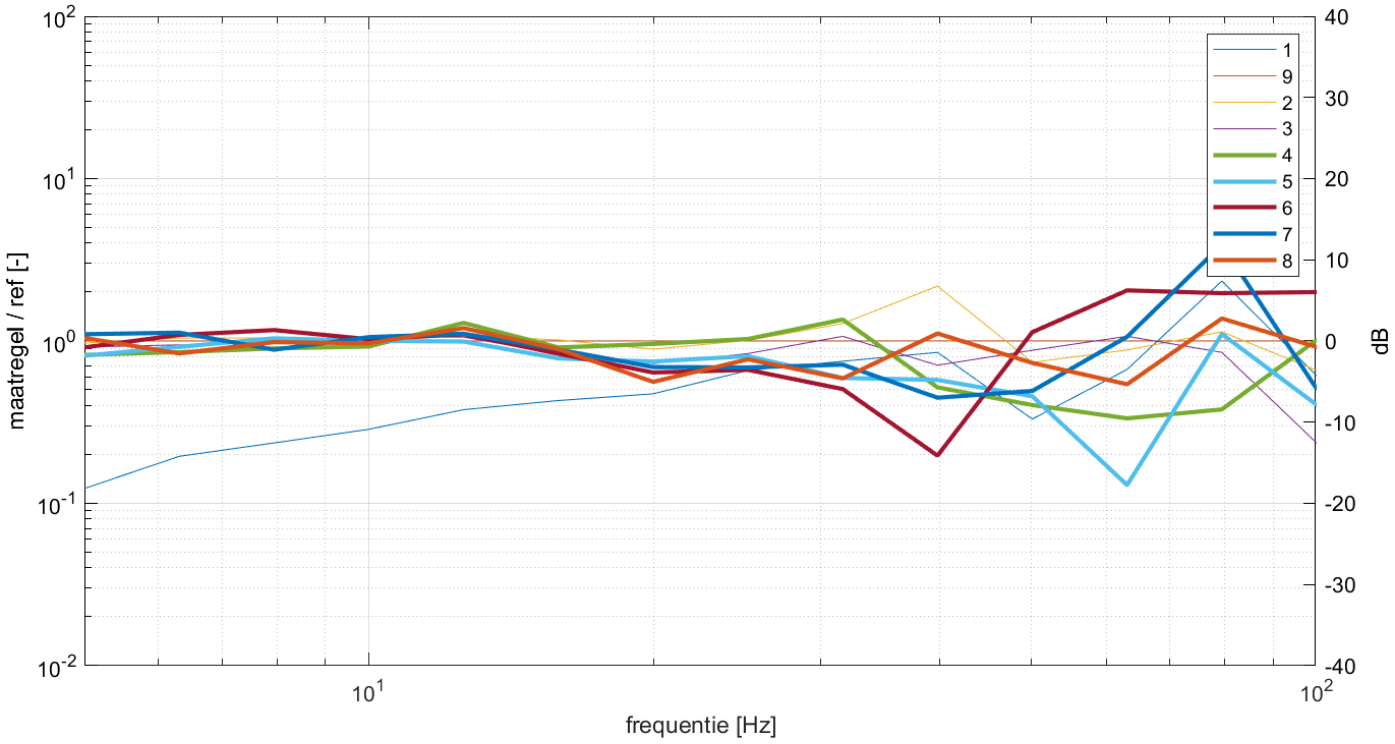
valgewicht tussen de verschillende metingen gebruik gemaakt is van de data van de versnellingsopnemer op het valgewicht om. Dit terwijl MOVARES de correctie uitgevoerd heeft op basis van de referentiesensor (sensor 9). De resultaten waren vrijwel gelijk, behalve in het gebied tussen de 16 Hz en 20 Hz. In de door MOVARES bewerkte data wordt het effect van de RailTubes zichtbaar vanaf 16 Hz. In de door TNO bewerkte data wordt het effect zichtbaar vanaf 20 Hz. In de conclusies over de effectiviteit van de RailTubes is er voor gekozen de conservatieve ondergrens van 20 Hz aan te houden.In de grafieken worden de resultaten per meetpunt per frequentieband weergegeven. De sensoren zijn genummerd zoals reeds boven beschreven:

Sensornummer	Beschrijving
1	referentiesensor op maaiveld op 1 meter afstand van het valgewicht
2	meetpunt in het midden van het 4x3 grid, op 12.5 meter afstand van het valgewicht
3	meetpunt in het grid op 17 meter van het valgewicht
4	meetpunt achter het grid op 25 meter van het valgewicht
5	meetpunt achter het grid op 33 meter van het valgewicht
6	meetpunt achter het grid op 41 meter van het valgewicht
7	meetpunt achter het grid op 49 meter van het valgewicht
8	meetpunt achter het grid op 65 meter van het valgewicht
9	referentiesensor op 11.3 meter afstand van het valgewicht, loodrecht op de meetraai

Tabel 2, Configuratie van de sensoren

5.1 Vergelijking 0-meting en 4x3 grid met lucht gevulde buizen

In onderstaande figuur zijn de meetresultaten van het 4x3 grid weergegeven:



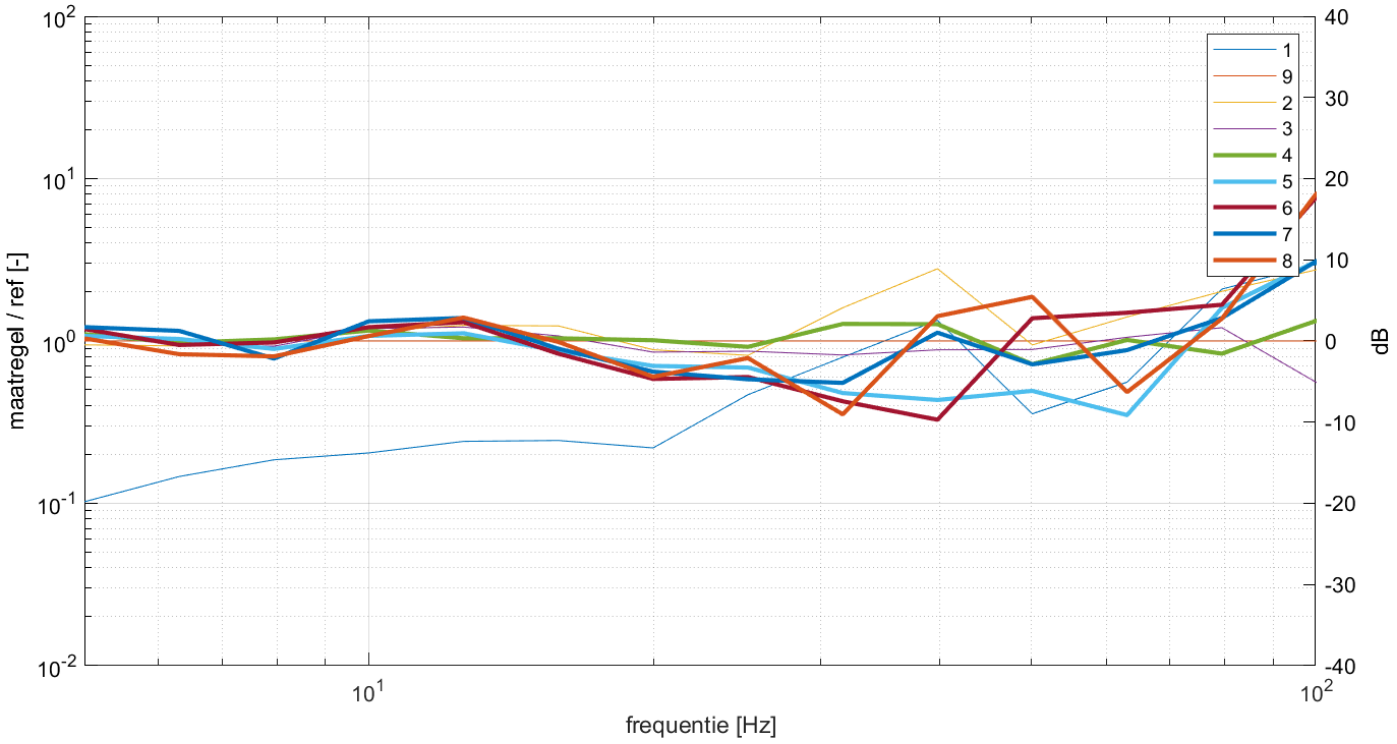
Figuur 4 Effectbepaling van Railtubes in nameting 1 (4x3 grid) voor verticale richting. De sensoren achter de Railtubes zijn dikgedrukt.

5.1.1 Interpretatie van de resultaten

De metingen van de sensoren binnen de matrix van RailTubes en die direct daarbuiten (2, 3 en 4) geven weinig of geen effect te zien van de Railtubes. De opvolgende metingen op 33 m, 41m, 49 m en 65 m geven tussen de 20 Hz en 32 Hz wel een effect te zien, tussen de 2 en 5 dB trillingsreductie.

5.2 Vergelijking 0-meting en 4x4 grid met lucht gevulde buizen

In de onderstaande figuur zijn de meetresultaten van het met lucht gevulde 4x4 grid weergegeven:



Figuur 5 Effectbepaling van Railtubes in nameting 3 (4x4 grid lucht gevuld) voor verticale richting. De sensoren achter de Railtubes zijn dikgedrukt

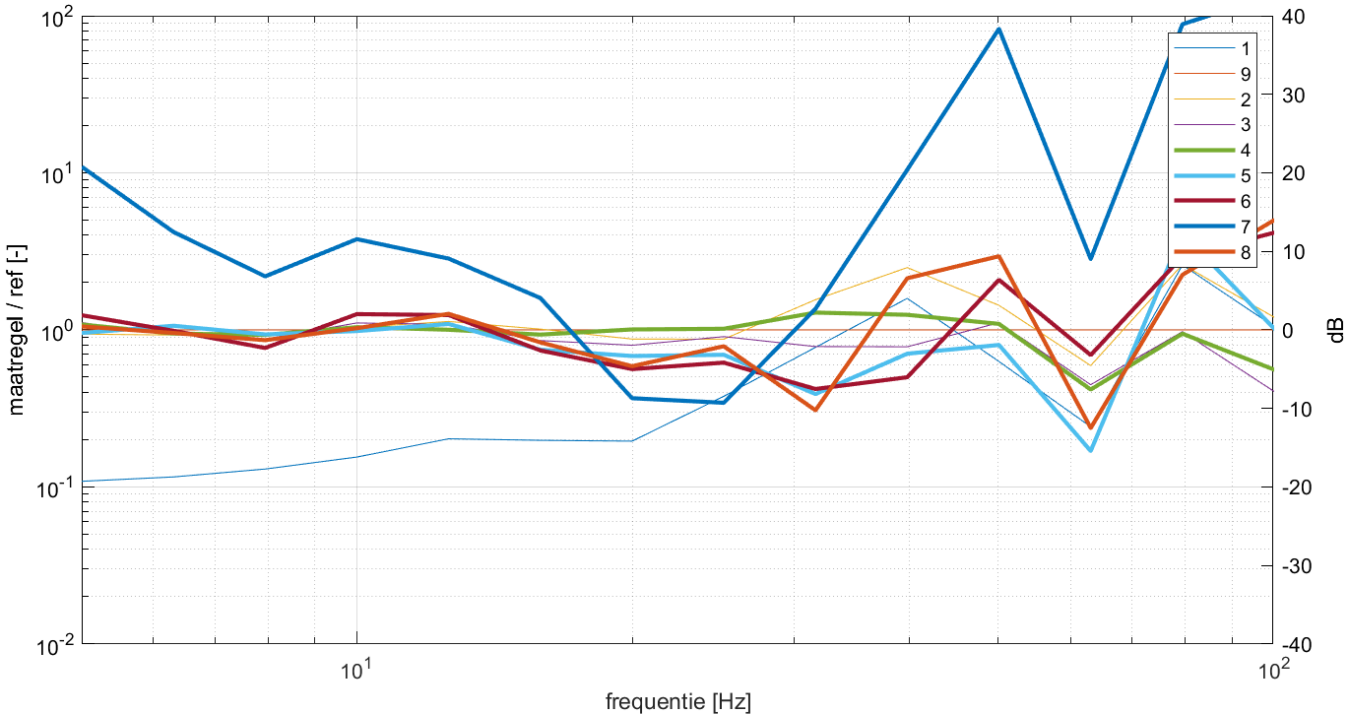
5.2.1 Interpretatie van de resultaten

De metingen van de sensoren binnen de matrix van RailTubes en die direct daarbuiten (12,5 m, 17 m en 25 m) geven weinig effect te zien van de Railtubes. De opvolgende metingen op 33 m, 41 m, 49 m en 65 m geven tussen de 20 Hz en 40 Hz wel een effect te zien. Met name tussen de 20 Hz en 32 Hz is de afname significant tot wel 10 dB.

De resultaten zijn in lijn met de resultaten van de 4 x 3 configuratie. Vanuit de theorie zou het midden van de bandgap gelijk moeten blijven en in dit geval lijkt die bij 25 Hz te liggen. De trillingsreducerende werking binnen de bandgap van 20 Hz tot 32 Hz is toegenomen. Bij de 4 x 3 configuratie loopt de reductie van 2 tot 5 dB en de 4 x 4 configuratie van 2 tot 10 dB, wat in overeenstemming is met de hypothese.

5.3 Vergelijking 0-meting en 4x4 grid met water gevulde buizen

In de onderstaande figuur zijn de meetresultaten van het met water gevulde 4x4 grid weergegeven:



Figuur 6 Effectbepaling van Railtubes in nameting 2 (4x4 grid water gevuld) voor verticale richting. De sensoren achter de Railtubes zijn dikgedrukt

Zoals duidelijk te zien is, was meetpunt 7 op 49 meter van het valgewicht verstoord en kan niet meegenomen worden.

5.3.1 Interpretatie van de resultaten

De metingen van de sensoren binnen de matrix van RailTubes en die direct daarbuiten (12,5 m, 17 m en 25 m) geven weinig effect te zien van de Railtubes.

De opvolgende metingen op 33 m, 41 m en 65 m geven tussen de 22 Hz en 40 Hz wel een effect te zien. Met name tussen de 20 Hz en 32 Hz is de afname significant tot wel 9 dB.

De resultaten zijn vergelijkbaar met de resultaten van de 4 x 4 configuratie met lucht gevuld. De reductie op de sensor 6 is iets afgenomen.

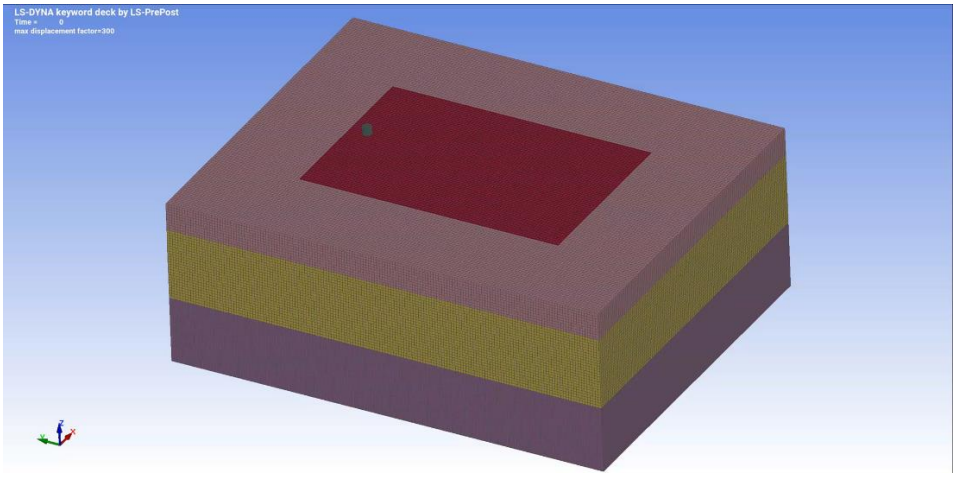
6. Eindige Elementen Modelering

Parallel aan het uitvoeren van de praktijkproef is gewerkt aan een driedimensionaal eindige elementen model van de proeflocatie. Het doel van dit model is het kunnen voorspellen van de effectiviteit van de maatregel, zodat op basis van modelberekeningen in andere praktijksituaties de juiste configuratie van de RailTubes kan worden berekend. Dit als verdere onderbouwing van de bestaande analytische en tweedimensionale modelberekeningen. De meetdata uit de proef is gebruikt om het model te valideren.

6.1 Bouw van het model

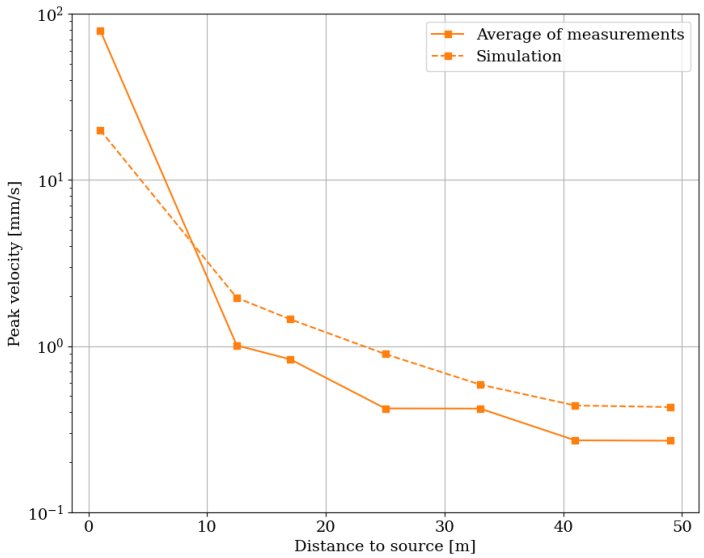
Het model is opgebouwd in de LS-DYNA modelering en simulatie omgeving. Bij de modelering is gebruik gemaakt van de SCPT metingen om het model op te bouwen en de 0-meting om het model te kalibreren.

Het resultaat is een model waarin in de ondergrond drie lagen zijn te onderscheiden met verschillende eigenschappen zoals ook terug te vinden in de SCPT metingen.



Figuur 7 Bodem opbouw van het Eindige Elementen Model

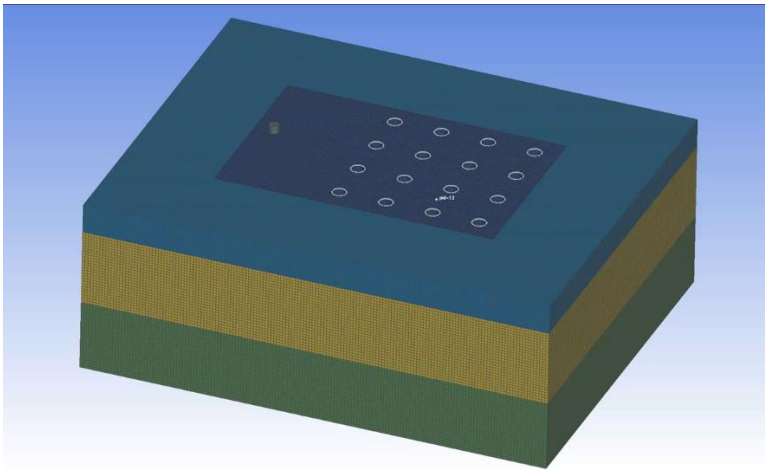
Naast de bodem is ook het valgewicht gemodelleerd om de resultaten van de simulatie te kunnen vergelijken met de 0-meting. Na verschillende iteraties is een model gecreëerd dat qua gedrag zich vergelijkbaar gedraagt als de resultaten van de 0-meting laten zien. In onderstaande figuur is de gemeten maximale snelheid in de meetpunten weergegeven van zowel de 0-meting, als het model:



Figuur 8: Vergelijking tussen simulatie en metingen wat betreft gemeten topsnelheid per sensor

Vervolgens is in het model het fononisch kristal aangebracht, in de vorm van PVC buizen met 100 cm doorsnede en een lengte van 5 meter. Deze buizen representeren het cluster van 3 buizen gebruikt in de proef. Hiervoor is gekozen, omdat het modeleren van het cluster van 3 buizen tot zeer kleine elementen zou leiden, waardoor de rekentijd van de simulatie op zou kunnen lopen tot weken. Verder zou theoretisch gezien de PVC buizen met 100 cm doorsnede iets betere resultaten moeten geven dan een cluster van 3 buizen met een doorsnede van 50 cm, omdat de effectieve luchtinhoud groter is en daarmee het contrast met de omgeving groter.

Het model komt er dan uit zien als in figuur 9:

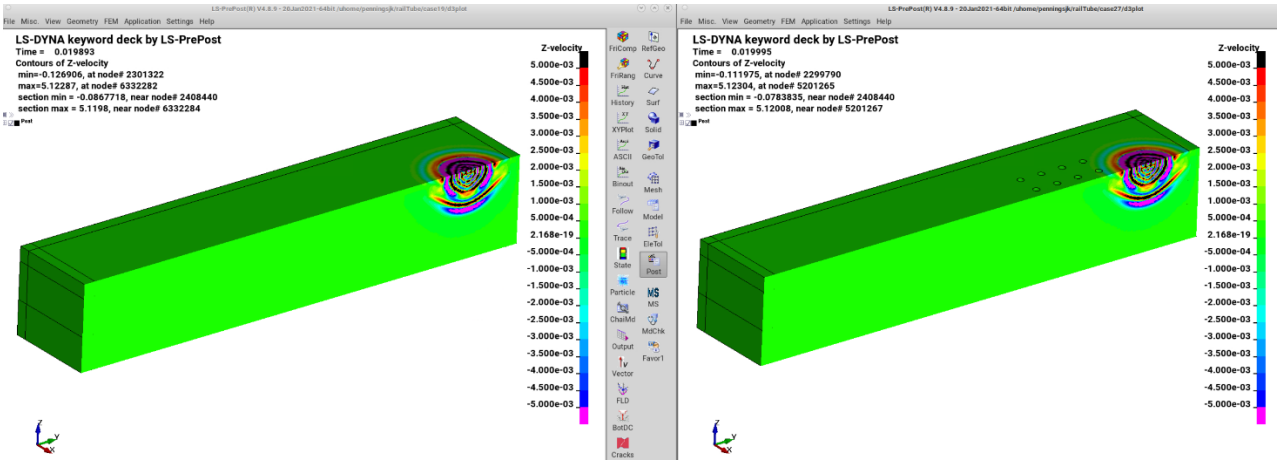


Figuur 9 Bodem opbouw van het Eindige Elementen Model met nu de inclusies aangebracht

6.2 Simulatie resultaten

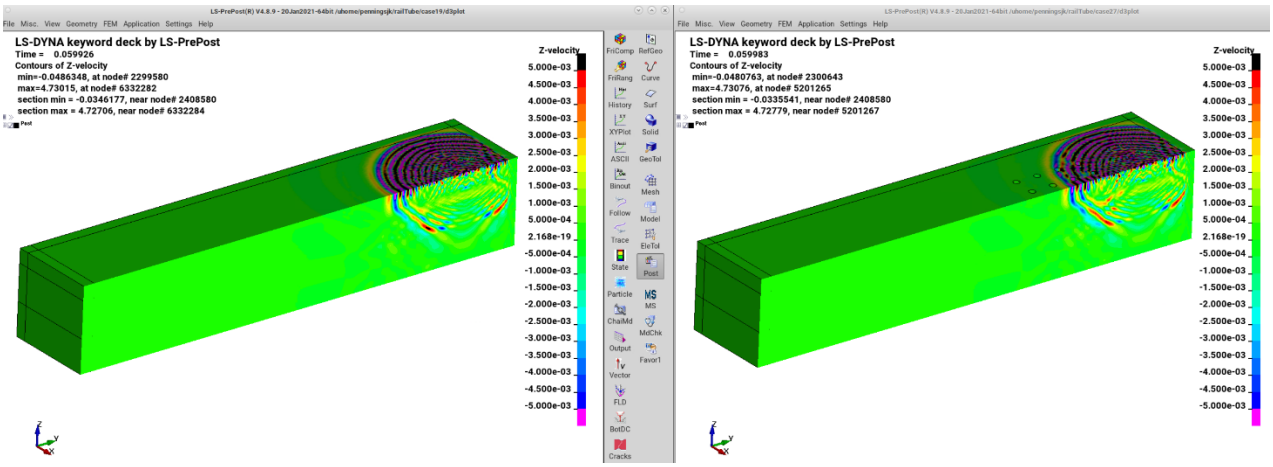
In onderstaande figuren zijn moment opnamen weergegeven in driedimensies van het gedrag van de bodem in een dwarsdoorsnede van de bodem door het midden van het fononisch kristal dat is ook de lijn waarop de sensoren geplaatst zijn. Het figuur links is de situaties zonder buizen, de figuur rechts met de buizen.

In het eerste figuur is de impact van het valgewicht te zien, circa 0,02 seconde nadat het de grond heeft geraakt:



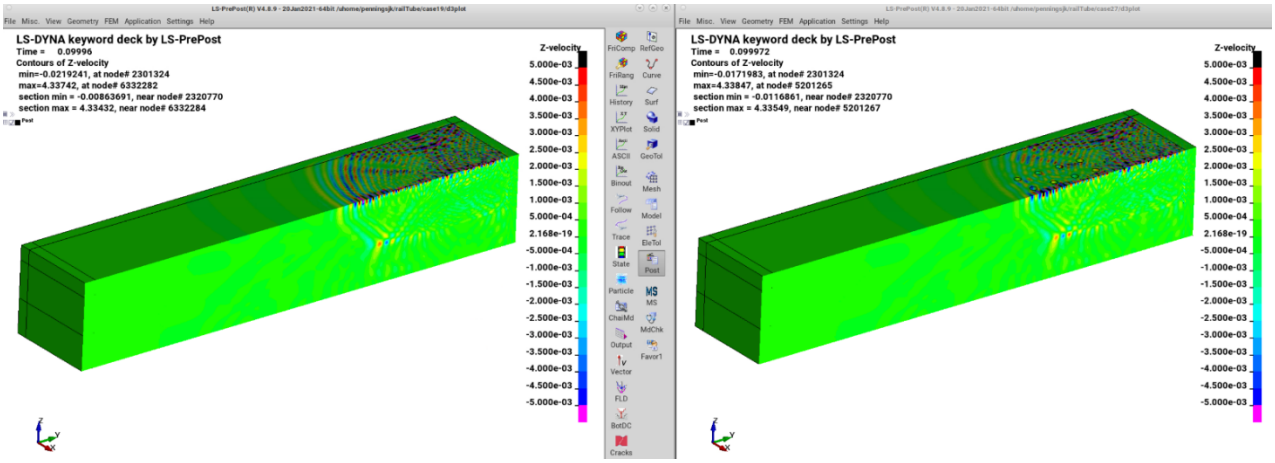
Figuur 10 Visualisatie van de simulatie na 0,02 seconde

Het tweede figuur na ca. 0,06 seconde is de propagatie te zien in het eerste deel van de RailTubes



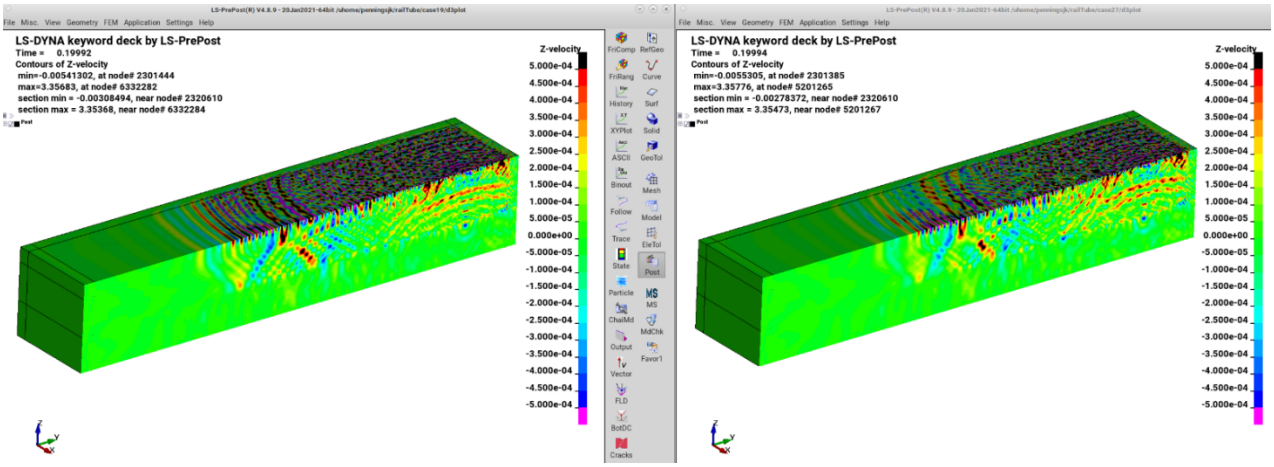
Figuur 11 Visualisatie van de simulatie na 0,06 seconde

De derde figuur na ca. 0,1 seconde het moment dat de eerste trillingen het gehele kristal net gepasseerd zijn



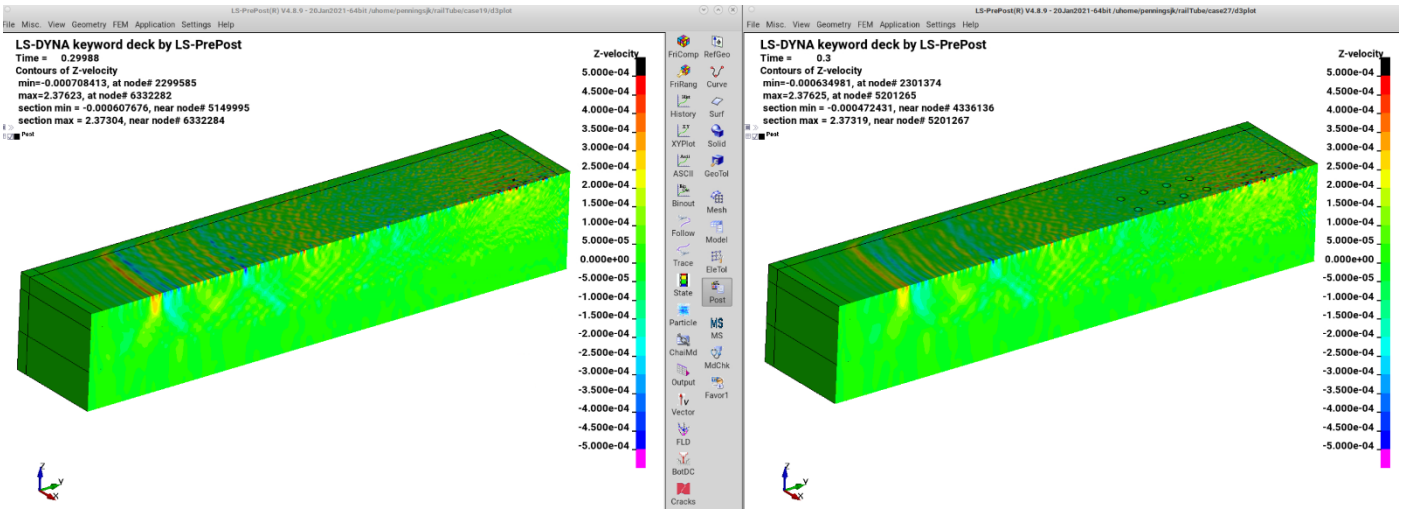
Figuur 12 Visualisatie van de simulatie na 0,1 seconde

De vierde figuur na ca. 0,2 seconden. De schaal is een orde verlaagd om de effecten zichtbaar te maken.



Figuur 13 Visualisatie van de simulatie na 0,2 seconde

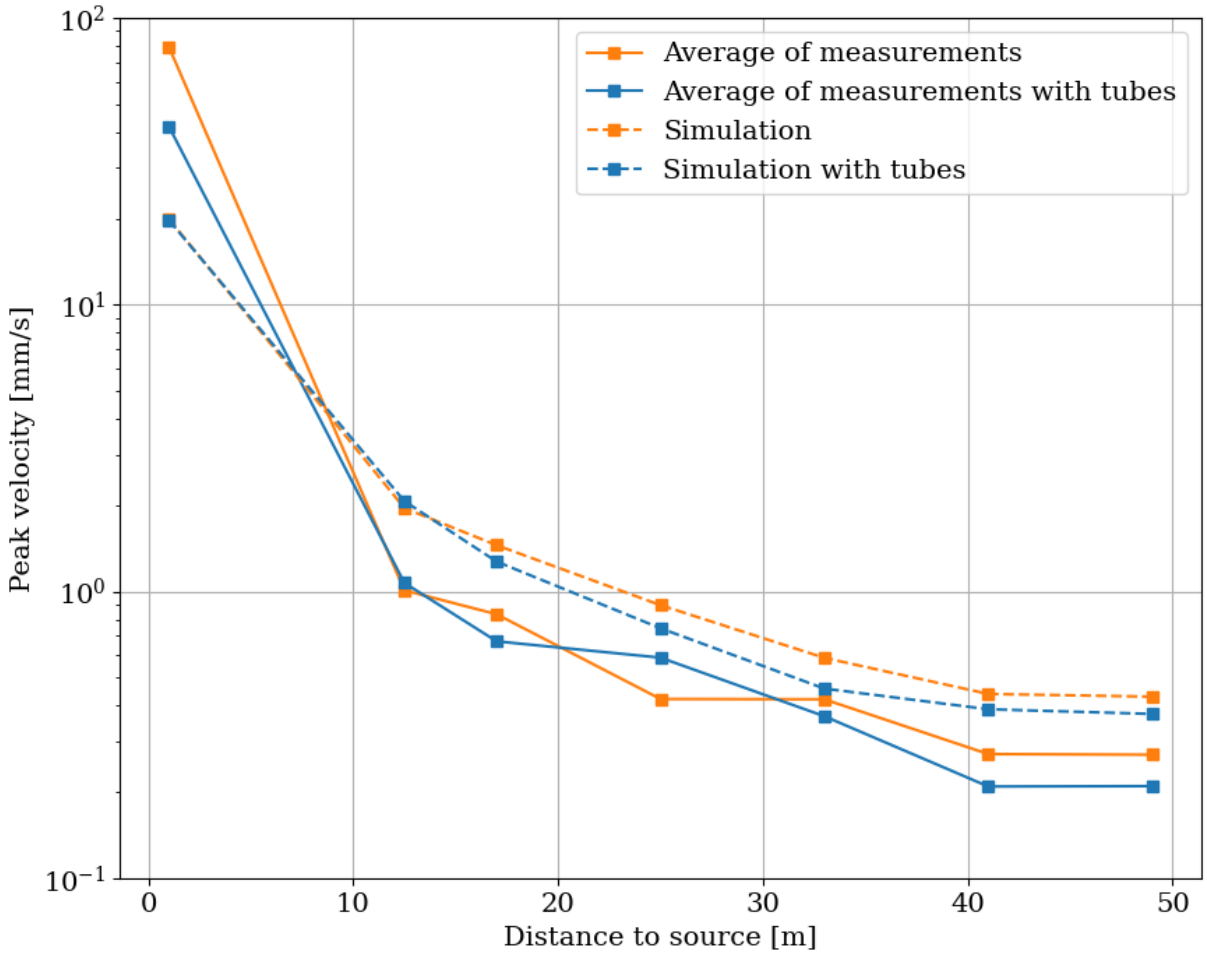
De vijfde figuur na circa 0,3 seconden, de schaal is het zelfde als in figuur 13.



Figuur 14 Visualisatie van de simulatie na 0,3 seconde

6.2.1 Vergelijking gemeten en gesimuleerde topsnelheden

Als we dan de gemeten tot snelheden van de 0-meting en de metingen met de 4 x 4 lege tubes vergelijken met de simulaties krijgen we het volgende beeld:

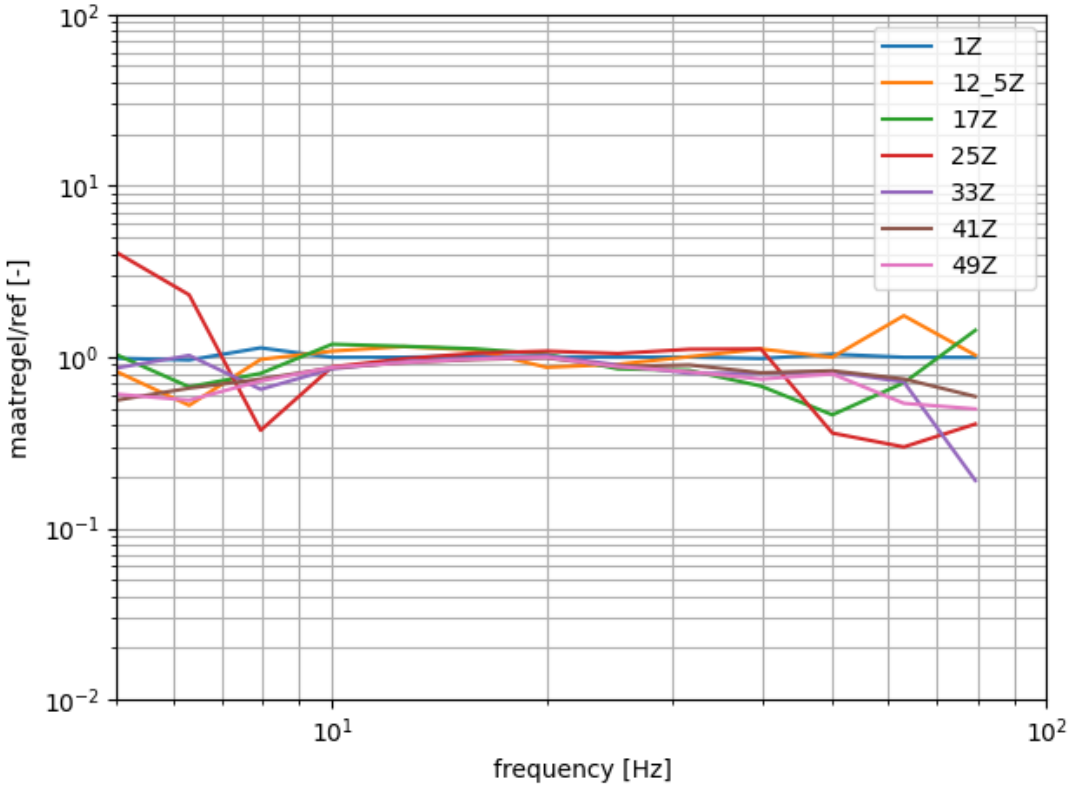


Figuur 15 Topsnelheid gemeten per sensor met en zonder tubes en de gesimuleerde resultaten

De simulaties geven net als de metingen (behalve het meetpunt op 25 meter, waar de meting met tubes een afwijkend gedrag vertoond) een reductie van de topsnelheid, waarbij de reductie iets kleiner is in de simulaties dan in de metingen.

6.2.2 Resultaten van de simulaties in het frequentiedomein

In onderstaande figuur is het resultaat van de simulaties met tubes afgezet tegen het resultaat van de simulaties zonder tubes op identieke wijze als in het Movares rapport de 0-meting is vergeleken met de meting met tubes:

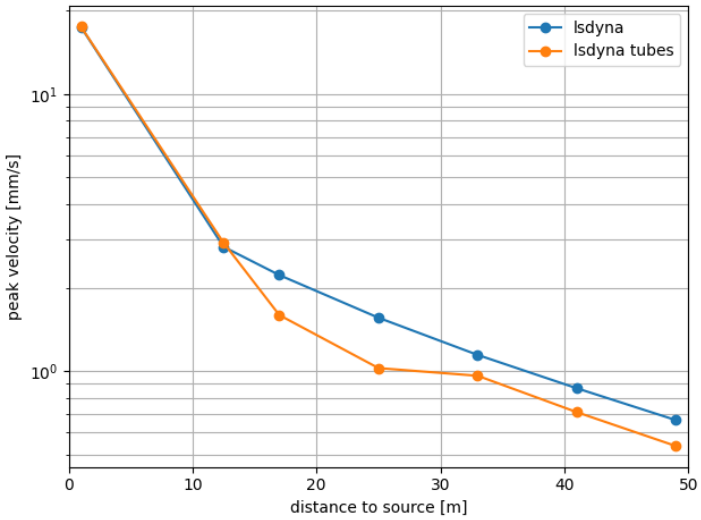


Figuur 16 Simulatie resultaten in het frequentiedomein

In het frequentiedomein sluiten de resultaten tussen de simulaties en de metingen niet goed aan. De simulaties geven wisselende effecten bij zeer lage frequenties en pas bij frequenties boven de 40 Hz daarnaast zijn de effecten klein met uitzondering van het meetpunt op 25 meter en het meetpunt op 33 meter bij 80 Hz. De effecten in het gebied van 20 Hz – 32 Hz, die zichtbaar zijn in de metingen van Movares worden niet berekend door deze eindige elementen methode.

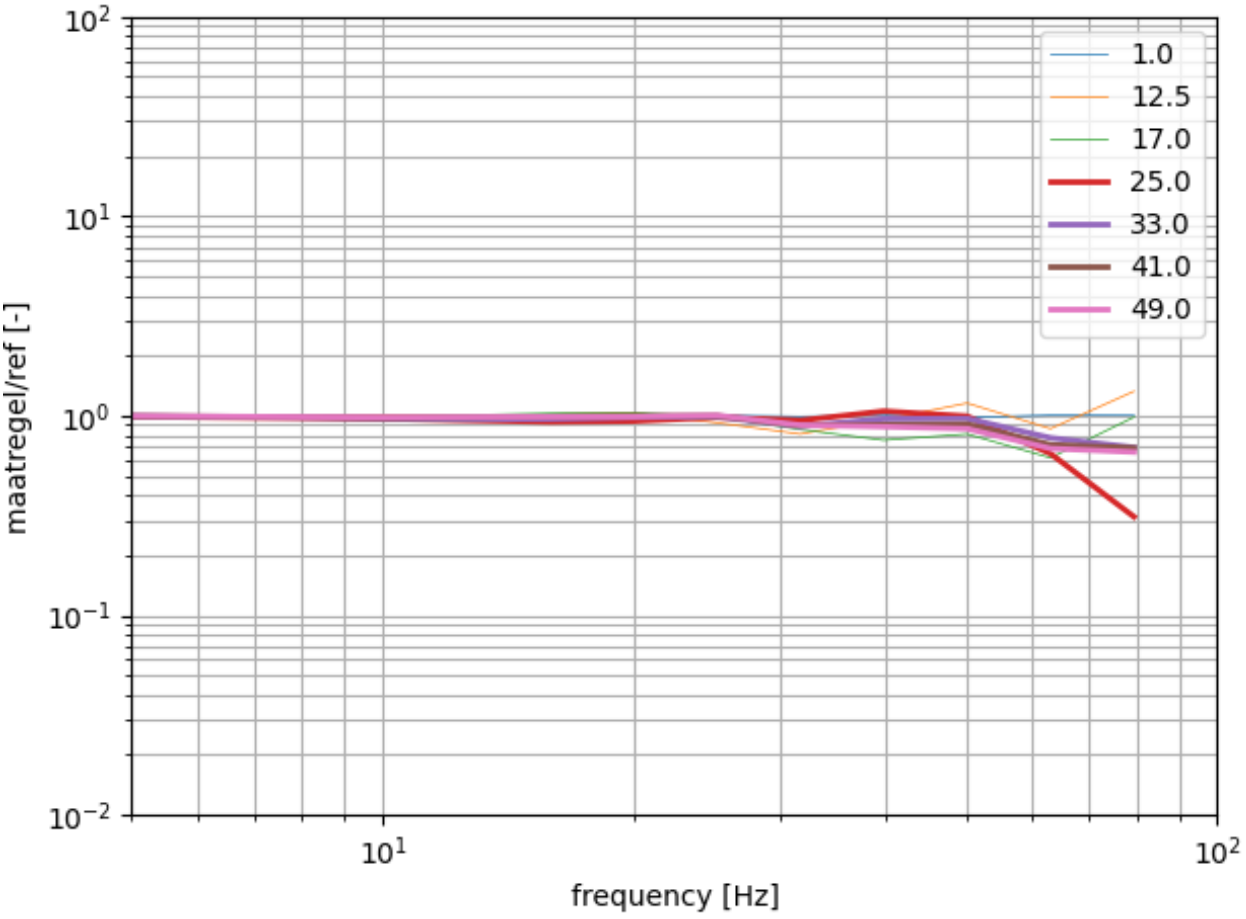
Eén van de mogelijke oorzaken van de resultaten in de simulaties zou de scherpe overgang van de verschillende grondlagen in het model kunnen zijn, die in werkelijkheid altijd geleidelijk verlopen. Daarom is ook een simulatie gedaan met een uniforme bodem met de eigenschappen van de toplaag van het model.

Het voorgaande geeft het volgende effect (blauw simulaties zonder tubes, oranje simulaties met tubes) in de topsnelheden als functie van de afstand (figuur 17), waarbij wederom een duidelijk effect te zien is in de topsnelheden in de simulatie met tubes.



Figuur 17 Berekende topsnelheden met uniforme bodem

In het frequentiedomein zijn de resultaten als volgt weergegeven in figuur 18:



Figuur 18 Simulatie resultaten in het frequentiedomein met uniforme bodem

Naast het model opgebouwd uit drie grondlagen, geven deze simulaties met een uniforme bodem ook pas effect te zien van de tubes boven een frequentie van 50 Hz en niet het effect in het gebied tussen 20 Hz en 32 Hz.

6.3 Discussie modelering

Op basis van de SCPT-meting en de 0-meting is een model gebouwd dat qua gedrag goed vergelijkbaar is met het gedrag zoals door Movares gemeten. De resultaten met de RailTube inclusies gemodelleerd laten echter geen effect zien zoals theoretisch verwacht en ook gemeten door Movares in het frequentiegebied rond de 25 Hz. Er is naar verschillende oorzaken gekeken, één daarvan waren de scherpe overgangen tussen de grondlagen in het model, terwijl dat in de werkelijkheid enigszins geleidelijk verloopt. Dit is onderzocht door de simulaties uit te voeren met een uniforme bodem structuur die gelijk is aan de gevonden toplaag. Ook dit model gaf geen reducties te zien in het verwachte frequentiegebied.

Een goede verklaring voor het verschil tussen de metingen en de simulaties is niet gevonden. Er zijn verschillen tussen het model en de praktijktest, zoals bijvoorbeeld het bentoniet dat gebruikt is rondom de buizen om opdrijving te voorkomen en het feit dat het aanleggen van de RailTubes inherent veranderingen in de bodemstructuur veroorzaakt. Echter juist in het ten opzichte van de praktijk enigszins geïdealiseerde model was de verwachting het effect van de RailTubes duidelijk zichtbaar te krijgen. Een alternatieve methode van modelering volgens de Bloch-Floquet analyse zou ook als validatie gebruikt kunnen worden, maar deze valt buiten de scope van deze praktijkproef.

7. Business case analyse

7.1 Kosten

Voor de business case kunnen we verschillende uitvoeringen benoemen en becijferen. De eerste -A- is de aanleg, zoals in de pilot is uitgevoerd: PVC buizen. De tweede -B- is een variatie van bio polymeren buizen. De derde -C- is de aanleg middels het intrillen van stalen buizen met een diameter van 1.120 cm en lengte van 550 cm. We gaan uit van de aanleg van minimaal vier inclusies in vier rijen. De kosten van verschillende varianten voor een puntbron zijn weergegeven in tabel 3.

Voor elke uitvoering A, B en C, kunnen we de volgende uitleg geven.

A

Dit is de variant die we bij de pilot hebben uitgevoerd. Het betreft een spoelboring, waarna geclusterde (drie stuks) PVC buizen in een boorgat worden gehesen. De kosten worden geraamd op € 190.000. Het nadeel van deze variant dat het geen 100% biologische variant is. Een ander nadeel is dat het gebruik maakt van drie geclusterde buizen wat de effectiviteit van het systeem niet ten goede komt. Wel is gebleken dat indien RailTube niet meer gebruikt hoeft te worden, dat de buizen getrokken kunnen worden. Dit betekent dat het hele systeem volledig te verwijderen is. Een betere mogelijkheid, is de toepassing van een buis van PVC met de diameter van 100cm en een lengte van zes meter, maar die zijn niet op de markt beschikbaar en zijn waarschijnlijk ook niet sterk genoeg om verticaal geplaatst te kunnen worden. Wanneer hiervoor gekozen wordt, moeten een speciale productie worden georganiseerd bij een productiebedrijf en dat is nagenoeg niet te organiseren. Een alternatief kan zijn de toepassing van GVB (Glasvezel Versterkte Buizen), wat geproduceerd kan worden bij een bedrijf, zoals FPI.

B

Dit is een variant op A, waarbij buizen van biopolymeren worden toegepast. In dit geval betreft het de biopolymeer PLA. Binnen deze variant zijn drie sub varianten onderzocht. De eerste is het gebruik van composteerbare PLA. De tweede variant is het gebruik van “virgin” PLA. De derde variant is het gebruik van gebruikte PLA wat ter recycling opnieuw tot een product kan worden omgezet. Het grote voordeel van deze variant t.o.v. variant A is dat het een volledige biologische oplossing biedt. De kosten van de aanleg van een dergelijke variant liggen tussen de € 260.000 en € 240.000 in. Het grote nadeel van deze variant is de kwetsbaarheid van het product. Gezien is bij de pilot dat de buizen snel scheuren en relatief makkelijk breken.

C

Een mogelijkheid is het intrillen van stalen buizen. We hebben buizen met een diameter van 1.120 mm genomen en een lengte van 5,5 meter voor de kostenberekening. De reden voor de afwijkende maat ten opzichte van de kunststof buizen, is dat deze maatvoering voorradig is en een standaard maat is in de funderingsmarkt. De kosten van een dergelijke toepassing worden geraamd op € 130.000. Omdat uit de pilot is gebleken het niet uit maakt of je met water of met lucht gevulde buizen toepast, komt de optie van deze variant in beeld. De uitvoering van de aanleg is veel eenvoudiger en sneller dan een spoelboring en daardoor goedkoper. Bij het intrillen wordt een buis in de bodem getrild met een trilblok en de grond in de buis vervolgens met een holle avegaar er uit gehaald. Onderin de buis wordt, om inspoeling van zand te voorkomen, beton toegevoegd. Deze moet niet geheel water afsluitend zijn, om opdrijven te voorkomen of er wordt bij de aanleg de buis gevuld met water. De toepassing van grind is ook een mogelijkheid. Door het gebruik van 1 buis met deze diameter, denken we ook dat de effectiviteit op de reductie van trillinghinder hoger zal zijn, dan het gebruik van drie gekoppelde buizen. Een andere aanleg methode zou ook een geschroefdpaalsysteem kunnen zijn met een paal punt. Deze hebben wij niet verder onderzocht op uitvoeringsmogelijkheden en kosten in het onderhavige rapport.

Op basis van bovenstaande kunnen we ook de kosten per meter berekenen bij een lijnbron. Dit is weergegeven in tabel 4. Omdat elke project zo haar eigen vaste kosten heeft, zijn deze kosten separaat weergegeven. Deze kosten zijn per variant gelijk gesteld op circa € 75.000. De meeste kritische factor in deze zijnde gegevens van de locatie zelf: is het makkelijk bereikbaar, is er sprake van verontreinigde grond en zijn er kabels en leidingen aanwezig? De kosten per m zullen afnemen, omdat nu in de kosten per m ook de overhead kosten van de aannemer in mee zijn genomen, zoals transport en projectvoorbereiding.

	A1	B1	B2	B3	C
	16 inclusies spoelboring met 48 stuks gebruikte PVC buizen diameter 50cm lengte 500cm	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm COMPOSTEERBAAR	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm VIRGING PLA	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm RECYLED PLA	16 inclusies intrillen 16 stalen buizen diameter 1016 / 1120cm lengte 550/600cm
Vaste kosten per project tot 1.000m	75	75	75	75	75
Variabel kosten in 1.000 € per m (> 12m spoor)	9,5	15	14	13	2,1-4,5(*)

*Tabel 3: kosten per m spoor. * de variatie in diameter, lengte en prijs komt vanwege meerdere prijsopgaves van aannemers.*

Wanneer we een multi criteria analyse uitvoeren, komen we tot de volgende tabel (tabel 4):

	A1	B1	B2	B3	C
	16 inclusies spoelboring met 48 stuks gebruikte PVC buizen diameter 50cm lengte 500cm	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm COMPOSTEERBAAR	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm VIRGING PLA	16 inclusies spoelboring met 48 stuks biopolymeren buizen PLA diameter 50cm lengte 500cm RECYLED PLA	16 inclusies intrillen 16 stalen buizen diameter 1016 / 1120cm lengte 550/600cm
uitvoeringsduur	+	-	-	-	++
duurzaamheid	+	++	+	+	++
overlast omgeving	-	-	-	-	+
beschikbaarheid buizen	+-	-	-	-	+
effectiviteit	+	+	+	+	++
kosten	+	-	-	-	++

Tabel 4: Multi criteria analyse

Uit de tabel blijkt dat bij de toepassing van stalen buizen het beste alternatief is. De stalen buizen kunnen namelijk na gebruik weer hergebruikt worden, wat het een zeer goed alternatief biedt ten opzichte van de biopolymeren buizen. Wanneer we kijken naar de kosten en bovenal de effectiviteit, dat scoort deze variant verreweg het beste. Door bovendien de toepassing van de bovenmaatse maat van 1.016 tot 1.120 cm en een iets langere lengte, denken we ook dat de effectiviteit van de reductie van trillingen nog meer ten goede komt.

8. Conclusies en aanbevelingen

De proef was opgezet ter toetsing van de hypotheses zoals beschreven in paragraaf 3.1.1 en ter validatie van het rekenmodel. Hieronder de toetsing van de hypotheses:

A. Welke maximale trillingsreductie in een gekozen frequentiegebied is haalbaar met een 4 x 4 fononisch kristal met een diepte van 5 meter bestaande uit een cluster van 3 buizen met ieder een doorsnede van 50 cm, waarbij de onderlinge afstand tussen de clusters via modelberekeningen is bepaald om trillingsreductie te geven in de beoogde frequentieband?

Hypothese 1: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 10 dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 4 Hz binnen het frequentiegebied van 25 Hz – 40 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

Antwoord: Gedeeltelijk, bij 32 Hz wordt op de sensor op 65 meter een reductie van meer dan 10 dB bereikt.

Hypothese 2: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 5dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 15 Hz binnen het frequentiegebied van 25 Hz – 40 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

Antwoord: Gedeeltelijk, er is een bandgap waargenomen tussen de 20 Hz en 32 Hz de trillingsreductie verloopt echter tussen de 2dB en 10dB

Hypothese 3: In een zandgrond bodem is een trillingsreductie van > 2dB mogelijk over een frequentieband met een breedte van 75Hz binnen het frequentiegebied van 20 Hz – 100 Hz te behalen door een 4 x 4 fononisch kristal geplaatst met een diepte van 5 meter en bestaande uit drie geclusterde buizen met ieder een doorsnede van 500 mm.

Antwoord: nee er zijn frequenties waarbij geen trillingsreductie optreedt

B. Welke maximale trillingsreductie in een gekozen frequentiegebied is haalbaar met een 4 x 3 fononisch kristal t.o.v. een 4 x 4 fononisch kristal?

Hypothese 4: Bij een 4 x 3 fononisch kristal ten opzichte van een 4 x 4 fononisch kristal blijft de breedte van de beoogde frequentieband, waarover trillingsreductie plaats vindt ongeveer gelijk de trillingsreductie over het hele gebied neemt echter met ca. 33% af.

Antwoord: ja, de bandgap is vergelijkbaar met de 4 x 4 configuratie, de trillingsreductie is 2dB tot 5dB ten opzichte van 2dB – 10dB in de 4x4 configuratie

C. Wat is de invloed van water i.p.v. lucht in de buizen van een fononisch kristal?

Hypothese 5: De trillingsreductie door een fononisch kristal bestaande uit met lucht gevulde buizen verschilt van een fononisch kristal met dezelfde omvang maar dan tot grondwaterniveau gevuld met water. De hypothese is dat het dempend effect afneemt. Analytische berekeningen of 2D-simulaties zijn niet toereikend om een voorspelling van de mate van afname van het dempend effect vooraf in te schatten.

Antwoord: Ja het dempende effect neemt iets af, maar is vergelijkbaar (2dB-9dB) met lucht gevulde buizen (2dB-10dB)

D. Is de bio afbreekbare PLA geschikt om een buis te produceren van 5 meter lang een diameter van 50 cm en een wanddikte van 6 mm?

Hypothese 6: Het is mogelijk een bio afbreekbare buis van PLA te produceren met een doorsnede van 50 cm, een dikte van 6 mm en een lengte van 5 meter en die te plaatsen in een boorgat en daarna weer te verwijderen.

Antwoord: Ja, de buis is echter kwetsbaarder dan de PVC buizen

E. Is het fononisch kristal een kosteneffectieve oplossing voor het dempen van trillingen ten opzichte van reeds bestaande maatregelen uit de maatregelencatalogus van ProRail?

Hypothese 7: Het installeren van een fononisch kristal is qua kosten vergelijkbaar met bestaande maatregelen doch kan een grotere trillingsreductie bereiken op de meest storende frequenties ook in het lagere frequentiegebied (25 Hz).

Antwoord: We hebben geen informatie over de kosten van andere maatregelen, dus kan hierop geen antwoord worden gegeven. Wel kunnen we aangeven dat de maatregel volgens de metingen werkt, alhoewel het simulatiemodel dat niet kan bevestigen.

Op dit moment kan het model niet gebruikt worden om de werking te voorspellen op andere locaties.

8.1 Effectiviteit maatregel

De resultaten van de metingen aan het 4 x 4 grid laten zien dat de maatregel effect heeft in het frequentiegebied tussen 20 Hz en 32 Hz in dit gebied varieert de trillingsreductie van 2 dB tot 10dB. De maatregel was, uitgaande van de gemiddelde grondeigenschappen in de eerste 5 meter, berekend om een effect te hebben in het gebied van 25 Hz tot 40 Hz. Het effect is echter te zien in het gebied van 20 Hz tot 32 Hz. Voor het effectief inzetten van de maatregel is het belangrijk dat de werking voorspelbaar is.

8.2 Validatie van het rekenmodel

Binnen het kader van dit project is het niet gelukt het rekenmodel, waarin de RailTubes gemodelleerd waren, te valideren met de voorhanden meetresultaten uit de praktijk, dit terwijl het rekenmodel van de situatie van de 0-meting wel in voldoende mate gevalideerd kon worden. Het model is meermalen gecheckt en gecorrigeerd voor aliasing en zogenaamde hourglassing effecten. Een goede verklaring is op dit moment niet voorhanden. Mogelijk heeft dit te maken met de sterke verstoring van de bodem door het aanbrengen van de buizen, het boren van het gat en het aanbrengen van het bentoniet ter borging van de buizen, dit moet echter beter onderzocht worden.

8.3 Conclusie

Het trillingsreducerende effect van de RailTube concept in de praktijk sluit kwalitatief aan bij wat het analytische model voorspelt. De gevonden bandgap loopt van 20 Hz tot 32 Hz, bij een verwachte bandgap van 25 Hz tot 40 Hz. De metingen konden in het kader van dit project niet onderbouwd worden met de resultaten van een simulatie aan de hand van een 3D eindige elementen model. Mogelijk heeft dit te maken met de sterke verstoring van de bodem door het aanbrengen van de buizen, het boren van het gat en het aanbrengen van het bentoniet ter borging van de buizen, dit moet echter beter onderzocht worden. Ten aanzien van de business case kan worden geconcludeerd dat de uitvoering van het intrillen van stalen buizen m.b.t. duurzaamheid, technisch uitvoerbaarheid, risico's en kosten de beste variant is. De uitvoeringskosten van een dergelijke methode worden geraamd op 75k aan vast kosten tot 1.000 m spoor en een variabel post van 2,1k tot 4,3k per m spoor. De methode kent ook een nadeel t.a.v andere trilling dempende maatregelen, het heeft relatief veel ruimte nodig. Anderzijds heeft het ook een groot voordeel. RailTube hoeft niet in de spoorzone te worden aangelegd en kan buiten die zone worden geïnstalleerd wat de voorbereiding en uitvoering een stuk eenvoudiger maakt en dus ook goedkoper.

8.4 Aanbevelingen

De aanbeveling is om te onderzoeken of het haalbaar is om alsnog te komen tot een model dat de situatie tijdens de proef zo goed mogelijk benaderd en zo ja dit model te bouwen en na te gaan of de resultaten daarvan wel bruikbaar zijn om de effectiviteit van RailTubes te voorspellen. Dit, omdat de meetresultaten die de praktijk laat zien bemoedigend zijn om te komen tot een gerichte en effectieve maatregel in het frequentiegebied rond 20 Hz. TNO ziet nog een mogelijkheid van een andere vorm van modellering. We stellen dan ook voor, gezien de potentie van het systeem, een aanvullend project uit te voeren, waarbij dat aanvullende model wordt gebouwd in combinatie met de aanleg van een vergelijkbaar fononisch kristal, maar dan van het intrillen van 16 (grid van 4x4) stalen buizen in combinatie met een meetprogramma. De kosten hiervan worden geraamd tussen 100k en 150k.

Bijlage A, Rapportage Geotechnisch onderzoek Fugro

Innovatieproject Prorail aan de Beilerstraat 7 te Westerbork

Rapportage geotechnisch onderzoek | Westerbork

2423-241983 | 21-02-2024
Definitief
MIS7 B.V.

Bijlage B, Rapportage metingen Movares

movares smart urban engineering

Rapport

Railtube

Metingen met valgewicht

Versie: 2.0
Status: Vrijgegeven
Datum: 14-03-2025
Kenmerk: D79-WGA-HS-RAP-25000262