ARCADIS

KAMPA Innovative railparts

WEBOOST

Fase 2 van de SBIR Infra innovaties spoortrillingen

MODULAIRE METABARRIER

EINDRAPPORTAGE PRAKTIJKPROEF

Status | Definitief
Datum | 7 juli 2025

INHOUDSOPGAVE

Management samenvatting **1**

Management Summary *4*

1. De MetaBarrier en SBIR **7**

1.1 Het concept van de modulaire MetaBarrier *7*

1.2 Aanleiding SBIR *8*

2. Onderzoek **10**

2.1 Doelen en onderzoeksvragen binnen de praktijkproef *10*

2.2 Aanpak praktijkproef op hoofdlijn *10*

2.3 Betrokken partijen *10*

3. Locatiebepaling **11**

3.1 Voorproef *11*

3.2 Praktijkproef *12*

4. Voorproef **16**

4.1 Aanpak *16*

4.2 Verloop van de voorproef *16*

4.3 Uitkomsten en bevindingen *19*

4.4 Trillingsmetingen voorproef *20*

4.5 Metingen spoorligging *20*

5. Praktijkproef **22**

5.1 Aanpak *22*

5.2 Uitkomsten *23*

5.3 Resultaten *27*

5.4 Extra stap: STEM modellering *28*

5.5 Spoorligging en baanlichaam *40*

6. Evaluatie resultaten **43**

6.1 Beantwoording van de drie onderzoeksvragen *43*

Onderzoeksvraag 1. Wat is het trillingsreducerende effect van de MetaBarrier bij toepassing in een Nederlandse Spoorzone? *43*

Onderzoeksvraag 2. Wat is de beste uitvoeringsmethode om de MetaBarrier langs het spoor te realiseren? *46*

Onderzoeksvraag 3. Welke invloed heeft de inbouw van de MetaBarrier op de stabiliteit van de spoorligging? *47*

6.2 Lopende begroting fase 2 *48*

6.3 Herijking Risicodossier *48*

7. Herijking Business case **53**

7.1 Impact resultaten op financiële haalbaarheid *53*

7.2 Herijkte business case 2025 (TCO) *53*

7.3 Herijkte doorkijk potentiële markten en toepassingsgebied *53*

8. Conclusies & aanbevelingen **56**

8.1 Conclusies *56*

8.2 Aanbevelingen en vervolg *57*

Bibliografie **58**

Bijlages **58**

Bijlage A1. Trillingsrapportage praktijkproef van Movares v2.0 d.d. 27 februari 2025 (kenmerk D79-ANI-HS-RAP-240111316) (separaat PDF document)

Bijlage A2. Rapport Langeduurmeting MetaBarrier van Movares v2.0 d.d. 22 mei 2025 (kenmerk D79-ANI-HS-RAP-25003977) (separaat PDF document)

Bijlage B. Monitoring Spoorligging IV-Infra 240699-RAP-029 Prinsenbeek en Diepenveen (separaat PDF document)

Bijlage C. EEM modellering Phononic Vibes (separaat PDF document)

Bijlage D. Input STEM berekeningen juni 2025

Bijlage E. Fotoverslag uitvoering praktijkproef

Bijlage F. Werkplan uitbouw MetaBarrier (separaat PDF document)

Bijlage G. Rapport Praktijkproef MetaSolution Deutsche Bahn in Elze (Phononic Vibes, juli 2020) (VERTROUWELIJK - separaat PDF document)

Bijlage H. Rapport Praktijkproef MetaSolution Piazza San Marco in Firenze (Phononic Vibes, mei 2023) (VERTROUWELIJK - separaat PDF document)

Bijlage I. Bevroren begroting (eind 2023) versus lopende begroting (juni 2025) (VERTROUWELIJK - separaat PDF document)

Bijlage D. Input STEM berekeningen juni 2025

Bijlage E. Fotoverslag praktijkproef

MANAGEMENT SAMENVATTING

Als onderdeel van het IBS-programma van ProRail is gedurende de afgelopen anderhalf jaar een innovatieve oplossing in de praktijk beproefd om spoortrillingen te verminderen: de Modulaire MetaBarrier. Een in Italië en Duitsland beproefd concept, waarvan het effect nog onbekend was bij toepassing in de Nederlandse bodem en dichter bij het spoor. Hieronder leest u de samenvatting van de resultaten in 3 blokken: de voorproef, de praktijkproef en de validatie met modelberekeningen.

1. Resultaten voorproef

Doel van de voorproef was om op laagdrempelige wijze ervaring op te doen met de voorgenomen inbouwmethode, op een locatie die geen risico's voor het treinverkeer veroorzaakt. Daarnaast is de voorgenomen verdichtingsmethodiek getest.

De resultaten vanuit de voorproef:

Optimalisaties in het materiaalgebruik *Doel: garanderen van een rechte en dichte aansluiting tussen de blokken.*	- Dunne panelen op de sleufbodem zodat twee blokken onderling op dezelfde hoogte staan. - Een rubberen seal tussen de blokken om het gat tussen de blokken te dichten. - Een metalen koppelplaat als verbinding tussen de blokken.
Optimalisatie in de logistiek en transportbewegingen *Doel: efficiënte inzet van mankracht en materieel op één werkspoor*	Het 'treintje' aan materieelinzet is verbeterd: - Ontgraven. - Tijdelijke grondopslag nabij sleuf. - Blokken plaatsen en aan elkaar verbinden. - Ontgraving rondom blokken aanvullen. - De terug aangebrachte grond verdichten.
Bevestiging van effect van beheersmaatregelen *Doel: aantonen beheerste inbouwmethode*	- Bevestiging verkregen van de beste (combinatie van) verdichtingsmethodes. - Bevestiging dat de gekozen werkmethode niet leidt tot aantasting van de spoorligging.

2. Resultaten praktijkproef

De grootste uitdaging bleek het vinden van een geschikte proeflocatie, met name vanwege de volgende randvoorwaarden [1]:

- Beschikbaarheid van een reeds aangevraagde TVP van circa 52 uur.
- Een zandbodem met homogene opbouw.
- De wens om conflicten met kabels en leidingen te voorkomen.
- Toegang van weg tot spoor in de nabijheid om de aan- en afvoer van de blokken en vrijkomende grond niet onnodig complex te maken.
- Mogelijkheid tot het plaatsen van een meetopstelling op het aangrenzende perceel.

Nadat de locatie bij Prinsenbeek voldoende geschikt was bevonden, is op 12 en 13 oktober 2024 een proefopstelling van 60 meter MetaBarrier-elementen ingebouwd onder het schouwpad.

Uit de metingen blijkt dat het trillingsreducerend effect van de MetaBarrier kleiner is dan vooraf werd verwacht. De MetaBarrier heeft vooral effect op hoogfrequente trillingen, vanaf circa 20 Hz, en heeft dan maximaal zo'n 3 dB effect. Dit effect neemt af met de afstand tot het spoor. Vanuit eerdere praktijkproeven in Italië en Duitsland werd een effect van 10 tot 15 dB verwacht; provisorische metingen tijdens de uitvoering van de voorproef sloten aan bij deze verwachte trillingsreductie.

3. Resultaten modelberekeningen

Het tijdens de praktijkproef waargenomen effect van de MetaBarrier wijkt af van onze verwachtingen en van de resultaten uit metingen in Duitsland en Italië. Om de oorzaak te achterhalen, zijn modelberekeningen voor een scala aan varianten uitgevoerd in twee eindige elementenmodellen (EEM); het EEM van Phononic Vibes en het rekenmodel STEM.

Twee belangrijke kanttekeningen bij het gebruik van EEM:

1. Een EEM-berekening geeft een relatieve uitkomst: de situatie zonder maatregel wordt vergeleken met de situatie met maatregel. Het verschil tussen de situaties zegt iets over het effect, uitgedrukt in een percentage.
2. De uitkomsten van een EEM-berekening hangen af van de gevoeligheid van het model voor onder meer de grond- en spoorparameters. Er is tijdens fase 2 geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Wel zijn in juni 2025 de instellingen en parameters met Deltares besproken vanwege afwijkende uitkomsten na de eerste modelberekeningen.

De resultaten met de nieuwe parameters weken dusdanig af van de eerste resultaten, dat de eerste STEM-resultaten niet betrouwbaar genoeg worden geacht om conclusies aan te verbinden over het trillingsreducerende effect van de MetaBarrier. De resultaten in paragraaf 5.4 zijn gebaseerd op de eerste modelberekeningen. Hierin is ook gekeken naar het effect van een onderbreking (oorspronkelijk onderdeel van de praktijkproef, nu alleen in rekenmodel onderzocht) en het dieper ingraven van de MetaBarrier. Hieruit volgt dat de stijfheid van de bodem grote invloed heeft op de werking van de MetaBarrier, waarbij de werking van de MetaBarrier kleiner is bij een slappere of meer gelaagde bodem.
Verder blijkt uit de modelberekeningen dat:

1. Het dichter bij het spoor plaatsen van de MetaBarrier een beperktere invloed heeft op het effect dan vooraf gedacht.
2. Het dieper plaatsen van de bovenkant van de MetaBarrier (met een dunne grondlaag op de MetaBarrier) geen negatief effect heeft op de werking.
3. Een diepere MetaBarrier een positief effect heeft op de werking. Echter heeft dit nadelige gevolgen voor het inbouwproces, aangezien dan een diepere sleuf noodzakelijk is met bijbehorende nadelige consequenties ten aanzien van sleufstabiliteit en arbeidsveiligheid.
4. Een onderbreking van circa twee meter (nodig bij bovenleidingportalen of voor passage van kabels en leidingen) geen negatief effect heeft op de werking van de MetaBarrier.

Conclusies

De MetaBarrier resulteert in een trillingsreducerend effect (±30% reductie). Dit is minder groot dan vooraf verwacht. Of er alternatieve oplossingen zijn met een groter trillingsreducerend effect voor dezelfde kosten, hangt af van de oorzaak van het verschil tussen het verwachte en gemeten effect*. Kijkend naar de 3 onderzoeksvragen zijn de antwoorden grotendeels positief, echter kan nog geen eenduidig en onvoorwaardelijk antwoord gegeven worden op de eerste vraag.

- ✕ *1a. Trillingsreducerend werking in Nederlandse spooromgeving:* het gemeten effect van de MetaBarrier op de locatie van de praktijkproef is kleiner dan verwacht.
- ✓ *1b. Invloed van diepte van het blok:* er volgt geen negatief effect uit de modelberekening.
- ✓ *1c. Invloed van onderbrekingen:* er volgt geen negatief effect uit de modelberekening.
- ✓ *2. Optimale uitvoeringsmethode:* de optimalisaties uit de voorproef hebben geleid tot een snellere plaatsing van de MetaBarrier tijdens de praktijkproef dan vooraf ingepland.
- ✓ *3. Invloed inbouw op spoorligging:* de metingen tijdens de voorproef en tijdens de praktijkproef laten geen wijzigingen in de spoorgeometrie zien. De inbouw heeft geen impact op de stabiliteit van de spoorligging.

** Het tijdens de praktijkproef gemeten effect van de MetaBarrier is kleiner dan verwacht. De oorzaak is niet met 100% zekerheid aan te wijzen. Op basis van uitgebreide evaluatie en aanvullende analyses met modelberekeningen, is het resultaat het gevolg van een combinatie van de volgende mogelijke oorzaken:*

- *Een ongunstigere bodemsamenstelling dan verwacht op basis van vooronderzoek (sonderingen), waardoor trillingen onder het scherm door gaan:*
    - *Slapper, met als gevolg langere trillingsgolven die dieper door de bodem gaan.*
    - *Meer gelaagd, waardoor trillingen reflecteren tegen dieper gelegen lagen.*
- *Onzekerheid in de trillingsmetingen van Movares, door:*
    - *Relatief nieuw spoor dat nog moet zetten. Dit kan leiden tot verschillen in de metingen tussen de nulmetinglocatie en de locatie met MetaBarrier.*
    - *De toplaag van de bodem bij de meetopstelling is tussen de voor- en nameting bewerkt (afgegraven, vervangen geëgaliseerd). De exacte impact ervan op de metingen is niet aan te wijzen, maar het vergroot in ieder geval niet de betrouwbaarheid ervan.*
- *De funderingspalen van het geluidsscherm langs het spoor hebben veel meer invloed dan vooraf verondersteld. De funderingspalen staan op een hartafstand van 4 meter en bestaan uit 5 meter diepe buispalen met een doorsnede van 800mm. Deze funderingspalen werken als een trillingsscherm, zowel bij de referentielocatie als de praktijkproeflocatie. In dat geval is de impact van de MetaBarrier kleiner dan verwacht, omdat een deel van de trillingen wordt afgevangen in de funderingspalen. In eerste EEM-berekeningen van Phononic Vibes - met dunnere palen van 2,5 meter lengte – is een trillingsreducerend effect tot 3 dB berekend.*

Aanbevelingen

Op basis van de conclusies - en dan met name de onzekerheid in de oorzaken van het lager dan verwachte trillingsreducerende effect van de MetaBarrier - wordt het volgende aanbevolen om de effectiviteit in Nederlandse bodem nader te kwantificeren:

- Een tweede proef in een betere situatie om het trillingsreducerende effect van enkel de MetaBarrier te bepalen:
    - Een stijve zandbodem, met weinig kans op slappe lagen, aan te tonen met grondonderzoek.
    - Een stabiel spoor met weinig tot geen variaties: geen net vernieuwd spoor, geen recente werkzaamheden in de bodem in de omgeving, meetpunt aan een vast object.
    - Geen andere trillingsreducerende elementen in de grond, zoals fundering van een geluidsscherm.
    - Omdat de spoorgerelateerde aspecten van de proefinbouw reeds afdoende zijn onderzocht, kan een vervolgproef ook in een “weilandlocatie” plaatsvinden onder ideale bodemomstandigheden zonder verstorende effecten.
- Uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse van het STEM-model, om de betrouwbaarheid van de resultaten uit de modelberekeningen te vergroten. Hierin wordt onderzocht wat de randvoorwaarden en modelinstellingen moeten zijn om resultaten te krijgen die beter overeenkomen met de gemeten effecten.
- Bij een gedragen beeld bij de te hanteren parameters in het STEM model: Extra EEM-berekeningen uitvoeren, waaronder met een tweede trillingsscherm (funderingspalen van 5 meter diepte, elke 4 meter) en de situaties van onderzoeksvraag 1b en 1c.

MANAGEMENT SUMMARY

As part of ProRail's IBS programme, an innovative solution to reduce rail vibrations has been field-tested over the past 18 months: the Modular MetaBarrier. A concept tested in Italy and Germany, the effect of which was still unknown when applied in Dutch soil and closer to the track. Below you can read the summary of the results in 3 blocks: the preliminary trial, the practical trial and the validation with model calculations.

1. Results pre-trial

The purpose of the pre-trial was to gain experience in a low-threshold manner with the intended embedding method, at a location that does not cause any risks for train traffic. In addition, the proposed compaction method was tested.

The results from the preliminary test:

Material optimisations *Goal: Ensure a straight and tight connection between blocks.*	- Thin panels on the trench bottom so that two blocks are installed at the same height. - A rubber seal between the blocks to seal the gap between them. - A steel coupling plate as a connection between the blocks.
Optimisation in logistics and transport movements *Goal: Efficient deployment of manpower and equipment on 1 track*	The "train" of equipment deployment has been improved: - Excavation. - Temporary soil storage near trench. - Placing and connecting blocks. - Backfilling excavation around blocks. - Compact the backfilled soil.
Confirmation of effect of control measures *Goal: Demonstrate controlled installation method*	- Confirmation obtained of best (combination of) compaction methods. - Confirmation that the chosen working method does not lead to track subsidence.

2. Results practical trial

The biggest challenge proved to be finding suitable location, mainly due to the following preconditions [1]:

- Availability of an already requested track possession of about 52 hours.
- A sandy soil with homogeneous build-up.
- The desire to avoid conflicts with underground cables and ducts.
- Road to rail access in the vicinity so as not to unnecessarily complicate the supply and removal of the blocks and released soil.
- Possibility of installation of vibration measurement equipment on adjacent plot.

After the site near Breda Prinsenbeek was found sufficiently suitable, 60 meters of MetaBarrier was installed under the inspection footpath on 12 and 13 October 2024.

The measurements show that the vibration-reducing effect of the MetaBarrier is smaller than previously expected. The MetaBarrier mainly affects high-frequency vibrations, from about 20 Hz, and then has a maximum effect of about 3 dB. This effect decreases with distance from the track. Considering preceding modelling and field trials in Italy and Germany a reduction of 10 to 15 dB had been expected, also preliminary measurements during the pre-trail pointed in that direction.

3. Results of model calculations

The effect of the MetaBarrier deviates from our expectations and the results from measurements in Germany and Italy. To identify the cause, model calculations for a range of variants were carried out in two finite element models (FEM); the Phononic Vibes FEM and the STEM calculation model.

Two key remarks to be aware of when using a FEM:

1. An FEM calculation gives a relative outcome: the situation without measure is compared with the situation with measure. The difference between the situations says something about the effect, expressed as a percentage.
2. The results of an FEM calculation depend on the sensitivity of the model to ground and track parameters, among others. No sensitivity analysis was carried out during phase 2. However, settings and parameters were discussed once with Deltares in June 2025 due to deviating results after the first model calculations.

The results with the new parameters deviated from the initial results to such an extent that the initial STEM results are deemed not reliable enough to draw conclusions about the vibration-reducing effect of the MetaBarrier. The results in §5.4 are based on the initial model calculations. These also looked at the effect of a 2 meter wide gap between blocks (originally part of the field trail, now only investigated in the model) and installing the MetaBarrier deeper underground. This shows that the stiffness of the soil has a major influence on the effect of the MetaBarrier, with the effect of the MetaBarrier being smaller when the soil is weaker or more layered. Furthermore, the model calculations show that:

1. Placing the MetaBarrier closer to the track has a more limited influence on the effect than previously thought.
2. Placing the top of the MetaBarrier deeper underground (with a thin soil layer on top of the MetaBarrier) has no negative effect on its performance.
3. A deeper MetaBarrier has a positive effect on effectiveness. However, installation of blocks deeper underground is more difficult, given the need to dig a deeper trench, leading to higher associated risks considering soil stability and workplace safety.
4. A gap of approximately 2 metres (required for catenary pole foundations) has no negative effect on the effectiveness of the MetaBarrier.

Conclusions

The MetaBarrier results in a vibration-reducing effect (±30% reduction). This is less than expected beforehand. Whether there are alternative solutions with a larger vibration-reducing effect for the same cost depends on the cause of the difference between the expected and measured effect*.

Looking at the 3 research questions, the answers are largely positive, however, no unambiguous and unconditional answer can yet be given to the first and most important question.

- ✗ *1a. Vibration reduction effect in Dutch railway environment*: the measured effect of the MetaBarrier at the site of the practical trial is smaller than expected
- ✓ *1b. Influence of block depth*: no negative effect follows from the model calculation.
- ✓ *1c. Influence of breaks*: no negative effect follows from the model calculation.
- ✓ *2. Optimal execution method*: the optimisations from the pre-test resulted in faster placement of the MetaBarrier during the field trial than previously planned.
- ✓ *3. Influence of installation on track position*: no subsidence is observed from both the measurements during the pre-trial and the field test. The installation has no impact on the stability of the track geometry.

** The effect of the MetaBarrier measured during the field trial is smaller than expected. The cause cannot be identified with 100% certainty. Based on extensive evaluation and additional analyses with model calculations, the result is due to a combination of the following possible causes:*

- *A more unfavourable soil composition than expected based on preliminary investigations (soundings), resulting in vibrations passing under the screen:*
    - *Weaker soil structure, resulting in longer vibration waves passing deeper through the soil.*
    - *More stratified, resulting in vibrations reflecting against deeper layers.*
- *Uncertainty in Movares' vibration measurements, due to:*
    - *Relatively new track yet to set. This may lead to differences in measurements between the baseline measurement location and the location with MetaBarrier.*
    - *The top layer of the soil at the measurement site has been worked (excavated, replaced levelled) between the pre- and post-measurement. Its exact impact on the measurements cannot be pinpointed, but in any case it does not increase their reliability.*
- *The foundation piles for the noise barrier along the track appear to have much more effect than previously assumed. These piles are installed every 4 meters and consist each of a steel tube with a diameter of 800 mm and a depth of 5 meter. These piles appear to function as a vibration barrier, both at the reference site and the field trial site. In this case, the impact of the MetaBarrier is smaller than expected because part of the vibration is captured in the foundation piles. Initial EEM calculations by Phononic Vibes - with thinner piles of 2.5m length – have shown a vibration reduction effect of up to 3 dB.*

Recommendations

Based on the conclusions - in particular the uncertainty in the causes of the lower vibration-reducing effect of the MetaBarrier - the following is recommended to further determine the applicability in Dutch soil:

- A subsequent field trial in a better situation to determine the effect of just the MetaBarrier:
    - A rigid sandy soil, with little chance of sagging layers, to be demonstrated with soil testing.
    - A stable track with little to no variations: no newly renewed track, no recent work in the soil in the vicinity, measuring point at a fixed object.
    - No other vibration-reducing elements in the ground, such as foundation of a noise barrier.
    - Given the fact that the railway-related research questions have been addressed sufficiently, a subsequent field trail can take place in a non-railway environment, with ideal soil conditions and without unforeseen disturbances.
- Perform a sensitivity analysis of the STEM model to increase the reliability of the results from the model calculations. This will examine what the boundary conditions and model settings should be to obtain results that better match the measured effects.
- In case of a supported view on the parameters to be used in the STEM model: perform additional FEM calculations, including with a 2nd vibration screen (foundation piles of 5 metres depth, every 4 metres) and the situations of research question 1b and 1c.

1. DE METABARRIER EN SBIR

1.1 Het concept van de modulaire MetaBarrier

Het concept van de MetaBarrier vindt zijn oorsprong in Italië, alwaar Phononic Vibes het product heeft ontwikkeld onder de naam 'MetaVibration'. Dit is een ondiep scherm, bestaande uit losse elementen. In het SBIR-traject is de werknaam **Modulaire MetaBarrier** gebruikt.

Het scherm bestaat uit aan elkaar gekoppelde betonnen U-vormige elementen (**Figuur 1**). Deze elementen worden zo dicht mogelijk bij het spoor ingegraven, bij voorkeur onder het schouwpad. Het unieke van de oplossing is dat trillingen worden geabsorbeerd, in tegenstelling tot andere ondergrondse trillingsschermen die de trillingen alleen reflecteren. Hierdoor hoeft het scherm minder diep te zijn dan andere typen trillingsschermen.

De absorberende werking wordt gerealiseerd door kleine betonnen elementen die in de bakken hangen en onderling zijn gekoppeld met roestvast stalen onderdelen. Hierdoor werken de elementen als een massa-veer systeem. De mate van absorptie hangt af van het aantal en de configuratie van de interne betonnen elementen. We kunnen de configuratie van de MetaBarrier hiermee aanpassen voor specifieke lokale situaties, zodat deze de trillingsverspreiding zoveel mogelijk minimaliseert.

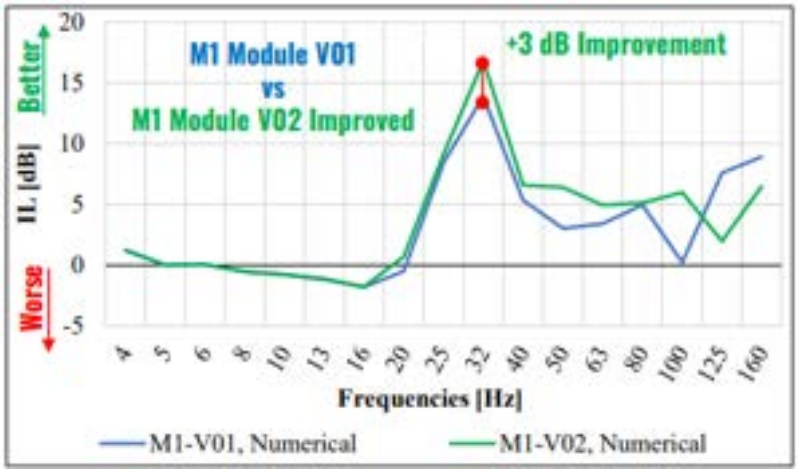
Figuur 1. *Vormgeving van de MetaBarrier en geproduceerde elementen bij de fabrikant*

Bovenstaande figuur toont de oorspronkelijke uitvoering van de MetaBarrier. Gedurende dit proefproject heeft de fabrikant een nieuwe uitvoering ontwikkeld, die robuuster is en efficiënter is te produceren: *MetaVibration M1-V02* (zie [2] en **Figuur 2**). Volgens modelberekeningen presteert deze nieuwe uitvoering vergelijkbaar of beter dan de oorspronkelijke uitvoering (**Figuur 3**). In de nieuwe uitvoering is het binnenwerk van kleine betonnen elementjes vervangen door een monoliet betonnen deel dat als "pendulum resonator" elastisch is opgehangen boven in het betonnen U-vormige element. Ook is het U-vormige element geoptimaliseerd:

- Het U-vormige element wordt als één geheel gestort (de oude versie werd samengesteld uit twee losse delen)
- De minimale wapeningsdekking is verhoogd naar 3 cm.
- De lengte van een element is vergroot tot 1,99 meter en de hoogte gewijzigd naar 1,0 m.

Besloten is om tijdens dit proeftraject gebruik te maken van deze nieuwe uitvoering.

Figuur 2. *De nieuwe uitvoering van de MetaBarrier (M1-V02), zoals gebruikt tijdens de praktijkproef*



Figuur 3. *Numerieke vergelijking trillingsreductie oude uitvoering (M1-V01) versus nieuwe uitvoering (M1-V02)*

Beproefd concept

De technische haalbaarheid en effectiviteit van de MetaBarrier is in de praktijk aangetoond, waaronder tijdens proeven in 2020 in Duitsland (met M1-V01, zie **Bijlage G**) en in 2023 in Italië (met M1-V02, zie **Bijlage H**). De MetaBarrier is gebruikt om de trillingen van wegverkeer, treinverkeer, lightrailvoertuigen en industriële installaties te verminderen. De MetaBarrier bevindt zich bij de Duitse spoorwegen (DB Netz) in een vijfjarig toelatingstraject. De MetaBarrier zelf is dus een beproefd concept, maar is nog niet eerder toegepast in de spoorzone zelf, dicht bij de bron van de trillingen.

1.2 Aanleiding SBIR

Trillingshinder door spoorvervoer is een actueel probleem. Maar het ontstaan van trillingen én het effect van maatregelen zijn moeilijk te voorspellen. In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat werkt ProRail daarom aan de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen *(vanaf hier: IBS)*. Deze innovatieagenda moet een divers palet aan maatregelen opleveren om spoortrillingen te verminderen. Dit is nodig, want het vervoer per spoor neemt toe en tegelijkertijd wordt vaker bij het spoor gebouwd. Dit leidt tot een toename van hinder door spoortrillingen.

Als onderdeel van de IBS is ProRail in 2022 gestart met een innovatie-competitie (Small Business Innovation Research of SBIR). Daarin wordt gezocht naar slimme maatregelen aan de infrastructuur die spoortrillingen kunnen verminderen. In fase 1 hebben ondernemers de kans gehad om hun ideeën uit te werken in een business case en proefplan. De 5 meest kansrijke innovaties zijn in fase 2 getest in de praktijk. De resultaten van deze praktijkproef (fase 2) van de MetaBarrier presenteren we in onderliggende eindrapportage.

Doel van de praktijkproef

Eind 2023 is fase 2 gestart. De 5 innovaties hebben onder andere voorbereidende tests uitgevoerd, zoals laboratoriumproeven en het uitproberen van de bouwmethode. Daarna is in de praktijk gekeken of - en in welke mate - deze ideeën bijdragen aan vermindering van spoortrillingen. ProRail heeft de trillingen voor en na het aanbrengen van de mogelijke oplossingen laten meten door een onafhankelijke derde partij, om zo het effect goed in beeld te brengen.

Inhoud van dit rapport

In onderliggend rapport worden de resultaten van de praktijkproef gepresenteerd. Hierbij gaan we in op:

- De in fase 1 opgestelde onderzoeksvragen en aanpak (Hoofdstuk 2).
- Het proces om te komen tot de locaties voor de voorproef en praktijkproef (Hoofdstuk 3).
- De aanpak en resultaten van de voorproef, waarin het scherm is ingebouwd langs niet-operationeel spoor in Oosterhout (Hoofdstuk 4).
- De aanpak en resultaten van de praktijkproef, waarin het scherm is ingebouwd langs operationeel spoor nabij Prinsenbeek (Hoofdstuk 5).
- De resultaten van de voorproef en praktijkproef zijn samengebracht in de beantwoording van de onderzoeksvragen (Hoofdstuk 6).

Op basis van de resultaten zijn de business case, het risicodossier en de marktpotentie bijgewerkt (Hoofdstuk 7). Tenslotte zijn de conclusies, aanbevelingen en vervolgstappen samengevat (Hoofdstuk 8).

2. ONDERZOEK

In dit hoofdstuk is het onderzoeksvoorstel samengevat op basis van het document 'Plan van Aanpak Praktijkproef'. Hiervoor hebben wij drie onderzoeksvragen gedefinieerd (§2.1). In §2.2 is de testaanpak uiteengezet, waarna in §2.3 de betrokken partijen in het onderzoek zijn opgesomd.

2.1 Doelen en onderzoeksvragen binnen de praktijkproef

Het hoofddoel van de praktijkproef was het effect van de MetaBarrier in de Nederlandse spooromgeving aan te tonen en een veilige installatiemethode te testen.

Hiervoor zijn de drie onderzoeksvragen gedefinieerd:

1. *Wat is het trillingsreducerende effect van de MetaBarrier bij toepassing in een Nederlandse Spoorzone?*
2. *Wat is de beste uitvoeringsmethode om de MetaBarrier langs het spoor te realiseren?*
3. *Welke invloed heeft de inbouw van de MetaBarrier op de stabiliteit van de spoorligging?*

In hoofdstuk 6 lichten we de antwoorden en onderbouwing op deze vragen toe.

2.2 Aanpak praktijkproef op hoofdlijn

Onze testaanpak bestaat uit 3 stappen: (1) EEM-berekeningen, (2) een voorproef en (3) de praktijkproef. Parallel aan de modelberekeningen (de eerste stap) hebben we de voorbereiding voor de voorproef en praktijkproef opgestart. Hierbij bleek het vinden van een geschikte locatie voor de praktijkproef het lastigste, vanwege de eisen en wensen aan de locatie (Hoofdstuk 3).

Omdat het effect van de MetaBarrier op de trillingsverspreiding tijdens de praktijkproef kleiner bleek dan verwacht, hebben we stap 1 uitgebreid. Hiertoe is een aantal praktijksituaties doorgerekend met STEM, om de uitkomsten te verifiëren (Hoofdstuk 5).

2.3 Betrokken partijen

De volgende partijen hebben een actieve bijdrage gehad aan de praktijkproef:

- Kampa: penvoerder en leverancier van de MetaBarrier.
- Arcadis: verzorgt de expertise ten behoeve van de inpassing binnen de spoorse omgeving en aspecten betreffende maakbaarheid en uitvoerbaarheid.
- We-Boost: analyseert de uitkomsten, voert modelberekeningen met STEM uit en brengt ervaring met maatregelen tegen trillingshinder aan treinen, het spoor, in de bodem en aan gebouwen langs het spoor in.
- ProRail: opdrachtgever en verantwoordelijk voor de uitvoering van het Innovatieprogramma Bronaanpak Spoortrillingen (IBS).
- Phononic Vibes: ontwikkelaar van de MetaBarrier en uitvoeren EEM-berekeningen. Het bedrijf is een spin-off van de technische universiteit van Milaan.
- ASSET Rail: onderhoudsaannemer proeflocatie ten tijde van de inbouw.
    - Leveren veiligheidspersoneel, voorman kabels en leidingen, vrijgave veilige berijdbaarheid.
    - Eventueel benodigd correctief herstel (graafschade, spoorligging).
- Berende Spoor- en Grondwerken: Uitvoering, materieel en logistiek.
- Deltares: ontwikkelende partij van rekenmodel STEM.

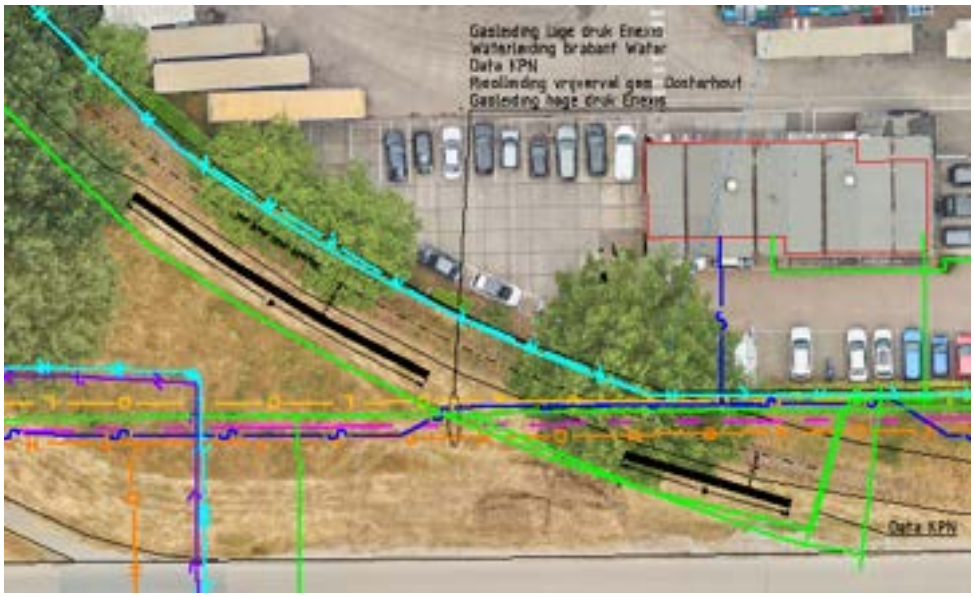
3. LOCATIEBEPALING

3.1 Voorproef

De voorproef is bedoeld om op laagdrempelige wijze ervaring op te doen met de voorgenomen inbouwmethode. Hierbij was met name de insteek om vast te stellen of het mogelijk is om de elementen vanaf het spoor in te graven, rekening houdend met bouwlogistiek, het werkbereik van de krol (graafmachine op spoorlorries) en de stabiliteit van de spoorconstructie. De uitvoering hiervan is echter bewust op een locatie die geen risico's voor het treinverkeer kan veroorzaken.

Als locatie is gekozen voor een niet langer in gebruik zijnd stukje spoor van de stamlijn in Oosterhout. Dit betreft geocode 823, tussen km 6.45 en 6.50, een spoorboog bij het kruispunt Handelsweg-Energieweg. De keuze is op deze locatie gevallen vanwege de volgende redenen:

- **Geschikte grondsoort.** De bodem bestaat uit een langdurig ongeroerd zandpakket.
- **Geen treinverkeer**. Geen impact van de beproeving op operationele processen van derden.
- **Gunstige conditionering.** Vrij van kabels en leidingen, bodemverontreiniging en ontplofbare oorlogsresten.
- **Vrije werkruimte.** Voldoende opstelruimte en manoeuvreerruimte voor machines, voertuigen en andere bouwplaatsvoorzieningen.
- **Nabijheid.** De locatie bevindt zich vlak bij de bedrijfslocaties van Kampa en Berende.
- **Toestemming.** De gemeente Oosterhout heeft als eigenaar van de locatie toestemming gegeven voor de proef.



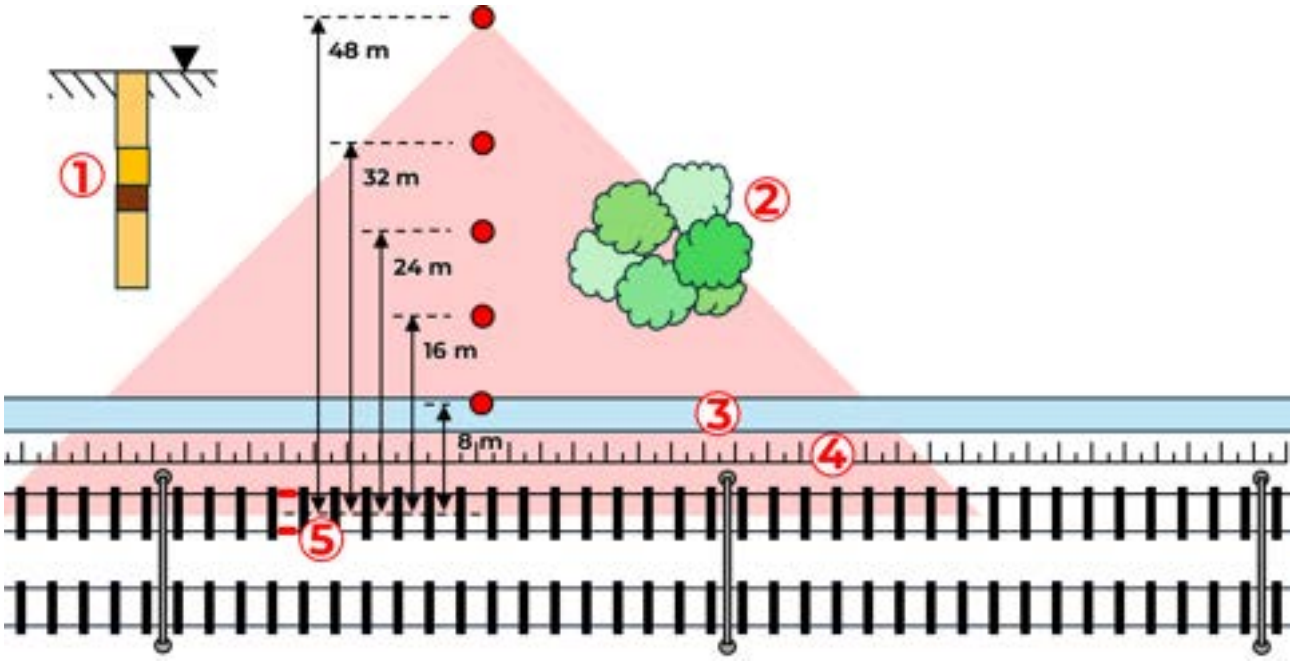
Figuur 4. *Locatie voorproef met omringende kabels en leidingen (bron: Arcadis)*

Figuur 5. *Aanzicht locatie voorproef, met piketten is de te maken ontgraving uitgezet.*

3.2 Praktijkproef

Vanuit de theorie en de resultaten van de voorproef zijn de voorwaarden voor een geschikte praktijklocatie verder aangescherpt. De voorwaarden voor een geschikte locatie waren:

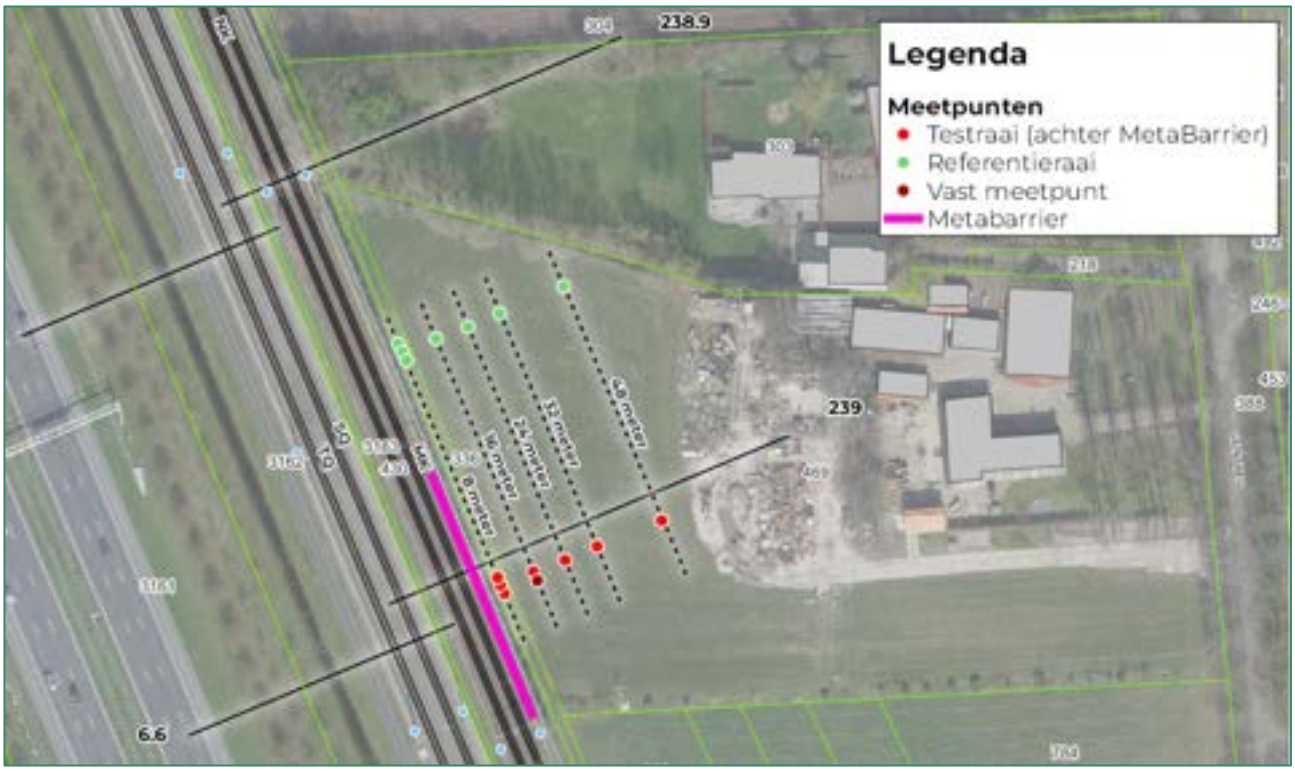
- **Geschikte grondsoort**. Omdat het effect van de MetaBarrier vooral boven de 10 Hz wordt verwacht, is een locatie nodig met een relatief stijve, waterdoorlatende bodem. Op dit type bodems zijn de belangrijkste trillingsfrequenties van de treinen hoger dan 10 Hz, en is het effect goed vast te stellen.
- **Gunstige conditionering**. Omdat de MetaBarrier onder het schouwpad wordt geplaatst, is het van belang dat er geen kabels en leidingen onder het schouwpad liggen, om schade aan kabels en leidingen tijdens het plaatsen (of hoge kosten voor het verplaatsen van kabels en leidingen) te voorkomen. Afhankelijk van de locatie kan ook nog ecologisch onderzoek, ontplofbare oorlogsresten onderzoek en/of milieukundig bodemonderzoek nodig zijn. Met name ecologisch onderzoek kan een lange doorlooptijd hebben en de conclusies kunnen beperkingen aan de uitvoering opleveren, dus locaties waar dat nog nodig was, zijn afgevallen.
- **Geschikte locatie om de trillingen te meten**. Conform het Uniform Meetprotocol IBS moet het effect van de maatregel worden vastgesteld op 8, 16, 24, 32 en 48 meter van het spoor, en mogen er geen verstorende elementen zijn. Concreet betekent dit dat er geen greppel tussen spoor en trillingsmeetpunten mag zijn (want die dempt de trillingen al), dat het spoor niet op een talud mag liggen (want dan is de afstand van 8 meter doorgaans niet te meten) en dat er geen begroeiing in de buurt van de meetpunten mag zijn. Water, bomen, bebouwing of wegen mogen ook niet op de gewenste meetafstanden aanwezig zijn, zie ook **Figuur 6**.
- **TVP beschikbaar binnen SBIR-periode**. Omdat het aanvragen van een eigen TVP niet mogelijk was binnen de looptijd van de SBIR, moest worden meegelift op een andere TVP. Alleen locaties waar nog ruimte was binnen een TVP, kwamen daardoor in aanmerking.



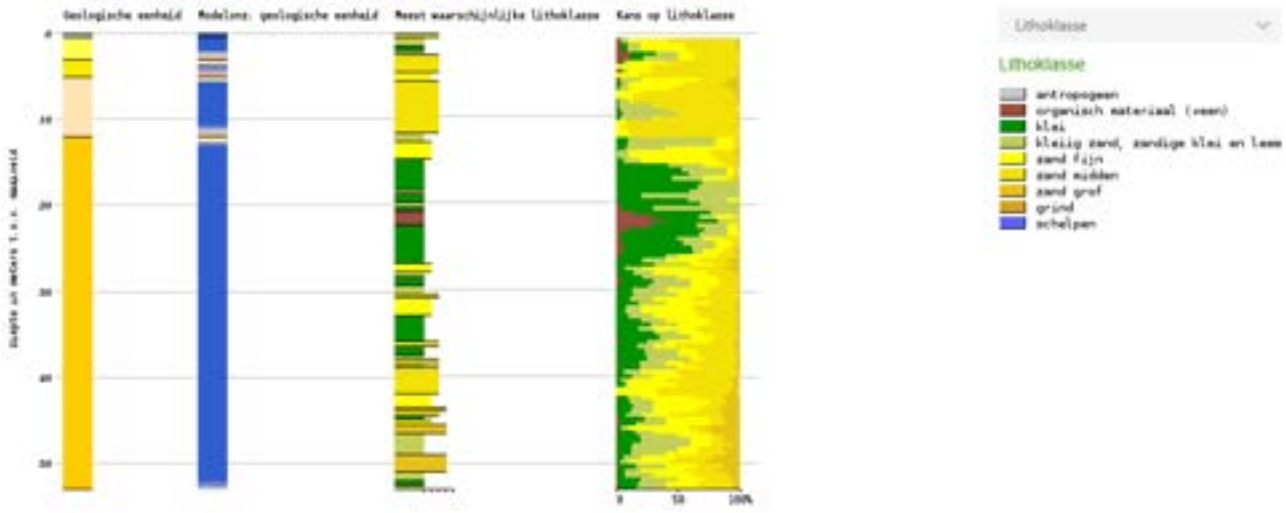
Figuur 6. *Een geschikte meetlocatie is (1) op zandgrond, met (2) geen begroeiing of andere objecten binnen een 45 gradenzone ten opzichte van het meest ver weg gelegen meetpunt, (3) zonder water tussen spoor en meetpunten, (4) niet op een talud en (5) zonder ES-lassen of wissels, dus bij doorgaand spoor. De MetaBarrier wordt geplaatst in een vak tussen twee portalen*

Met name de beperkingen vanuit een beschikbare TVP, de duur van conditionerende onderzoeken en de geschiktheid om de trillingen te meten, zorgden ervoor dat een aantal locaties is afgevallen (o.m. andere locaties langs het spoor tussen Lage Zwaluwe en Prinsenbeek (geocode 121), tussen Eefde en Zutphen (geocode 030) en tussen Breda en Tilburg (geocode 125).

Uiteindelijk is een locatie bij Prinsenbeek gekozen, hoewel deze qua bodemopbouw iets minder geschikt is (relatief veel kleiachtige lagen, zie **Figuur 8**). Aan de andere voorwaarden uit **Figuur 6** werd wel voldaan. De trillingen zijn gemeten door een onafhankelijke partij. Het ingenieursbureau Movares heeft hiervoor opdracht van ProRail gekregen. De meetopstelling van Movares is weergegeven in **Figuur 7**.

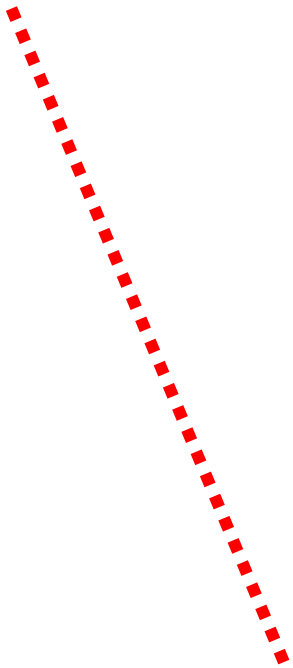


Figuur 7. *Meetlocaties Movares*



Figuur 8. *Opbouw bodem volgens Dinoloket*

De exacte proeflocatie is geocode 121, onder het schouwpad van spoor MK (Breda Prinsenbeek → Lage Zwaluwe), ter hoogte van km 6.6, tussen de bovenleidingpalen 6/17 en 6/19. De afstand tussen deze palen is 70 meter, wat het mogelijk maakt om 60 meter MetaBarrier te plaatsen tussen deze twee palen. Zie ook **Figuur 9** en **Figuur 10** (hierin staat ook de kabelsituatie in het proefvak).



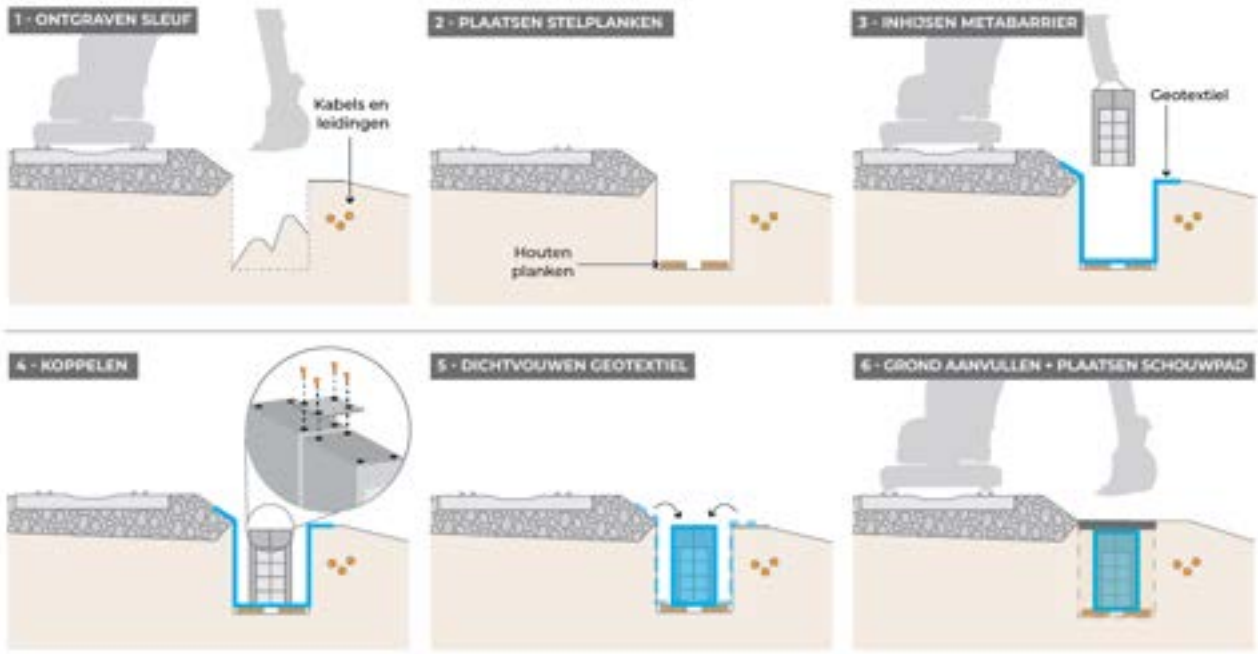
Figuur 9. *Proeflocatie (rood gearceerd). Bron: Railmaps.*

Figuur 10. *Situatietekening proeflocatie met aanduiding aangetroffen kabeltracé*

VOORPROEF

4.1 Aanpak

De beoogde uitvoeringsmethode (gevisualiseerd in **Figuur 11**) is getest op een veilige, risicoloze locatie buiten het spoorgebied (onderzoeksvraag 2). Hierbij is – zonder tijdsdruk van een buitendienststelling – het bouwproces getest en geoptimaliseerd. Tevens is vastgesteld of we in de juiste machines, hulpmiddelen en werkwijzen hebben voorzien.
Bijkomend voordeel is dat ons uitvoeringsteam handigheid en routine heeft opgedaan met de uitvoeringsmethode en de handelingen. Hiermee hebben we de kans op tegenslagen en/of vertraging tijdens het installeren van het scherm tijdens de buitendienststelling verkleind.
Onderdeel van de voorproef is het testen van de voorgenomen verdichtingsmethodiek (onderzoeksvraag 3). Door deze in een voorproef te testen, borgen we dat we de beste methode gebruiken tijdens de praktijkproef.



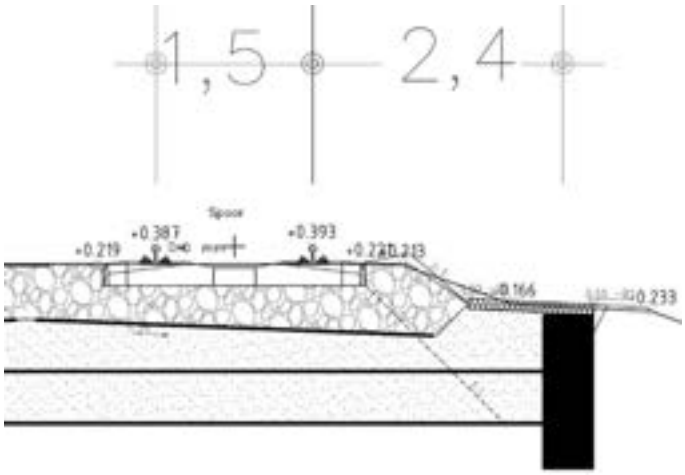
Figuur 11. *Beoogde uitvoeringsmethode voor de inbouw van de MetaBarrier (startpunt voor de voorproef)*

4.2 Verloop van de voorproef

De proefinbouw heeft plaatsgevonden op 17 april 2024. Voorafgaand zijn een RI&E en V&G-uitvoeringsplan opgesteld, is de aanwezigheid van kabels en leidingen onderzocht en Klic-melding gedaan. Ook is toestemming verkregen van de Gemeente Oosterhout (perceeleigenaar) voor de graafwerkzaamheden. Tijdens de uitvoering was het bewolkt weer, in de middag waren er enkele hevige regenbuien. Er was ook sprake van regenval op de dagen voorafgaand aan de voorproef. De bodem was gemiddeld vochtig.

Op de proeflocatie was geen schouwpad als zodanig herkenbaar, enkel grasachtige vegetatie. Ook het ballastbed was vrijwel geheel overgroeid. Gekozen is om de elementen zo ver mogelijk verwijderd van het spoor onder het (fictieve) schouwpad in te graven, zodat de mogelijkheden van de krol (Liebherr 924) om vanaf het spoor te installeren goed beproefd konden worden. Denk hierbij aan aspecten zoals hijsvermogen, reikwijdte bij ontgraving en zicht voor de

kraanmachinist op de sleuf. Dit betekent dat het hart van de elementen op circa 2,40 m uit het hart van de buitenste spoorstaaf is geplaatst. Rekening houdend met sleufstabiliteit en zicht is een ontgraving van 100 cm breedte op maaiveldniveau voorzien, teruglopend tot 60 cm op een diepte van 1,10m.



Figuur 12. *Doorsnede beoogde plaatsing onder schouwpad (voorproef)*

Voorafgaand aan de werkzaamheden is de ligging van het spoor over de gehele lengte van het proefvak ingemeten (nulmeting). Tijdens de ontgraving is een bovenlaag van circa 30 cm zwarte teelaarde aangetroffen. Hieronder is schoon geel zand aangetroffen. Beide lagen zijn gescheiden uitgenomen. Oorspronkelijk was voorzien om de elementen geheel in te pakken in worteldoek, om zandindringing in de holle delen te voorkomen. Hiervoor waren twee mogelijkheden voorzien:

1. Worteldoek in de sleufbodem draperen en na het plaatsen van de elementen omslaan over de elementen.
2. Vóór plaatsing in de sleuf de individuele elementen geheel inpakken.

Tijdens de proef is na enig experimenteren besloten om na plaatsing van de elementen een strook worteldoek over de voeg tussen twee elementen te draperen (zie paragraaf 4.3).

Beoogd was om de bovenlaag van de proeflocatie in één werkgang te ontgraven en de onderlaag in korte segmenten te ontgraven, opdat de onderste bodemlaag zo min mogelijk de kans krijgt om te ontspannen en eventuele verzakking wordt voorkomen. Mede om deze reden was de insteek dat de krol niet direct naast de diepste ontgraving zou staan. Om het op hoogte stellen van de elementen te vereenvoudigen en de druk vanuit de elementen op de ondergrond te spreiden, waren houten onderslagplanken voorzien, zodanig dat bij een voegovergang beide aangrenzende elementen op dezelfde plank worden opgelegd.

Het inhijsen van de elementen vond plaats middels prefab aangebrachte hijsankers (kogelkop). Na plaatsing van de elementen zijn zij onderling gekoppeld met een stalen koppelplaat voorzien van sleufgaten. Ter plaatse zijn hiervoor ankers ingeboord in de elementen. Bij het eerste element is tevens een betonnen kopschot aangebracht om het open uiteinde af te dichten. Dit kopschot is gefixeerd met eenzelfde stalen koppelplaat.

Figuur 13. *Inhijsen eerste element. In de sleuf zijn de houten onderslagplanken zichtbaar*

Figuur 14. *Kopschot met hijsketting en stalen koppelplaat*

Hierna is de sleuf laagsgewijs aangevuld en verdicht. Hierbij is gebruik gemaakt van het uitgenomen gele zand, waaraan water is toegevoegd om het verdichten te vergemakkelijken. Het diepste en smalste gedeelte van de sleuf is handmatig verdicht middels een aanstamper. Deze is te zien in **Figuur 15**, onderaan de aanstamper bevindt zich een dwars gemonteerd houten klosje (niet zichtbaar op de foto) waarmee het smalle onderste gedeelte van de sleuf goed kan worden verdicht. De overige lagen zijn mechanisch verdicht door de krol met behulp van een trilblok met een smalle trilbalk (**Figuur 16**).

Figuur 15. *Handmatig verdichten onderste sleufaanvulling met de houten aanstamper*

Figuur 16. *Trilblok met smalle trilbalk. Onder het zwarte worteldoek bevindt zich de overgang tussen twee elementen*

Er zijn 3 elementen geplaatst, in totaal 6 meter lengte. Na het uitvoeren van trillingsmetingen (§4.4) zijn de elementen losgekoppeld en één voor één uitgehesen. De elementen zijn hierbij niet eerst vrijgegraven, het kostte de krol, staande op het spoor en met afstempeling, enige moeite om de elementen los te trekken uit de verdichte bodem. De krol was voorzien van ingeschakelde last-momentbegrenzer, deze beveiliging signaleert en voorkomt overbelasting en instabiliteit van de machine. Alle elementen konden binnen de veilige grenzen van het werkbereik van de krol worden uitgenomen, wel moest de krol zich in een enkel geval dichter bij een element opstellen om het los te kunnen trekken.

De sleuf is opgevuld met het resterende bodemmateriaal en het oppervlak is weer netjes afgewerkt. Tot slot is een nameting uitgevoerd van de spoorligging, om eventuele verzakking van de spoorconstructie in beeld te brengen.

4.3 Uitkomsten en bevindingen

De uitvoering van de voorproef heeft geleid tot de volgende observaties en leerpunten:

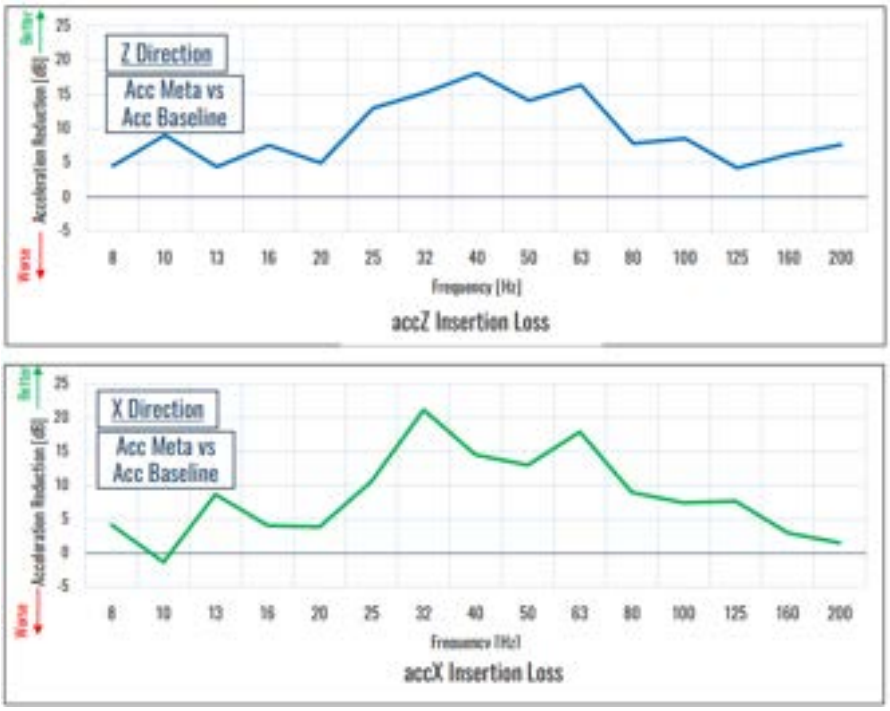
- De werkrichting van de inbouw wordt bepaald door de positie van de cabine van de krol (cabine zit links, dus sleuf ook links, werkrichting achterwaarts).
- De gebruikte zware krol (Liebherr 924) heeft voldoende hijsvermogen bij maximale vlucht (volgens de machinist had de krol dan nog 900 kg hijsvermogen over). Bij uitbouw (lostrekken) van de elementen werd het volledige hijsvermogen van de kraan aangesproken en moest de krol in een enkel geval dichter bij het element gaan staan om het los te kunnen trekken. Gebruik van een lichtere krol, zoals een voor regulier spoorwerk meer gebruikelijke Liebherr 918 of Atlas 1404, wordt daarom niet aanbevolen.
- Bij bevestiging van de koppelplaten vergt het inboren van de bevestigingsmiddelen veel tijd, mede gezien de benodigde gatdiameter (minimaal 10mm) en de beperkte werkduur van accugereedschap. De toegepaste houtdraadbouten braken in meerdere gevallen tijdens montage. Aanbeveling om voortaan keilbouten toe te passen of bij de productie van de elementen draadeindes in te storten in de blokken. Dit scheelt aanzienlijk in de benodigde montagetijd.
- Het draperen van worteldoek op de sleufbodem en het inpakken van de elementen in worteldoek bleek tijdrovend en onpraktisch. Ook het nauwkeurig aanbrengen van de twee parallelle stelplanken op de sleufbodem bleek omslachtig. Tijdens de uitvoering is het idee gerezen om de blokken te plaatsen op een kunststof plaat ter breedte van de sleufbodem. Deze dient enerzijds als afdichting aan de onderzijde (voorkomen indringing bodemmateriaal in de holle delen van de elementen) doordat de beoogde plaat enige flexibiliteit heeft om aan te sluiten op de onderzijde van de afzonderlijke elementen en waarborgt anderzijds de gelijke hoogteligging van aansluitende elementen.
- De voegen tussen aansluitende elementen bleken tot 2 cm open te staan. Ondanks gebruik van een laserhoogtemeter bleek het lastig om een volkomen vlakke onderbaan te creëren. Het verdient daarom aanbeveling om grotere aaneengesloten sleuflengtes te ontgraven en machinaal in één beweging op gelijke hoogte uit te vlakken.
- Voor afdichting van de kier tussen twee aangrenzende elementen is het idee gerezen om de kopse kanten te voorzien van een indrukbaar afdichtingsprofiel, en voor extra zekerheid nog een strook anti-worteldoek over de voegovergang te draperen.
- Het handmatig verdichten van de onderste bodemlaag met aanstamper en inwatering is als fysiek intensief ervaren, maar leidde wel tot een goed verdichtingsresultaat. Het trilblok van de krol (met smalle opzetbalk voor de smalle werkruimte) bleek een waardevolle verdichtingsmethode voor de bredere delen van de sleuf.

- De sleufwanden zijn stabiel gebleken tijdens de uitvoering. Enkel bij het machinaal verdichten sijpelde een geringe hoeveelheid los bodemmateriaal in de sleuf, waarbij de sleufwanden te allen tijde stabiel bleven.

4.4 Trillingsmetingen voorproef

Nadat de blokken waren geplaatst en het maaiveld was afgewerkt, heeft leverancier Phononic Vibes trillingsmetingen uitgevoerd. Omdat op de proeflocatie geen treinverkeer mogelijk was, heeft de krol met het trilblok een spoorstaaf in trilling gebracht. De metingen hebben plaatsgevonden op enkele meters afstand van het spoor, één meetpunt achter het midden van de ingegraven elementen en één referentiemeetpunt iets verderop langs het spoor.

Een eerste conclusie vanuit de metingen van Phononic Vibes is dat in een gunstige bodem (lees: stijf, ongelaagd zand) de effectiviteit minstens zo hoog is als in eerdere praktijkproeven in Duitsland en Italië (meer informatie is te vinden in de meetrapportage [3]).



Figuur 17. *Trillingsreductie voorproef Oosterhout (bron: metingen Phononic Vibes)*

4.5 Metingen spoorligging

Om vast te stellen of de handelingen nodig voor de ontgraving, de sleuf en aanbrenging van de MetaBarrier geen negatieve invloed hebben op de spoorligging en baanstabiliteit zijn er metingen aan de spoorgeometrie van het betreffende spoor uitgevoerd. Zoals in voorgaande paragraaf benoemd vóór de inbouw (0-meting), na de inbouw en na de uitbouw van de MetaBarrier is middels een waterpas/spoorwijdtemal op circa 15 punten een meting van de spoorverkanting verricht.

In **Tabel 1** zijn de meetwaarden van de spoorverkanting in het betreffende gedeelte van de Oosterhoutse spoorboog ter plaatse van de proeflocatie weergegeven. Daarin is grijskleurig aangegeven het spoorgedeelte van circa 3 x 2 m direct naast de MetaBarrier. De afstand tussen twee meetpunten is telkens 1 meter.

Let op: de spoorconstructie van het proefvak ligt in verkanting, omdat het een boog betreft. De meetwaarden variëren daarom niet rond de 0 mm, maar tussen de 20 à 25 mm. Van belang is daarom niet de absolute meetwaarde, maar de mate waarin de metingen per meetpunt onderling variëren[1].

Tabel 1. *Meetstaat controle spoorligging: Spoorverkanting [mm]. Grijs gearceerd is deel bij MetaBarrier*

Meetpunt	Nulmeting	Na inbouw	Na uitbouw
1	22	-	-
2	24	21	-
3	24	21	-
4	22	19	19
5	21	17	18
6	20	20	19
7	20	22	21
8	20	23	22
9	21	23	23
10	20	22	22
11	22	23	22
12	22	23	23
13	24	26	25
14	27	27	27
15	29	29	29

De bevindingen wat betreft de spoorligging:

- De verkanting voor en na de voorproef was vrijwel hetzelfde, het gemeten verschil was meestal 0 tot 2 mm.
- Er zijn enkele verschillen tot maximaal 3 mm gemeten. De verschillen treden zowel op'naar de sleuf toe' (daling van waarde na nulmeting, voorbeeld meetpunt 6) als 'van de sleuf af' (stijging meetwaarde na nulmeting, voorbeeld meetpunt 9). Deze verschillen duiden dus niet op een verandering consequent naar de zijde van de sleuf toe.
- De interpretatie is dat de 'verschillen' worden verklaard door de onnauwkeurigheid van de handmatige metingen en het tussendoor berijden van dit spoortje door de krol en mogelijk ook de veroorzaakte forse trillingen door het trilblok. Men moet zich realiseren dat de spoorconstructie ter plaatse in matige staat is. Er zijn diverse losse bevestigingsmiddelen, rotte hardhouten dwarsliggers en er is slechte, vervuilde ballast bestaande uit rond maasgrind en overwoekering door groen. De fixering van de spoorstaven op dwarsliggers en in het ballastbed is dus beperkt integer.

De conclusie is dat er geen wezenlijke verandering van de spoorgeometrie is opgetreden. De gemeten verschillen zijn gering, vallen ruimschoots binnen de toegestane onderhoudstoleranties en zijn niet te relateren aan de invloed en zijde van de graafwerkzaamheden en de sleuf. Gezien de conditie van de spoorconstructie en de wijze van meten vallen de gemeten kleine verschillen binnen de afwijking die men in dit soort omstandigheden kan verwachten. Er is geen spoorverzakking waargenomen.

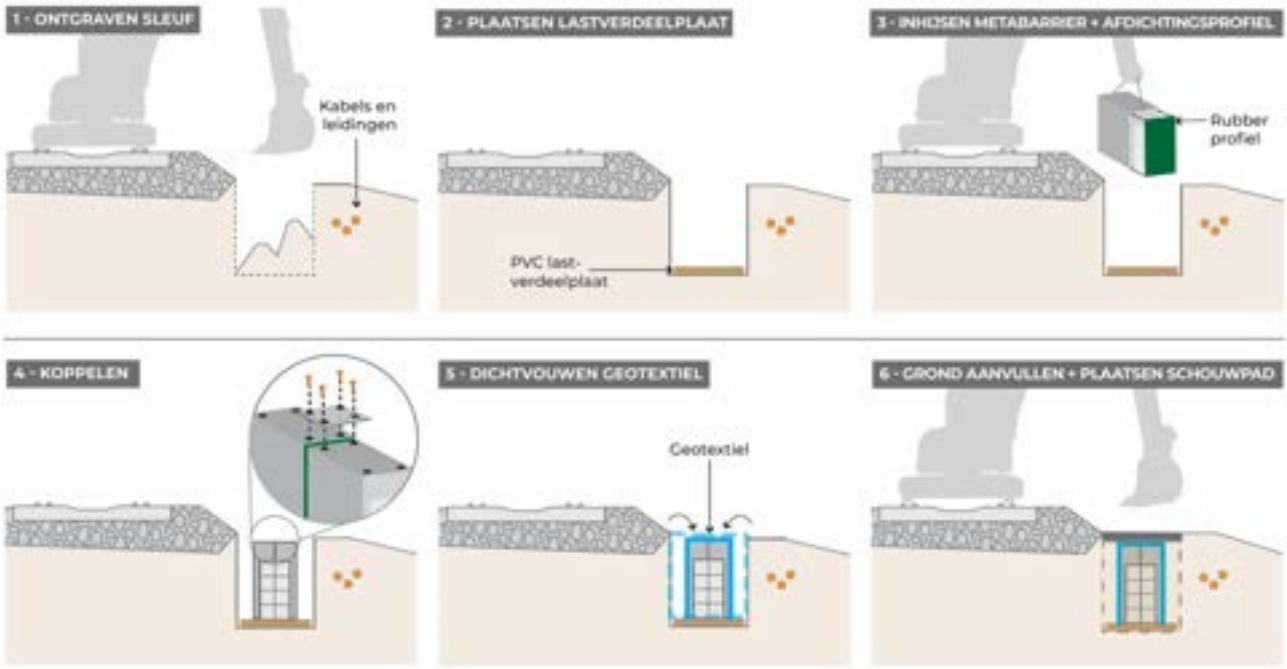
[1] Volgens de Onderhoudswaarde zoals gedefinieerd in de Instandhoudingsspecificatie van ProRail (IHS00001-1-v002) mag op dit spoor de verkanting op een meetbasis van 3 meter maximaal 13 mm veranderen en mag de absolute hoogte op een koorde van 10 meter maximaal 24 mm afwijken (en maximaal 3,7 mm tussen twee meetpunten). Alle gemeten waarden voldoen ruimschoots aan deze criteria.

5. PRAKTIJKPROEF

5.1 Aanpak

Er is 60 m[1] MetaBarrier geplaatst nabij Prinsenbeek, op basis van de geoptimaliseerde inbouwmethode (zie **Figuur 18**).

Optimalisaties in het materiaalgebruik *Doel: garanderen van een rechte en dichte aansluiting tussen de blokken.*	- Dunne panelen op de sleufbodem, zodat de twee blokken onderling op dezelfde hoogte staan. - Een rubberen seal tussen de blokken om het gat tussen de blokken te dichten. - Een metalen koppelplaat als verbinding tussen de blokken.
Optimalisatie in de logistiek en transportbewegingen *Doel: efficiënte inzet van mankracht en materieel op 1 spoor*	Het 'treintje' aan materieelinzet is verbeterd: - Ontgraven - Tijdelijke grondopslag nabij sleuf - Blokken plaatsen en aan elkaar verbinden - Ontgraving rondom blokken aanvullen - De terug aangebrachte grond verdichten
Bevestiging van effect van beheersmaatregelen *Doel: aantonen beheerste inbouwmethode*	- Bevestiging verkregen van de beste (combinatie van) verdichtingsmethodes. - Bevestiging dat de gekozen werkmethode niet leidt tot spoorverzakking.



Figuur 18. *Geoptimaliseerde inbouwmethode van de MetaBarrier die is gehanteerd tijdens de praktijkproef*

De wens was het effect van de MetaBarrier gedurende minimaal 3 seizoenen te observeren. Dit is ten tijde van het opleveren van het eindrapport nog niet gelukt:

- De trillingsmetingen beperken zich tot de eerste weken na installatie. Daarom is er beperkt een eenduidige conclusie te trekken over de impact van de seizoensomstandigheden op de werking van de MetaBarrier.

- De monitoring van spoorligging en grondwaterstand door IV-Infra heeft plaatsgevonden van 9 oktober 2024 tot en met 18 november 2024.
- Op het moment van schrijven van deze eindrapportage (juni 2025) is de MetaBarrier nog steeds op de proeflocatie aanwezig, omdat nog geen geschikte buitendienststelling beschikbaar is gesteld voor uitbouw. Tot op heden zijn er gerelateerd aan de MetaBarrier geen storingsmeldingen bekend rond de proeflocatie (bron: ProRail SAP). De Voorjaarsrit 2025 van de UFM-meettrein toont uitstekende parameterwaarden van de spoorgeometrie op en nabij de proeflocatie (zie paragraaf 5.5).

5.2 Uitkomsten

In deze paragraaf beschrijven we de uitkomsten van de proef. We gaan hierbij eerst in op het werkproces (realisatie van de MetaBarrier), daarna op de resultaten van de trillingsmetingen,

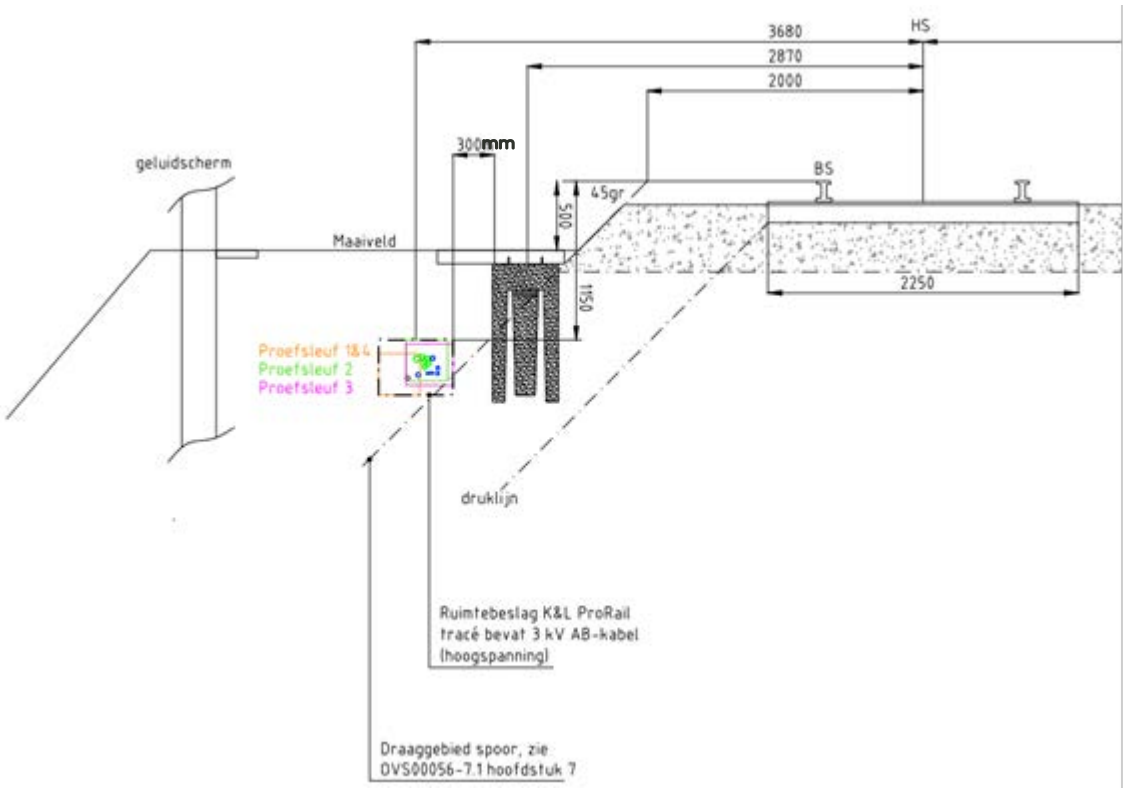
Werkproces

De inbouw van de praktijkproef heeft plaatsgevonden op 12 en 13 oktober 2024, op het baanvak Breda – Lage Zwaluwe, langs spoor MK, ter hoogte van km 6.6, tussen de bovenleidingpalen 6/17 en 6/19. Voor de inbouw werd meegelift op een buitendienststelling van een VolkerRail. Op beide dagen was gepland te werken in telkens twee opeenvolgende ploegendiensten. Tijdens de uitvoering was het weer overwegend bewolkt, de ochtend van 13 oktober kende enige lichte neerslag. De bodem was gemiddeld vochtig. De spoorconstructie (ballast, dwarsliggers en spoorstaven) was in augustus 2024, kort voor de inbouw van de MetaBarrier, compleet vernieuwd door derden.

Voorafgaand aan de uitvoering zijn de volgende voorbereidende werkzaamheden verricht:

- Verkrijgen van een Toestemming voor Gebruik (TVG) van ProRail. Deze TVG voor exploitatie is verleend onder nummer TVG00749, geldig van 1 oktober 2024 tot 1 juni 2026.
- Ontwerp van de proeflocatie.
- Onderzoek naar de aanwezigheid van kabels en leidingen.
- Visuele controle van de proeflocatie op toegankelijkheid en eventuele onvoorziene obstakels.
- Verifiëren van de werkelijke kabelligging door middel van het graven van proefsleuven.
- Opstellen van een RI&E en V&G-uitvoeringsplan.
- Conditionerende onderzoeken, o.a. niet-ontplofte oorlogsresten en bodemverontreiniging.
- Uitvoeren Klic-melding (graafmelding).
- Opstellen van een draaiboek voor het uitvoeringsweekend.

Tijdens de voorbereiding is geconstateerd dat het kabeltracé rakelings langs het schouwpad loopt. Om het risico van graafschade te voorkomen, is besloten de MetaBarrier zo dicht mogelijk langs de spoorconstructie onder het schouwpad in te graven. Uit EEM-modellering is gebleken dat een laterale verschuiving van circa 50 cm (ten opzichte van de situering van de voorproef) weinig invloed heeft op de effectiviteit. Uitgangspunt ter beperking van het risico op schade was dat het kabeltracé tenminste 30 cm horizontaal van de ontgraving verwijderd moest blijven. Tegelijkertijd was het streven om de ontgraving niet te laten overlappen met de drukzone van het spoor. De totale benodigde ontgravingsdiepte vanaf het schouwpad is 110 cm (100 cm hoogte van de elementen plus 10 cm porfier van het schouwpad). Blijkens de ontwerptekening is het mogelijk gebleken aan beide wensen te voldoen (**Figuur 19**).



Figuur 19. *Dwarsdoorsnede inbouwlocatie Breda Prinsenbeek; Opmerking: de toegepaste dwarsliggers in de vernieuwde situatie zijn niet letterlijk de hier getekende typen, maar NS90 dwarsliggers met een lengte van circa 2.520 mm, ook daarvan is getoetst dat de MetaBarrier zich buiten de druklijn bevindt.*

Tijdens het ontgraven is permanent toezicht geweest door een “voorman spoorse kabels en leidingen”. Hij heeft regelmatig de daadwerkelijke ligging van het kabeltracé zichtbaar gemaakt en vastgesteld dat de daadwerkelijke ligging overeenkwam met de verwachting. Dankzij deze voorzorgsmaatregelen is er geen schade aan ondergrondse infrastructuur opgetreden tijdens de uitvoering. De afstand tussen de ziel van de buitenste spoorstaaf en de MetaBarrier is 190 cm.

De sleuf is ontgraven op circa 60 cm breedte. Rekening houdend met sleufstabiliteit en de latere verdichting van het aan te vullen bodemmateriaal is de bovenzijde van de ontgraving schuin afgewerkt. Hiervoor moest de teen van het ballastbed iets worden opgetrokken. De werkvolgorde was van zuid naar noord (oplopende kilometrering). Alle materialen zijn aan- en afgevoerd vanaf een railinzetplaats ter hoogte van km 7.6. De sleufbodem was normaal vochtig, maar niet nat.

Gezien de ervaringen bij de voorproef is besloten om de ontgraving in drie delen van circa 20 meter te realiseren. Hierdoor was een grotere efficiëntie te behalen t.a.v. aan- en afvoer van materialen en doelmatige inzet van personeel. Ook kon zo de sleufbodem over grotere lengte in één werkgang precies op de juiste constante diepte worden geëgaliseerd. Dit maakte het mogelijk om de elementen nauwkeurig in een rechte lijn te plaatsen, zonder noemenswaardige spleetvorming tussen de elementen. Daarentegen betekende deze keuze dat de sleuf gedurende langere tijd (maximaal enkele uren) open zou liggen, hetgeen enige ontspanning van de bodem en verzakking van de spoorconstructie zou kunnen veroorzaken. Visuele waarneming tijdens de uitvoering en de monitoring van de spoorconstructie tijdens en na de uitvoering heeft uitgewezen dat deze nadelige gevolgen niet zijn opgetreden.

Op de geëgaliseerde sleufbodem is een kunststof lastverdeelplaat aangebracht van Calenberg (Cidista K 07.23, dikte 2 mm). Deze platen zijn aangeleverd in breedte 50 cm en lengte 200 cm. De

platen zijn zodanig uitgelegd dat de voeg tussen twee MetaBarrier-elementen niet samenvalt met de aansluiting tussen twee aanliggende platen.

Voor de proeflocatie zijn 26 nieuwe MetaBarrier-elementen geleverd door de fabrikant. Tevens zijn vier elementen hergebruikt die eerder zijn gebruikt bij de voorproef in Oosterhout. De eerdere proefinbouw heeft geen schade of andere nadelige gevolgen gehad voor de herbruikbaarheid van de MetaBarrier-elementen.

Figuur 20. *Afdichtingsprofiel Mavotrans SIREX PE Dilatatieschuim C33*

De elementen zijn voorafgaand aan de inbouw aan één uiteinde voorzien van een aan één zijde zelfklevend afdichtingsprofiel van Mavotrans (SIREX PE Dilatatieschuim C33, dikte 35 mm). Dit materiaal is voorafgaand aan de inbouw op maat gesneden en aangebracht over het gehele oppervlak van de doorsnede van het vaste deel van de elementen (**Figuur 20**). Tijdens de uitvoering is gebleken dat dit materiaal vrij stug is en zich nauwelijks laat indrukken. Ook als de graafmachine de elementen aandrukt, veren zij na het wegnemen van de druk grotendeels terug naar de oorspronkelijke positie.
Dankzij de aanmerkelijk betere plaatsingstolerantie van de elementen (maximaal 3 mm spleet t.o.v. 2 cm bij de voorproef) – in combinatie met het toepassen van stroken worteldoek op de voegen – voorkomen we het risico dat bodemmateriaal in de holte van de elementen kan lopen. Advies voor toekomstige projecten is smallere stroken van dit dilatatieschuim toe te passen, zodat het beter indrukbaar is, of te kiezen voor een ander (makkelijker indrukbaar) materiaal.

De elementen zijn onderling gekoppeld met een stalen koppelplaat voorzien van sleufgaten. Als leerpunt na de voorproef zijn de nieuw geleverde elementen aan één zijde voorzien van prefab ingestorte draadeindes. Gezien de bij de voorproef ondervonden plaatsingstolerantie werd het te risicovol gezien om beide uiteinden te voorzien van prefab draadeindes. De ankerbouten aan de andere zijde zijn daarom ter plaatse ingeboord. Dit bleek arbeidsintensief en vergde het uiterste van het toepaste accuboorgereedschap. Tijdens de uitvoering van de praktijkproef is echter gebleken dat de afwijking in de maatvoering voldoende klein uitpakt. Aanbeveling bij een volgende toepassing is om aan beide zijden prefab draadeindes aan te brengen.

Figuur 21. *Koppelplaat (nog niet afgemonteerd). De foto toont tevens de hijsankers (kogelkop, twee stuks per element).*

De open kopse kant aan het begin en einde van de blokkenrij is afgesloten met een betonnen plaat (“kopschot”). Deze is door de gronddruk en een stalen koppelplaat op de bovenzijde gefixeerd tegen de blokkenrij.

De toplaag van de ontgraving bestond uit een mengsel van zwarte grond, ballaststenen en porfier van het (voormalige) schouwpad. Hieronder bevond zich een laag van circa 60 cm donkere aarde. Onder deze laag is vanaf een diepte van circa 70 cm donkergeel lemig zand aangetroffen (**Figuur 22**). De diepte waarop de laag geel zand werd aangetroffen varieerde, in het middendeel van de ontgraving is enkel donkere aarde aangetroffen (**Figuur 23**). Het laatste gedeelte van de ontgraving, richting bovenleidingpaal 6/19, leek op de bodemopbouw bij het begin van de ontgraving, waarbij op circa 70 cm diepte donkergeel lemig zand is aangetroffen.

Figuur 22. *Bodemopbouw ontgraving nabij bovenleidingpaal 6/17*

Figuur 23. *Bodemopbouw ter hoogte van het midden van de ontgraving*

Direct na het plaatsen van de elementen is de onderste bodemlaag weer aangevuld en verdicht, om ontspanning van de bodem te beperken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de handmatige aanstamper die tijdens de voorproef is ontwikkeld. Er is in beperkte mate water toegevoegd. De hogere lagen zijn mechanisch verdicht met een wackerstamper, omdat het telkens aan- en afkoppelen van het hydraulische trilblok van de krol in de praktijk onpraktisch bleek.

Na aanvulling en verdichting van de ruimte aan weerszijden van de ingegraven elementen is het maaiveld vlak afgewerkt en voorzien van een nieuw schouwpad van 10 cm porfier. De ballastrand langs het werkgebied is aangevuld en afgewerkt.

Voor de inbouw van 60 meter MetaBarrier was vooraf (enigszins conservatief) op beide uitvoeringsdagen een tweetal ploegendiensten gepland (dagdienst van 7:00 tot 15:00 en avonddienst van 15:00 tot 23:00 uur). Op zaterdag 12 oktober bleek het mogelijk om circa 40 meter elementen te plaatsen. Gedurende zondag 13 oktober is gezien de voorspoedige

Figuur 24. *Aanzicht proeflocatie na plaatsing*

voortgang van de werkzaamheden geen gebruik meer gemaakt van de geplande avonddienst.

Gedurende de uitvoering hebben wij de volgende constateringen opgetekend:

- De opstart verliep moeizaam. Bij de railinzetplaats waren meerdere deelnemers aan de buitendienststelling op een beperkte werkruimte bezig om materiaal en machines in het spoor te zetten. Dit heeft enige vertraging opgeleverd.
- Gedurende de werkzaamheden moest meermaals een werkvoertuig van een andere aannemer onze werklocatie passeren. Hoewel dit vooraf bekend was, vergde de afstemming over het precieze passagemoment en de daadwerkelijke doorkomst meer tijd dan verwacht en had dit impact op de efficiëntie van de logistiek tussen onze werklocatie en ons materiaaldepot bij de railinzetplaats.
- Als gevolg van een gewijzigde ontgravingsvolgorde vormde de benodigde aanwezigheid van een voorman spoorse kabels en leidingen soms een knelpunt in de efficiëntie van de uitvoering. Met enige flexibiliteit en welwillendheid is dit in het werk opgevangen.

Voor de uitvoering is gedurende iedere dienst gebruik gemaakt van het volgende personeel en materieel:

- LLV (veiligheid van de werklocatie, begeleiden van de railvoertuigen);
- Voorman spoorse kabels en leidingen (t.b.v. voorkomen graafschade);
- Technisch Leider Baan (laatste dienst, t.b.v. verklaring veilige berijdbaarheid);
- Grondwerker/spoorlegger (4 personen);
- Projectteam (meewerkend);
- Krol (tweemaal Liebherr 924, inclusief graafbakken, hulpstukken en hijsmiddelen);
- Platte lorrie en containerbak op lorrie (aan/afvoer elementen en grond);
- Shovel (t.b.v. aan/afvoer materialen op de railinzetplaats);
- Vrachtauto en afzetcontainerbakken (t.b.v. aan- en afvoer van materialen);
- Bouwplaatsinrichting (schaftlocatie, aggregaat, verlichting, toiletvoorziening);
- Padschuif, trilblok en wackerstamper;
- Regulier handgereedschap (roterende laser, boorhamer, schep, hark, et cetera).

5.3 Resultaten

Op basis van modellering voorafgaand aan de praktijkproef - in het Eindige Elementenpakket van Phononic Vibes (bodem en situatie onbekend) - was een trillingsreducerend effect (invoegverlies) verwacht van minimaal 5 dB (variatie tussen 5 en 15 dB) voor frequenties boven de 20 Hz. In procenten is dat een effect van bijna 45 procent reductie van de trillingen.

De bodemopbouw op de proeflocatie bleek anders dan vooraf verwacht op basis van de beschikbare sonderingen in o.a. Dinoloket. Voor de MetaBarrier is een homogene zandbodem gewenst, echter tijdens de inbouw is een meer gelaagde en slappere samenstelling aangetroffen, bestaande uit leemachtige/humeuse zandlagen en een kleilaag midden in de proeflocatie. Dit is als volgt vastgesteld:

- Visuele waarneming tijdens het inbrengen van de MetaBarrier eind 2024, die we hebben vergeleken met de boringen en sonderingen in Dinoloket.
- Begin 2025 heeft Movares ter verificatie grondboringen verricht rond de proeflocatie. Hieruit blijkt een basis van siltig fijn zand (zie overwegend rechtsonder in **Figuur 25**). In enkele boorkernen zijn bovendien dunne kleilagen aangetroffen, hetgeen het beeld bevestigt van een gelaagde bodemopbouw met een grillige en plaatselijke aanwezigheid van dunne kleilagen.

Op basis van hierop aangepaste modelberekeningen werd een effect verwacht van minimaal 2.7 dB voor frequenties boven de 20 Hz (minimaal 27% reductie).

Figuur 25. *Piramide grondsoorten*

Uit de metingen van Movares is een effect van ca. 2 dB (20% reductie) zichtbaar voor frequenties boven de 20 Hz (zie **Bijlage A**). Wel is de onzekerheid in de gemeten effectiviteit relatief groot, onder meer door de invloed van:

- (1) Variaties in de spoorligging door het zetten van het relatief nieuwe spoor; kort voor de start van de metingen was een bovenbouwvernieuwing uitgevoerd.
- (2) Aanpassingen in de toplaag van de bodem op het meetterrein.
- (3) De invloed van natuurlijke variaties zoals neerslag en temperatuur.

In de resultaten van Movares is ook zichtbaar dat het effect afneemt met de afstand tot het spoor.

Onder andere vanwege bovenstaande is in samenspraak met ProRail besloten ook een modelberekening uit te voeren in STEM (zie §5.4). Ook dit model gaf een lager verwacht effect van ca. 1 dB (10% reductie). Het effect neemt licht af met de afstand tot het spoor.

5.4 Extra stap: STEM modellering

Na het ontvangen van de meetresultaten van de metingen tijdens de praktijkproef is op verzoek van ProRail besloten extra modelberekeningen te maken, met STEM (zie kader). Hier lagen 2 doelen aan ten grondslag:

1. Alsnog de onderzoeksvragen te beantwoorden die met de praktijkproef niet konden worden beantwoord.
2. Achterhalen van mogelijke oorzaken dat het effect van de MetaBarrier in de metingen lager is dan verwacht.

In een rekenmodel kan eenvoudig worden gevarieerd met bijvoorbeeld de stijfheid van bodemlagen of de aanwezigheid van sloten. Ook kan het effect van een onderbreking in de MetaBarrier veel eenvoudiger dan in de praktijk worden vastgesteld. Nadeel van een rekenmodel zoals STEM is dat het altijd een benadering van de werkelijkheid blijft. Doorgaans worden dit soort modellen dan ook vooral relatief gebruikt: de situatie met en zonder maatregel worden met elkaar vergeleken. Bij deze toepassing en met de juiste instellingen heeft een EEM-model daadwerkelijk meerwaarde en is de nauwkeurigheid van de delta hoog.

Wat is het SpoorTrillingen Emissie Model (STEM)

TNO, Deltares en TU Delft ontwikkelen STEM (SpoorTrillingen Emissie Model), waarmee het effect van ingrepen aan spoorvoertuigen, de spoorconstructie en in de bodem kan worden vastgesteld. In het model wordt de interactie tussen trein en spoor en de voortplanting van de trillingen door de bodem gesimuleerd. STEM is een open-source Eindige Elementenmodel (EEM), gebaseerd op Kratos. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van versie 1.2 van STEM (januari 2025).

Gebruikte input

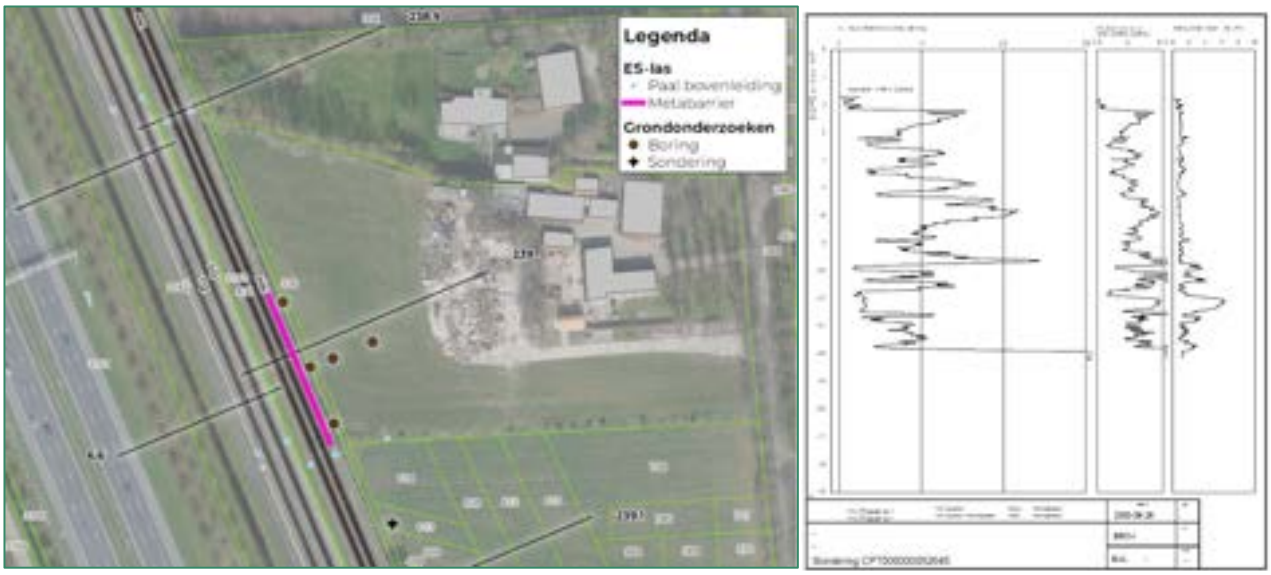
De volgende input is gebruikt om het model op te stellen:

1. Voor de opbouw van de bodem is gebruik gemaakt van de meest nabijgelegen sondering uit Dinoloket (50 meter ten zuiden van de proeflocatie) en boringen die door Movares zijn uitgevoerd, zie **Figuur 26**. De gegevens uit de sondering zijn met behulp van de CPT-tool van Deltares (methode Robertson) omgezet naar input-parameters voor het STEM-model. De parameters voor het bodemmodel zijn weergegeven in **Tabel 2**.
2. Voor de geometrie van de bodem is gebruik gemaakt van het *Algemeen Hoogtebestand Nederland versie 4* (AHN4). De bodem is vlak, het spoor ligt ca. 0,5 meter boven maaiveld (dikte ballastlaag).
3. Voor de modellering van de MetaBarrier is gebruik gemaakt van tekeningen afgestemd met de producent van de MetaBarrier. Vervolgens is de MetaBarrier gemodelleerd als een volume (betonnen U-vormig buitenelement) en een puntmassa (met eigenschappen van een EulerBeam aan veren, zie
4. **Tabel 3**). Feitelijk wordt het binnen-element behandeld als een op zijn kop hangende spoorstaaf, waarbij de eigenschappen van de railpad[2] vervangen zijn door de eigenschappen van de verende ophanging, en de eigenschappen van de rail door het betonnen binnenelement.

Tabel 2. *Gebruikte bodemeigenschappen voor de berekeningen met STEM*

Diepte	Dichtheid [kg/m³]	Dynamische E-Modulus [Pa]	Poisson's ratio [-]	Porositeit [-]
0.0 tot 1.9 m	1949	1.86E+08	0.299	0.15
1.9 tot 3.7 m	1967	2.19E+08	0.483	0.16
3.7 tot 5.7 m	1990	2.68E+08	0.495	0.17
5.7 tot 7.5 m	2037	3.44E+08	0.495	0.19
7.5 tot 9.4 m	2072	4.3E+08	0.495	0.20
9.4 tot 11.2 m	2014	3.43E+08	0.495	0.18
11.2 tot 13.1 m	1992	4.08E+08	0.495	0.17
13.1 tot 14.9 m	1896	3.14E+08	0.495	0.13
14.9 tot 16.8 m	1945	3.49E+08	0.495	0.15
16.8 tot 18.6 m	2065	5.83E+08	0.495	0.20

[2] Een railpad is een circa 5 mm dik elastisch plaatje dat wordt aangebracht tussen de spoorstaafvoet en de bedding van de dwarsligger. Een synoniem voor railpad is “beddingplaatje”.



Figuur 26. *Locatie MetaBarrier (naast spoor NK) en grondonderzoek, met rechts de gebruikte sondering*

Tabel 3. *Eigenschappen van de MetaBarrier in STEM*

Parameter	Waarde
Beton MetaBarrier	• E-modulus = 40 GPa • Dichtheid = 2350 kg/m^3 • Poisson's ratio = 0.15 • Porositeit = 0.09

Ophanging MetaBarrier	• Afstand tussen ophangingspunten = 0.5 m
	• Dikte EPS = 0.04 m
	• Stijfheid
	  ○ X = 0 N/m
	  ○ Y = 0 N/m
	  ○ Z = 0 N/m
	• Rotatiestijfheid
	  ○ X = 0 Nm/rad
	  ○ Y = 0 Nm/rad
	  ○ Z = 2.51e8 Nm/rad
	• Dempingscoëfficiënt
	  ○ X = 0 Ns/m
	  ○ Y = 0 Ns/m
	  ○ Z = 0 Ns/m
	• Rotatiedempingscoëfficiënt
	  ○ X = 0 Ns/rad
	  ○ Y = 0 Ns/rad
	  ○ Z = 2,72e3 Ns/rad

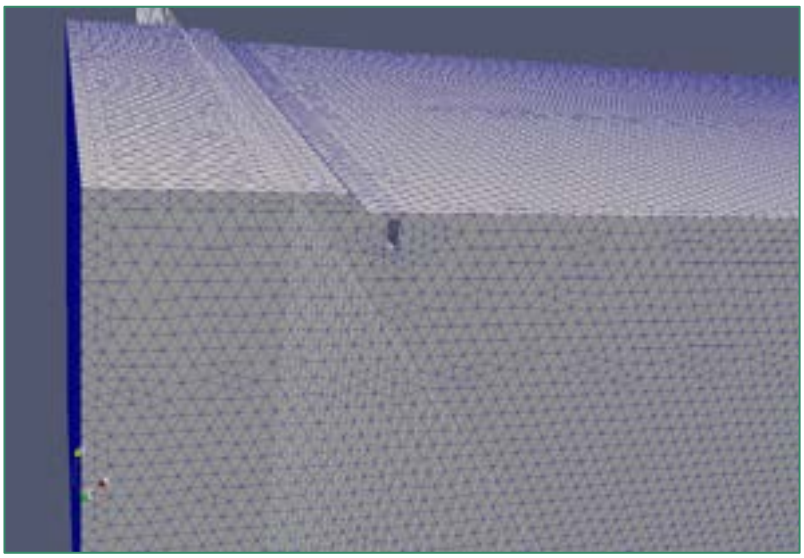
Interne massa	• Type = 3D EulerBeam • Dichtheid = 2350 kg/m^3 • E-modulus = 30e9 Pa • Poisson's ratio = 0.15 • Doorsnede = 1,15e-1 m^2 • Traagheidsmoment om y-as = 2.50e-4 m^4 • Traagheidsmoment om z-as = 5.20e-3 m^4 • Torsietraagheidsmoment = 9,80e-3 m^4

Modeleigenschappen

Voor het uitvoeren van de berekeningen, zijn de volgende parameters aangehouden, zie **Tabel 4**.

Tabel 4. *Gebruikte berekeningsparameters*

Parameter	Waarde
Type model	2,5D
Meshgrootte	0.5 meter, zie **Figuur 27**
Type belasting	UVEC (standaard voertuigmodel met moving load)
Dt	2e-4 seconden
Duur	1.25 seconden
Output	Op 8, 16, 24 en 32 meter vanaf spoor
Demping	Rayleigh demping



Figuur 27. *Afbeelding van het model, met meshgrootte zichtbaar*

Modelvarianten

Er zijn 13 modellen doorgerekend om de onderzoeksvragen te beantwoorden. De eigenschappen van de modellen zijn in **Tabel 5** weergegeven. Het standaardmodel heeft een hoogte van 15 meter, een diepte van 50 meter en een breedte van 40 meter.

Tabel 5. *Modelvarianten*

Nr.	Bodem	MetaBarrier	Bijzonderheden
0	Referentie	Geen	Geen
1	5% lagere dichtheid en 50% lagere stijfheid toplaag	Geen	Geen
2	5% hogere dichtheid en 8% hogere stijfheid toplaag	Geen	Geen
3	Referentie	Geen	Extra greppel achter geluidscherm
4	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor	Geen
5	Referentie	Standaard, 5.0m van spoor	Geen
6	Referentie	Standaard, 7.5m van spoor	Geen
7	5% lagere dichtheid, 50% lagere stijfheid toplaag	Standaard, 2.5m van spoor	Geen
8	5% hogere dichtheid, 8% hogere stijfheid toplaag	Standaard, 2.5m van spoor	Geen

Nr.	Bodem	MetaBarrier	Bijzonderheden
9	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor	Extra greppel
10	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor, 0.3m dieper	Geen
11	Referentie	1.5m-variant, 2.5m van spoor	Geen
12	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor	Onderbreking 2m[1]

Resultaten

De resultaten van de modelberekeningen zijn hieronder weergegeven voor de afstanden 8 en 24 meter van het spoor. Ook de gemeten resultaten van Movares voor treinen die het meest zijn gepasseerd op het meest nabijgelegen spoor (spoor 1 in rapport Movares, dichtst bij MetaBarrier zoals ook in modellen) worden getoond. Ook door de leverancier, Phononic Vibes, zijn EEM-berekeningen gemaakt in een 2,5D-model.

De grootste verschillen tussen de modellen van Phononic Vibes en STEM:

- STEM rekent in het tijdsdomein, Phononic Vibes in het frequentiedomein.
- STEM rekent met een moving load (in de modellen is gebruik gemaakt van het zogenaamde UVEC-model, een gesimuleerde trein), Phononic Vibes met een static load. De krachten en trillingen worden dan anders in de bodem geïntroduceerd, het kan dat de trillingen daardoor minder diep of juist dieper de bodem ingaan, waardoor het effect van de MetaBarrier anders is.
- STEM maakt gebruik van Rayleigh demping, Phononic Vibes niet.
- In STEM is het geluidsscherm niet gemodelleerd, door Phononic Vibes wel. Uit hun berekeningen komt dat het geluidsscherm zorgt voor ca. 1 tot 1,5 dB minder effect. De exacte fysische oorzaak hiervan is onbekend, maar kan ook een model artefact zijn. Het geluidsscherm heeft om de 4 meter een stalen buispaal (720 mm doorsnede) van 3,5 meter diepte, het effect op de trillingen daarvan is niet bekend.

De resultaten worden hierna weergegeven. Relevant hierbij is dat in eerste instantie alle sommen zijn doorgerekend met een relatief beperkt rekendomein (50 meter diep, 35 meter breed). In de bespreking van de resultaten noemen we dit het kleine model.

Vervolgens hebben we de input en resultaten laten controleren door Deltares. Deltares gaf aan dat er twee fouten in het model zaten:

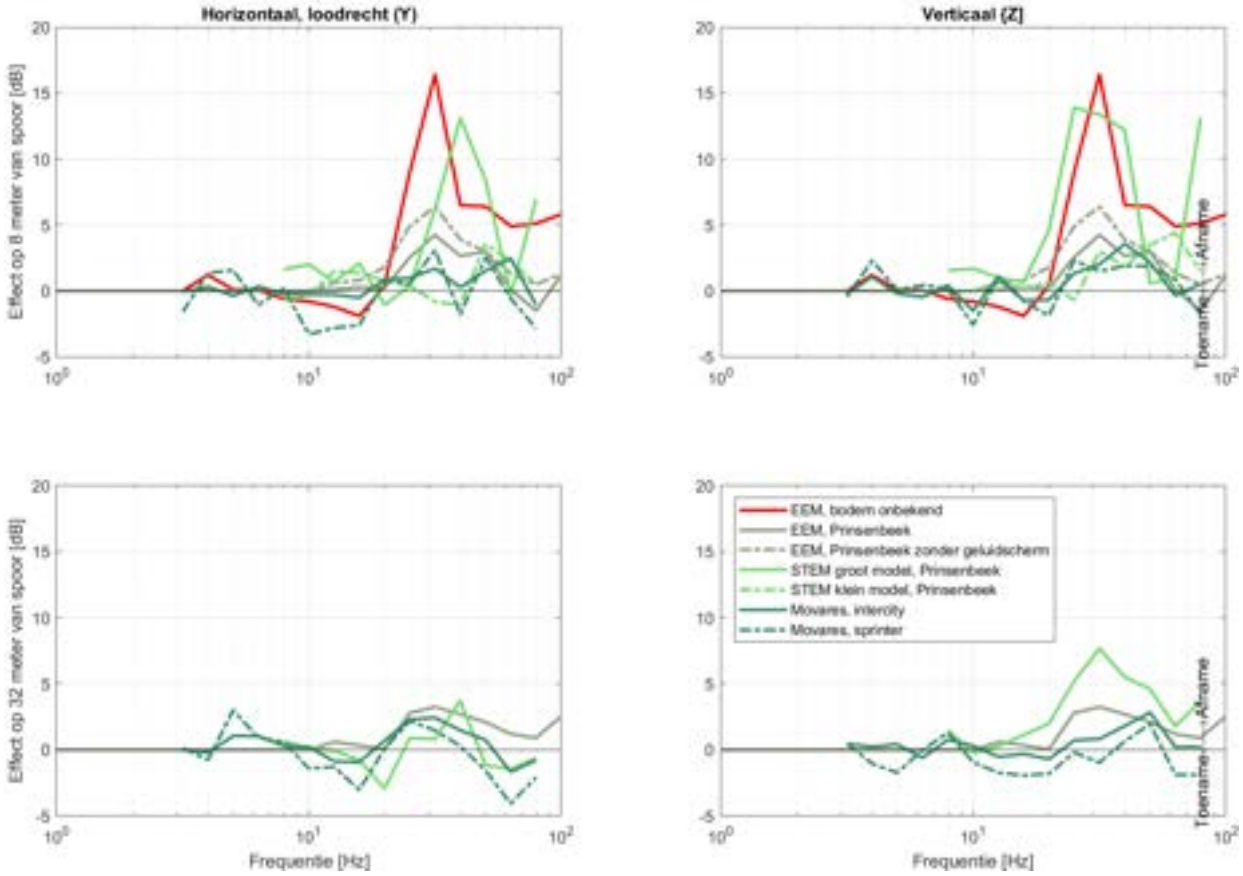
- De dichtheid van de bodem was onjuist ingevoerd (bulk density vs. solid density), waardoor met name in poreuze bodems (vooral de toplaag) er afwijkingen konden ontstaan, omdat de dichtheid in het model te laag was.
- Het model was niet symmetrisch rond de belasting-as, waar STEM impliciet wel van uitgaat.

Verder adviseerde Deltares om het treinmodel uit te breiden naar 2 wagons, spooroneffenheden toe te voegen, het rekendomein uit te breiden naar 150 tot 200 meter diepte) en te werken met absorberende i.p.v. gefixeerde domeingrenzen. Vanwege de zeer lange rekentijd (ca. 1 week per model) was het niet mogelijk om alle varianten opnieuw door te rekenen. In de bespreking van de resultaten noemen we dit het grote model.

In **Figuur 28** worden de meet- en modelresultaten vergeleken, hier valt het volgende op:

1. De resultaten uit SBIR fase 1 - zie [1] en [4] (gebaseerd op een willekeurige, stijvere bodem) - geven een fors hoger effect dan de model- en meetresultaten in Prinsenbeek. Mogelijk is het effect van de MetaBarrier groter bij een stijvere bodem, maar de exacte eigenschappen van de gemodelleerde bodem op de andere locatie zijn onbekend. Opvallend is verder dat het grote STEM-model vergelijkbare resultaten laat zien als het model op de willekeurige, stijve bodem, terwijl het kleine STEM-model resultaten geeft die meer vergelijkbaar zijn met de meetresultaten. De oorzaak hiervan is vooralsnog onbekend.
2. Zowel de meet- als modelresultaten laten effect zien vanaf 20 tot 25 Hz, en daaronder geen of een licht negatief effect (toename van de trillingen, m.n. tussen 10 en 20 Hz).
3. Op sommige afstanden lijken de meetresultaten meer op de modelresultaten van STEM, op andere afstanden juist weer meer op het EEM-model van Phononic Vibes. Generiek geldt dat het EEM-model het effect tussen 20 en 40 Hz overschat, terwijl het kleine STEM-model het effect lijkt te onderschatten en het grote STEM-model het effect juist lijkt te overschatten.
4. In het EEM-model heeft het geluidscherm een negatief effect op de trillingen; oftewel zonder geluidscherm zou het effect van MetaBarrier mogelijk groter zijn. Dit effect is niet met STEM of metingen vastgesteld, het is onbekend of dit een modelmatig artefact is of niet.

Conclusie: Het effect van de MetaBarrier op de bodem in Prinsenbeek is naar verwachting kleiner dan op stijvere bodems. Verder geldt dat de STEM-modellen gevoelig lijken te zijn voor onder meer de domeingrootte, en het effect zowel kunnen overschatten als onderschatten, terwijl de EEM-modellen van Phononic Vibes het effect overschatten. Er is dus (nog) geen goed EEM-model waarbij de resultaten naadloos aansluiten bij de werkelijk gemeten effecten.

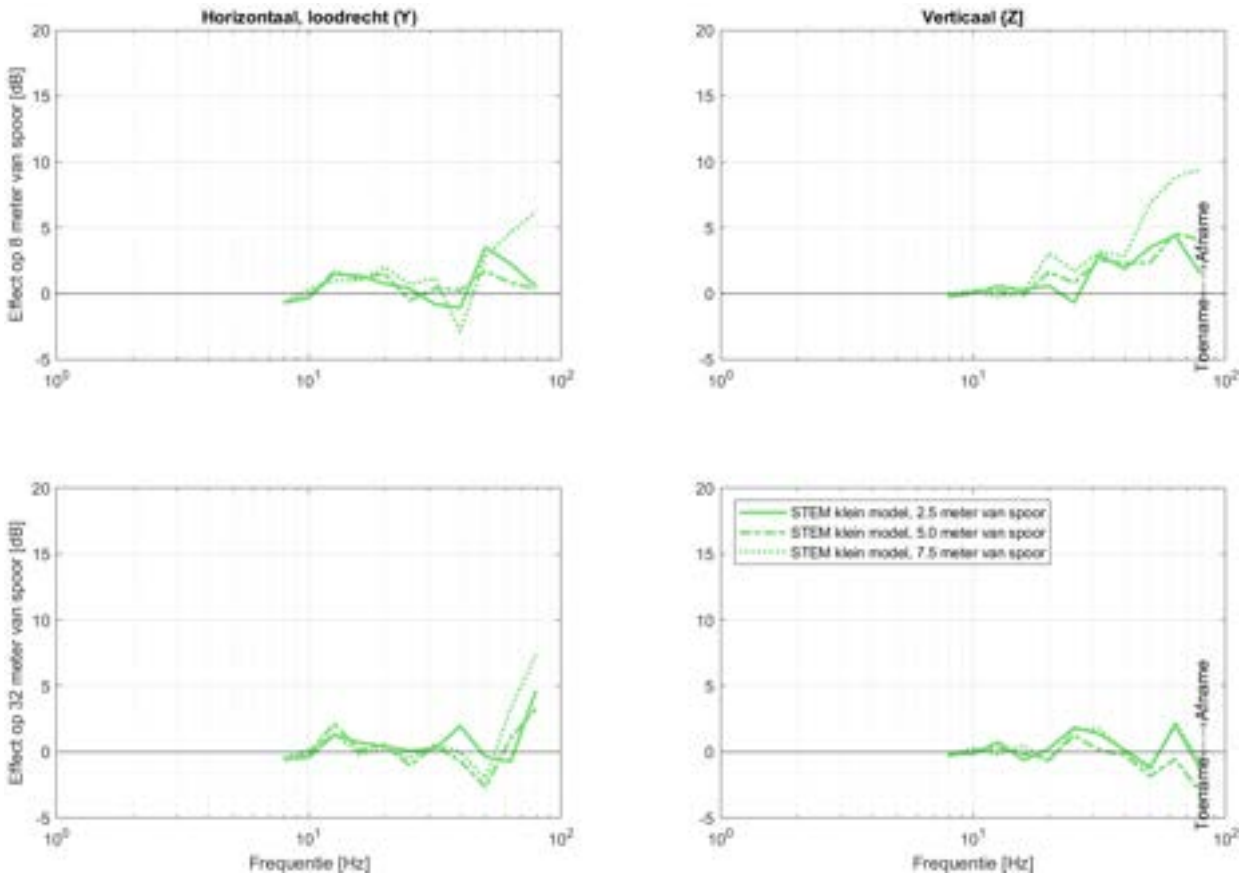


Figuur 28. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor. Vergelijking tussen het EEM-model van Phononic Vibes, het STEM-model en de meetresultaten.*

In **Figuur 29** vergelijken we (in STEM) het effect van de MetaBarrier op verschillende afstanden van het spoor. Hier valt het volgende op:

1. Op het meetpunt op 8 meter zien we dat, vooral in verticale richting, het effect van de MetaBarrier toeneemt. Dat komt vooral omdat de MetaBarrier dichter bij dit meetpunt komt te liggen, waardoor de afschermhoek groter wordt.
2. Op 32 meter afstand zien we het verwachte effect, namelijk een afname van het effect naarmate de MetaBarrier verder bij het spoor vandaan staat, maar het effect is beperkt.

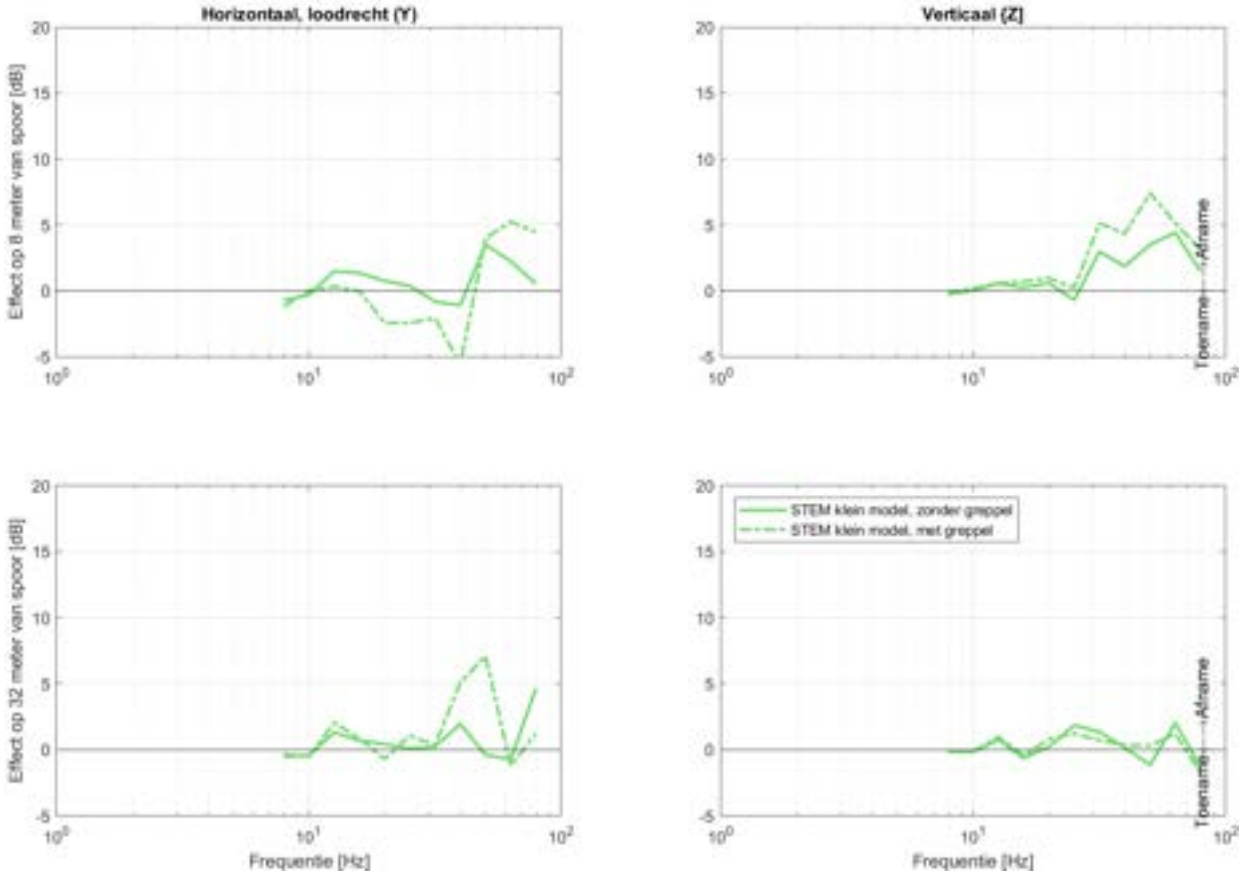
Conclusie: Het effect van de MetaBarrier dichtbij het spoor is naar verwachting groter dan op grotere afstand van het spoor.



Figuur 29. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor, voor verschillende afstanden tussen MetaBarrier en meest nabijgelegen spoor*

In een deel van het onderzoeksgebied was een (ondiepe) greppel aanwezig achter het geluidscherm. Ook het effect hiervan is berekend met behulp van STEM, zie **Figuur 30**. Er is geen duidelijk effect van de greppel waarneembaar in de berekeningsresultaten: op sommige afstanden is het effect positief (trillingsreducerend), op andere afstanden negatief (trillingsverhogend): op 8 meter afstand zien we bij de horizontale trillingen bijvoorbeeld een tegengesteld effect van de greppel ten opzichte van de verticale trillingen.

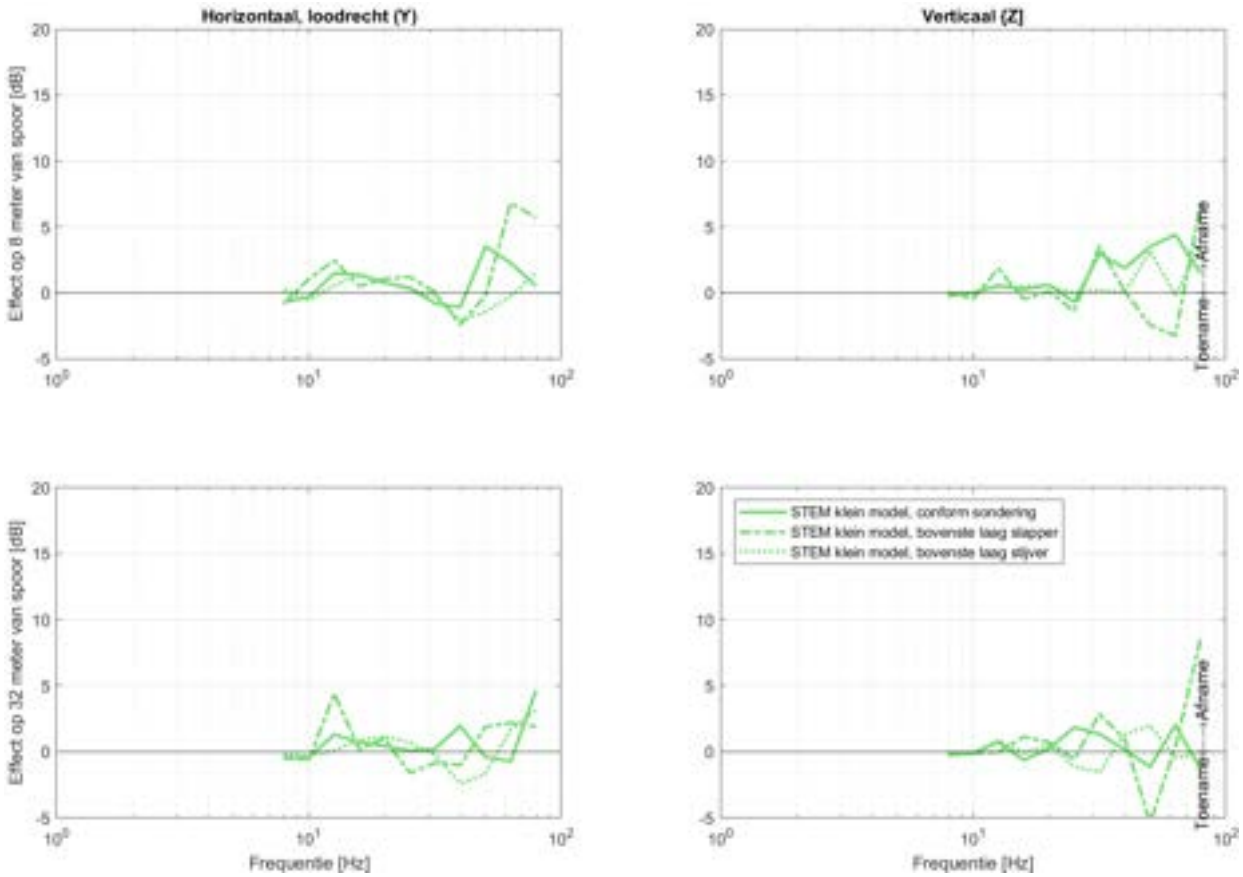
Conclusie: Een ondiepe greppel heeft geen duidelijk (positief of negatief) effect op de werking van de MetaBarrier.



Figuur 30. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor, situatie met en zonder greppel*

Vervolgens is ook gekeken naar verschillende bodemtypes, waarbij de stijfheid van de toplaag is gevarieerd. De initiële verwachting was dat een slappere bodem voor minder effect van de MetaBarrier zou zorgen. Dit is in de STEM-resultaten ook wel terug te zien, maar niet zo duidelijk als verwacht, zie **Figuur 31**. Een stijvere toplaag daarentegen laat geen significante andere effecten van de MetaBarrier zien. Beperking is dat in de modellen alleen de toplaag is gevarieerd, en niet het hele bodempakket. Relevant hierbij is ook nog dat de bodemopbouw in het proefgebied niet homogeen was. Zo was de diepte van het gele zand in het midden van het proefvak groter dan bij de uiteinden, zie paragraaf 5.2. Dat betekent dat het bodempakket in het model afwijkt van wat in werkelijkheid aanwezig was. De invloed van deze inhomogeniteit is niet onderzocht.

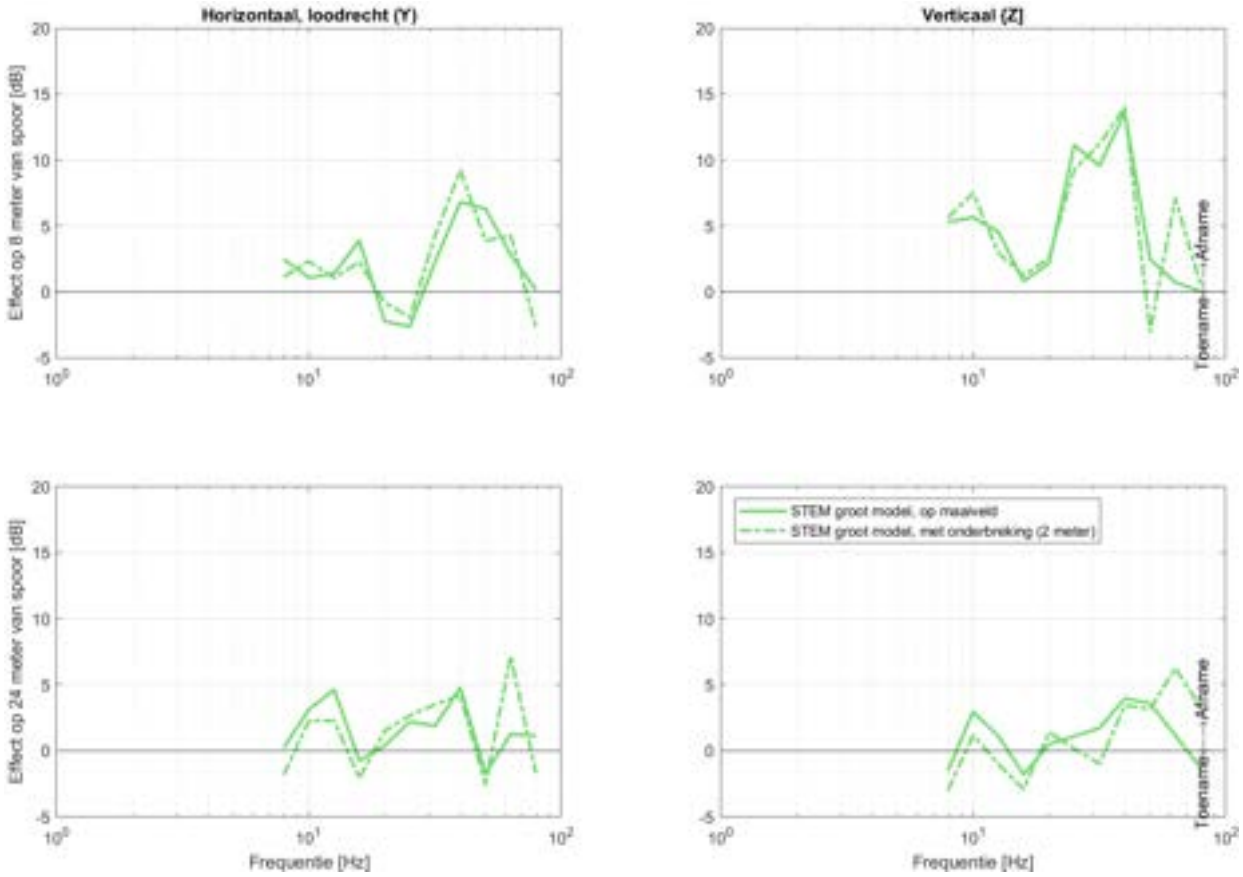
Conclusie: Op basis van de berekeningen lijkt de toplaag zelf geen duidelijk effect te hebben op het effect van de MetaBarrier. Mogelijk dat een compleet stijvere of slappere bodem een duidelijker effect heeft, of een inhomogene bodem



Figuur 31. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor, effect van andere toplaag*

Bij plaatsing van de MetaBarrier onder het schouwpad, zijn onderbrekingen nodig ter plaatse van de fundering van de bovenleidingpalen of voor doorvoer van kabels en leidingen. In STEM is daarom een model gemaakt waarbij een onderbreking aanwezig is van 2 meter (1 blok van de MetaBarrier verwijderd). De verwachting is dat dit leidt tot een kleiner effect van de MetaBarrier; oftewel minder invoegverlies. In STEM is echter geen duidelijk effect te zien van zo'n onderbreking, het invoegverlies is vergelijkbaar met dat van een doorgaande MetaBarrier, zie **Figuur 32**).

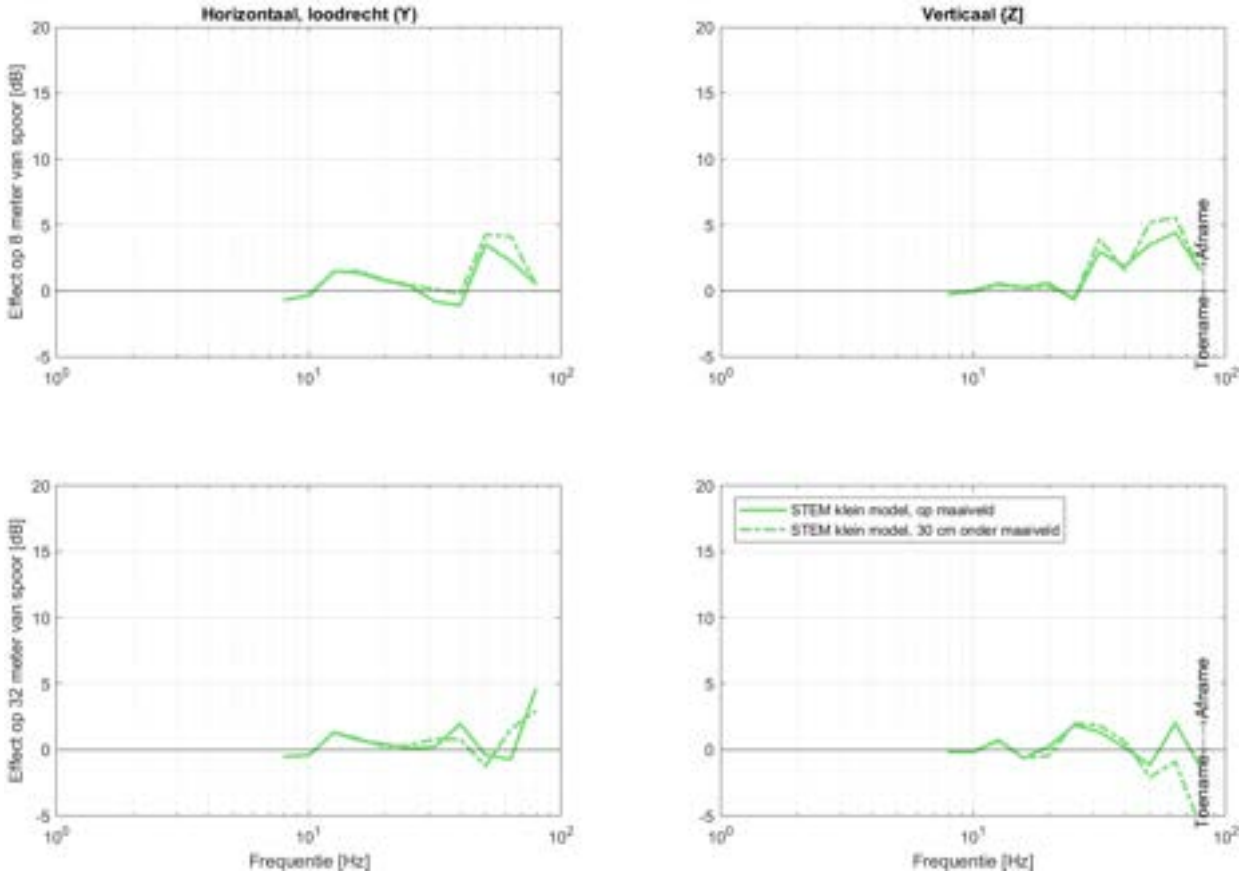
Conclusie: Volgens de EEM-berekening lijkt een beperkte onderbreking in ieder geval geen negatief effect te hebben op de werking van de MetaBarrier.



Figuur 32. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 24 meter (onder) van het spoor, effect van onderbreking*

Verder is onderzocht wat het effect is van een (beperkte) grondlaag boven op de MetaBarrier. Dit heeft twee gevolgen: een deel van de trillingen (korte golven, aan de oppervlakte) kan in theorie over de MetaBarrier heen (ongunstig effect), terwijl anderzijds de langere trillingsgolven wat sterker worden gedempt omdat de MetaBarrier dieper ligt. In STEM is dit met een rekenmodel onderzocht. In **Figuur 33** is te zien dat deze toplaag vrijwel geen effect heeft op het effect van de MetaBarrier. Het effect van de MetaBarrier lijkt iets groter (meer invoegverlies) als deze - met dezelfde hoogte - dieper wordt geplaatst.

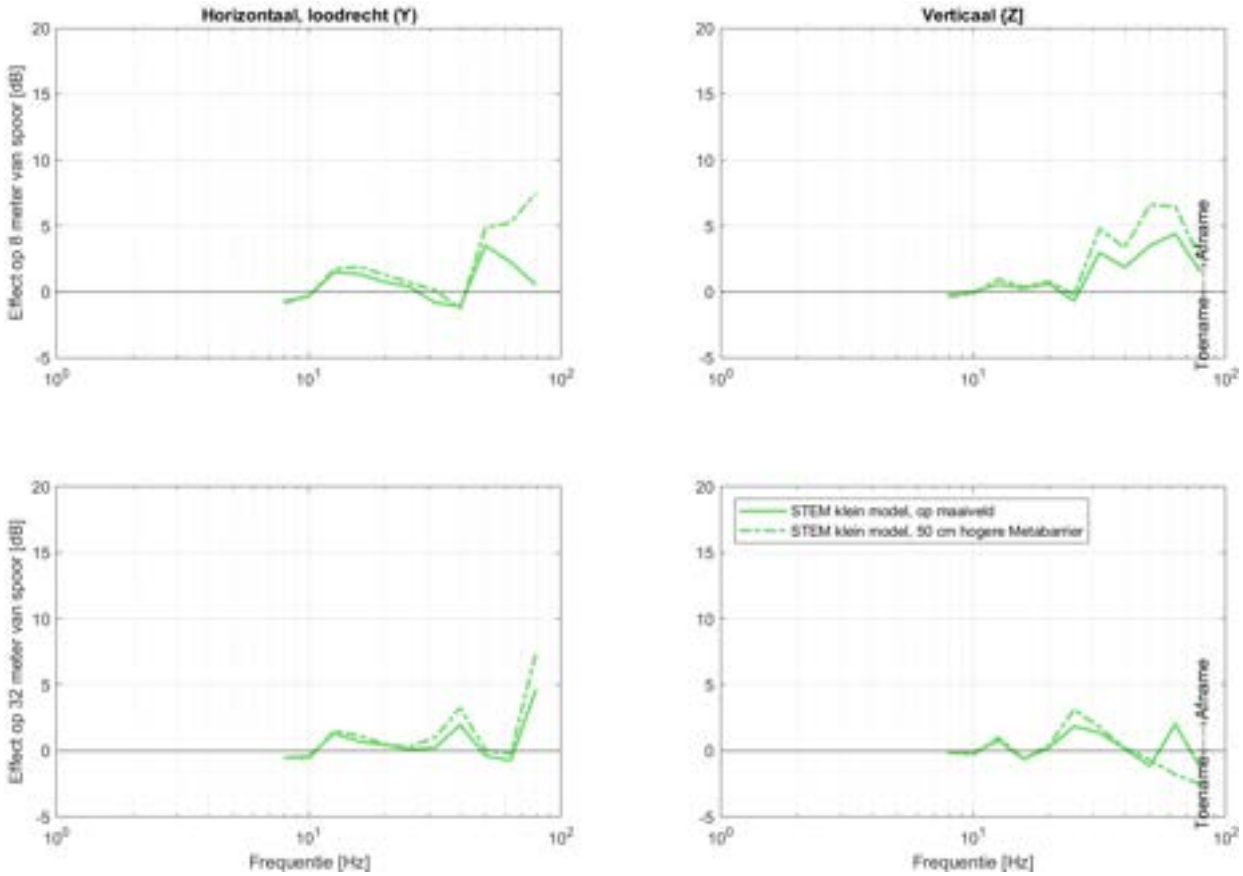
Conclusie: Een toplaag van grond op de MetaBarrier heeft geen negatief effect op de werking, mits deze laag niet te dik is. Een dikte van maximaal 30 cm heeft in ieder geval geen negatief effect.



Figuur 33. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor, effect van grondlaag op MetaBarrier*

Tenslotte is onderzocht wat het effect is van modificaties van de afmetingen van de MetaBarrier. Hierbij is een model onderzocht waarbij de zijwanden van de MetaBarrier met 50 cm worden verlengd, en ook het binnendeel met 50 cm wordt verlengd. De verwachting is dat dit leidt tot een groter effect op de trillingen; oftewel meer invoegverlies. In STEM is dit met een rekenmodel onderzocht. In **Figuur 34** is te zien dat het effect inderdaad groter is, maar dat het effect beperkt is tot 1 à 2 dB bij hogere frequenties. Op grotere afstand is het effect nihil.

Conclusie: Een hogere MetaBarrier heeft meer effect dan de standaardvariant, omdat een groter deel van de trillingen wordt gedempt. Het effect is vooral zichtbaar op korte afstand van de MetaBarrier.



Figuur 34. *Effect van de MetaBarrier op 8 (boven) en 32 meter (onder) van het spoor, effect van 50 cm hogere MetaBarrier*

Overkoepelende conclusie: Samengevat geldt dat het effect van de MetaBarrier in EEM-modellen (zowel het model van Phononic Vibes als het STEM-model) andere resultaten geeft dan de gemeten effectiviteit door Movares. Beide modellen zijn geschikt om een indicatieve voorspelling te doen van het effect van de MetaBarrier, maar kennen een relatief grote onzekerheid. Daarom advies om voorzichtig te zijn met conclusies verbinden aan de uitkomsten; een vergelijking met meetresultaten in het veld is aanbevolen om de juiste instellingen (ten aanzien van o.a. bodemeigenschappen, modelafmetingen en mesh size) en interpretatie van de modelberekeningen te bepalen.

5.5 Spoorligging en baanlichaam

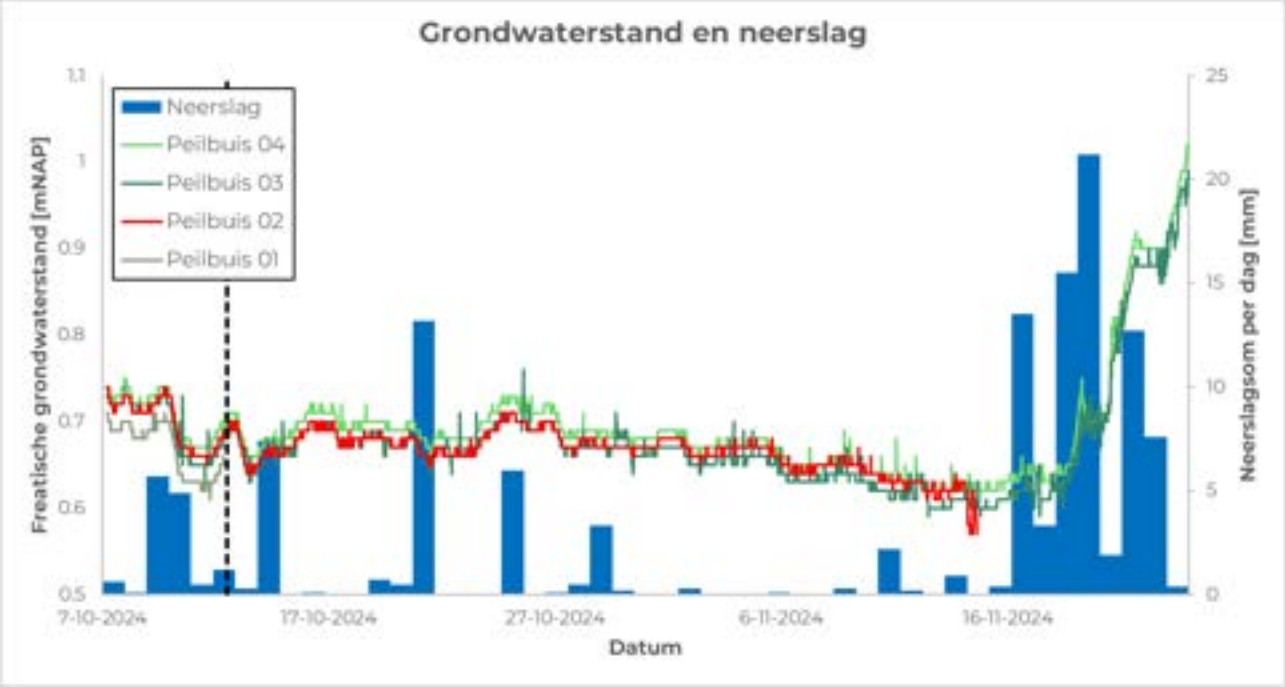
Ingenieursbureau IV-infra heeft voorafgaand, tijdens en na de inbouwperiode metingen verricht op het gebied van de spoorgeometrie. IV-infra heeft de volgende metingen gedaan:

- Automatisch monitoring met tachymetrie van de spoorgeometrie, stand van bovenleidingpalen en het geluidscherm;
- Monitoring van de grondwaterstand met 4 peilbuizen;
- Monitoring van de blinde vering van de spoorconstructie.

De conclusies van IV-infra, overgenomen uit hun rapportage (zie **Bijlage B**):

- "*Gedurende de monitoringsperiode zijn de toegepaste grenswaarden niet overschreden. Er zijn tijdens het uitvoeren van de automatische metingen geen noemenswaardige vervormingen geconstateerd.*"
- "*Er is een toename in de waterstand te zien vanaf 18 november 2024.*" *
- "*Naast de tachymetrische monitoring is de blinde vering gemonitord met 40 sensoren gedurende 1 maand. Hierbij zijn geen bijzonderheden geconstateerd.*"

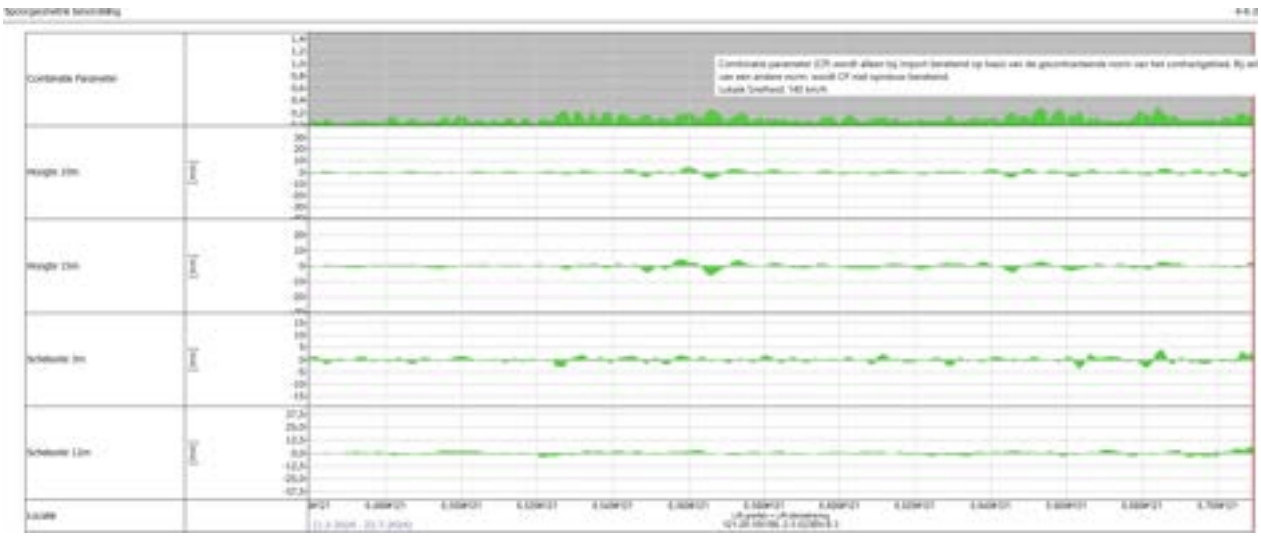
** Opmerking over de gepeilde grondwaterstand: in de meetwaarden van IV-infra zien wij (behoudens normale fluctuaties) geen wezenlijk afwijkend verloop van de grondwaterstand. De door IV-infra benoemde toename vanaf 18 november 2024 (5 weken na het uitvoeringsmoment) lijkt neerslag-gerelateerd, ter illustratie zijn onderstaand de meetresultaten van de peilbuizen van IV-Infra uitgezet tegen de neerslaggegevens van het KNMI (meetstation Gilze-Rijen). Als de peilbuizen voor en achter de MetaBarrier (peilbuis 04 en peilbuis 03) worden vergeleken, is geen verandering in de grondwaterstand t.g.v. plaatsing van de MetaBarrier zichtbaar. Ook niet in periodes van verhoogde neerslag, zoals aan het einde van de meetperiode. Er zijn daarom geen aanwijzingen dat de MetaBarrier invloed heeft op ophoping van neerslag in het ballastbed, of op de grondwaterstand.*



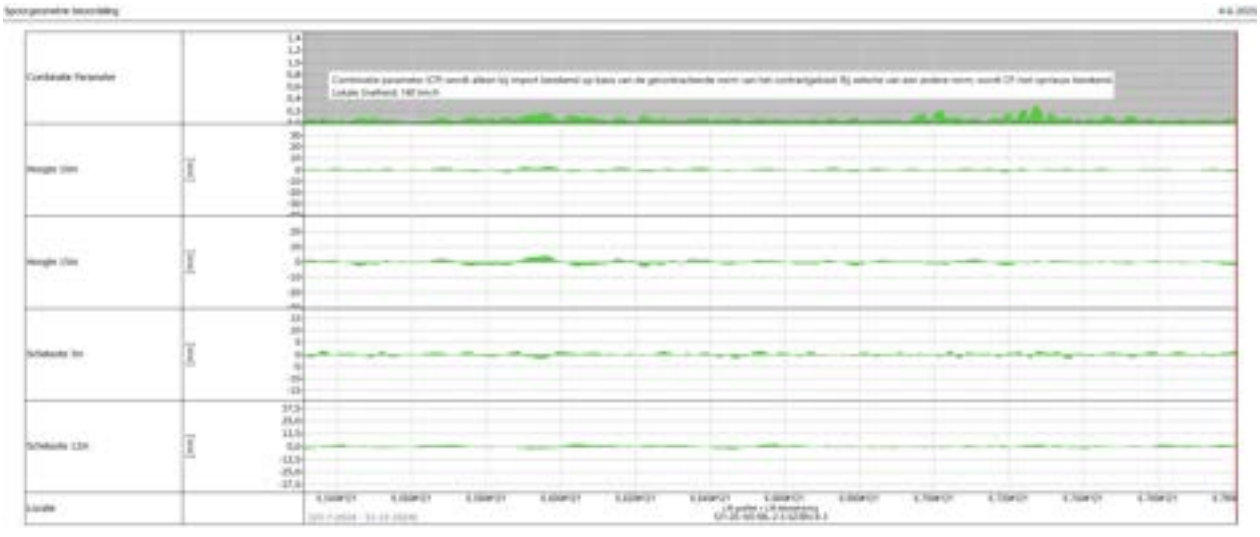
Figuur 35. *Meetresultaten peilbuizen (IV-Infra) versus neerslag oktober en november 2024 (bron: KNMI)*

Uit metingen van de spoorgeometrie door de UFM-meettrein van ProRail (zie onderstaande figuren) blijkt:

- De spoorgeometrie ligt op al de parameters zeer ruim binnen de onderhoudsnorm, zowel voor als na de inbouw van de MetaBarrier. De 'uitslagen' zijn zeer gering.
- De metingen in de meetcampagnes voorjaar 2024, najaar 2024 en voorjaar 2025 tonen nauwelijks verschillen en bevatten geen opvallende zaken. Heel generiek beschouwd is er vanaf najaar 2024 veelal een minimale, lichte 'afvlakking' van een aantal pieken en dalen. De interpretatie is dat dit de positieve impact van de spoorvernieuwing van augustus 2024 kan zijn, waarbij immers het ballastbed is vervangen en onderstopt en derhalve de spoorligging een 'correctie en reset' heeft ondergaan.
- Het spoor naast de positie van de MetaBarrier elementen toont eenzelfde soort variaties in spoorgeometrie parameters als de (nabije) spoorgedeelten waar geen MetaBarrier elementen aanwezig zijn.
- Belangrijke liggingsparameters als Hoogte, Scheluwte en Combinatieparameter geven geen uitslagen die in verband kunnen worden gebracht met de werkzaamheden van inbouw van de MetaBarrier,



Figuur 36. *Spoorgeometrie Voorjaar 2024 (bron: ProRail BBMS)*



Figuur 37. *Spoorgeometrie Najaar 2024, de meting is naar verwachting omstreeks 10 oktober uitgevoerd (bron: ProRail BBMS)*

Figuur 38. *Spoorgeometrie Voorjaar 2025 (bron: ProRail BBMS)*

Ons team heeft eveneens geen noemenswaardige vervormingen van de spoorgeometrie geconstateerd en geen blinde vering waargenomen. Visueel is geen verzakking of verandering van de spoorgeometrie opgetreden. Voor, tijdens en na de inbouw van de MetaBarrier liet de GIS-omgeving met de meetresultaten van IV-infra geen bijzonderheden zien.

De bevindingen uit de monitoring van de proeflocatie Breda Prinsenbeek bevestigen:

- De verwachting van geen noemenswaardige zettingen in baan of spoor vanwege het werken (vlak) buiten de theoretisch aangenomen drukzone van het spoor.
- De verwachting dat het kortdurend ontgraven en dus zeer tijdelijk en onder specifieke omstandigheden creëren van een sleuf onder de zijkant van het schouwpad en het goed, laagsgewijs verdicht achterlaten van de grond nabij de MetaBarrier voldoet.
- De bevindingen van de voorproef te Oosterhout (paragraaf 4.5) waar eveneens geen afwijkingen in de spoorgeometrie zijn geconstateerd.

Conclusie: De werkmethode voor het aanbrengen van de MetaBarrier voldoet en heeft geen ongunstige effecten gehad op de spoorgeometrie en de ligging van het baanlichaam. De MetaBarrier kan onder vergelijkbare omstandigheden zonder nadelige invloed op de stabiliteit van de spoorconstructie worden ingebouwd onder het schouwpad van een bestaande spoorlijn.

6. EVALUATIE RESULTATEN

6.1 Beantwoording van de drie onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag 1. Wat is het trillingsreducerende effect van de MetaBarrier bij toepassing in een Nederlandse Spoorzone?

Deze onderzoeksvraag is opgesplitst in 3 subvragen. Subvraag 1a geeft antwoord op de hoofdvraag. Vervolgens zijn twee varianten op de toepassing in vraag 1a onderzocht:

- In vraag 1b toepassing van dezelfde constructie, maar dan dieper in de grond
- In vraag 1c toepassing van dezelfde constructie, maar dan met een onderbreking. Dit om te bepalen of 'trillingsgaten' ontstaan bij portalen, alwaar bij voorkeur geen barrier wordt toegepast vanwege de aanwezig fundering.

Subvraag 1a: Welke trillingsreducerende werking heeft de MetaBarrier in de Nederlandse spooromgeving?

Hypothese: Uit praktijkproeven in Italië en Duitsland volgt dat de MetaBarrier vooral voor een afname van de trillingen vanaf ±12,5 Hz zorgt (zie bijlage A-1 en A-2 in [1]*). Onze aanname is dat het trillingsreducerende effect in Nederland groter is, omdat de MetaBarrier dichter bij het spoor wordt geplaatst en de trillingsgolven zo dichter bij de bron worden afgevangen en gereflecteerd.*

Evaluatie van de resultaten

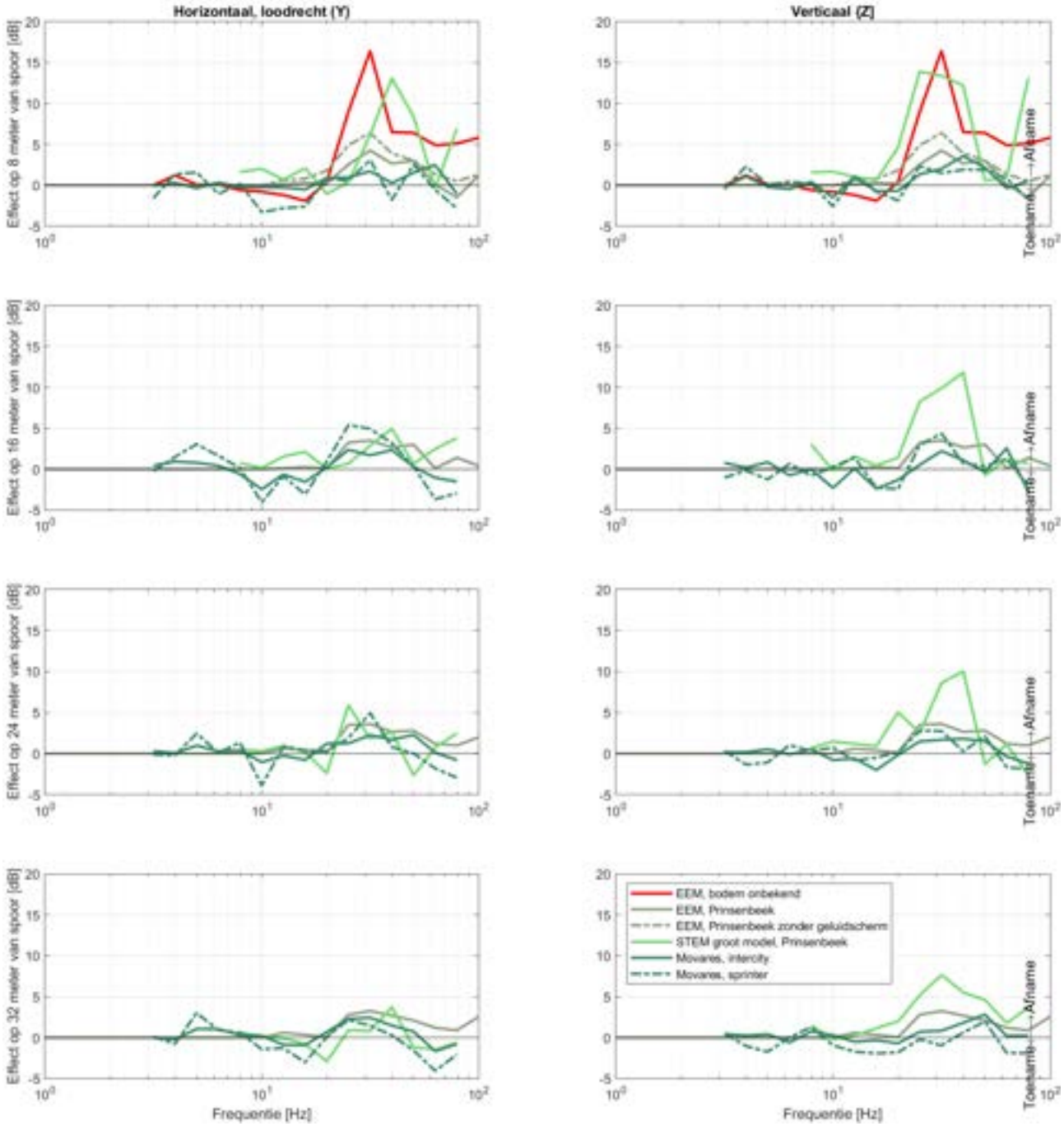
Het effect van de MetaBarrier - zoals bepaald met modellen en metingen - is voor verschillende afstanden weergegeven in **Figuur 39**. Vanuit deze figuur kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het oorspronkelijk verwachte effect (rode lijn, minimaal 5 dB reductie vanaf ca. 12.5 Hz) wordt niet gehaald:
    - Het oorspronkelijk verwachte effect was op basis van modelberekeningen en metingen op een stijvere bodem.
    - In aangepaste modelberekeningen voor de daadwerkelijke bodem op de proeflocatie, volgde al een lager effect (minimaal 2.7 dB reductie vanaf ca. 20 Hz). Deels (1-2 dB van dit lagere effect) komt dit in de modelberekeningen door de fundering van het geluidscherm, die al een deel van de trillingen tegenhoudt, waardoor het effect van de MetaBarrier kleiner is.
    - In de metingen op de proeflocatie volgde een nog iets lager effect (ca. 2 dB reductie vanaf 20 Hz).

  Het effect is op deze locaties dus lager dan verwacht, en treedt ook pas op vanaf hogere trillingsfrequenties.
- Op basis van de uitgevoerde modelberekeningen zou het effect groter moeten zijn dan in de praktijk gemeten. Een mogelijke oorzaak hiervan is de slappere, sterker gelaagde en niet-homogene bodem in Prinsenbeek. De effectiviteit van de MetaBarrier neemt hierdoor af, omdat de trillingen door deze bodemopbouw grotere golflengtes hebben (en dus meer onder het scherm doorgaan) en omdat er meer reflectie is van de trillingen tegen dieper gelegen bodemlagen. Ook houden de funderingspalen van het nabijgelegen geluidscherm een deel van de trillingen tegen. Hierdoor zijn de trillingen bij de referentiemeting van Movares ook deels gereduceerd, waardoor het gemeten effect van de MetaBarrier kleiner is dan in de situatie zonder funderingspalen.
- De metingen kennen daarnaast een relatief grote onzekerheid, door:

- Variaties in de spoorligging door het zetten van het relatief nieuwe spoor (twee maanden voor start metingen was een bovenbouwvernieuwing uitgevoerd).
- Aanpassingen in de toplaag van de bodem op het meetterrein.
- De invloed van natuurlijke variaties zoals neerslag en temperatuur. Hiervoor is door Movares niet gecorrigeerd, maar de invloed hiervan lijkt beperkt.

- Het dichter bij het spoor plaatsen van de MetaBarrier is alleen met behulp van modelberekeningen onderzocht, en lijkt een beperkt gunstig effect op het trillingsreducerende effect van de MetaBarrier te hebben.



Figuur 39. *Effect op horizontale (links) en verticale trillingen (rechts) op verschillende afstanden. Vergelijking tussen metingen en modelberekeningen.*

Samengevat geldt dat de hypothese dat het effect groter is bij plaatsing dichter op het spoor niet wordt ontkracht door dit onderzoek. Ondanks dat de bodemsamenstelling geen voorwaarde was in de oorspronkelijke hypothese, blijkt deze wel effect te hebben op het trillingsreducerende effect. Door de verschillen tussen de trillingsmetingen en de EEM-modelberekeningen kan de hypothese op basis van de praktijkproef niet worden bevestigd. Het huidige onderzoek - zowel de metingen als de modelberekeningen - geeft wel aan dat (1) de invloed van de bodem op de werking van de MetaBarrier groot is, en (2) dat dichter bij het spoor plaatsen maar een beperkte invloed heeft op het effect van de MetaBarrier.

Subvraag 1b: Welke invloed heeft de diepte van het blok op het trillingsreducerende effect?
Hypothese: Onze aanname is dat - bij gelijkblijvende dimensies van de elementen - een diepere ligging een negatief effect heeft op de trillingsreductie op maaiveldniveau. Dit omdat er meer bodemmateriaal boven de elementen ligt, waar trillingen zich doorheen kunnen bewegen; er ontstaat als het ware een lek aan de bovenzijde.

Evaluatie van de resultaten
Dit is berekend in een STEM-model, waarbij het relatieve verschil is bepaald tussen twee situaties, waarbij de overige parameters gelijk zijn gehouden. Uit de resultaten is daarom enkel te zeggen of er een effect is, zonder kwantificering van het exacte effect. De twee situaties zijn (1) de MetaBarrier op de hoogte zoals in de praktijkproef (met een dunne laag porfier van circa 10 cm erop) en (2) de MetaBarrier 30 centimeter dieper met op de MetaBarrier een laag aarde.

Uit de modelberekeningen in STEM blijkt dat het dieper plaatsen van de MetaBarrier geen significant effect heeft op de werking van de MetaBarrier. Sterker, dieper plaatsen heeft juist een licht positief effect. Waarschijnlijk is het effect van een trillingslek aan de bovenzijde kleiner dan het effect van het sterker afschermen van de (dieper door de bodem gaande) trillingsgolven. Hierbij speelt wellicht ook een rol dat de maatgevende Rayleigh-golven in verticale richting niet op maaiveld maatgevend zijn, maar vaak op iets meer diepte. Die worden door een dieper geplaatste MetaBarrier sterker tegengehouden.

Samenvattend geldt dat het dieper plaatsen van de MetaBarrier (met een laag grond er overheen) geen negatieve impact lijkt te hebben op de werking van de MetaBarrier. Waarbij wordt aanbevolen het STEM-model uitgebreider te gebruiken en valideren om het effect beter te kunnen kwantificeren.

Subvraag 1c: Welke invloed hebben onderbrekingen in de MetaBarrier op het trillingsreducerende effect?
Hypothese: Bij geluidschermen is bij onderbrekingen in het scherm sprake van een lek, doordat je bij geluid te maken hebt met korte golven. In standaardsituaties kan een onderbreking ter grootte van circa een halve golflengte van de trillingsgolven voor problemen zorgen. Bij 10 Hz in een zandbodem (schuifgolfsnelheid $C_{Ryleigh}$ = 150 m/s) is dat 7.5 meter, bij 20 Hz 3.75 meter en bij 30 Hz 2.5 meter. Onze hypothese is dat een onderbreking tot 3,0 meter het trillingsreducerende effect van het scherm minimaal tot niet vermindert.

Evaluatie van de resultaten
Oorspronkelijk was het idee om dit te toetsen in de praktijk, door een element te verwijderen en de trillingen voor en na het verwijderen van dit blok te bepalen. Omdat het effect van de MetaBarrier lager was dan beoogd en er veel variatie zat in de trillingsmetingen, is besloten het effect met een EEM-model (STEM) door te rekenen. De verwachting is dat, gezien het relatief

beperkte effect en de relatief grote onzekerheid in de metingen, het effect van een onderbreking onvoldoende nauwkeurig kon worden vastgesteld. Daarom is een model gemaakt van de situatie met en zonder onderbreking. In het model met onderbreking is één van de elementen (2 meter lang) verwijderd, zodat een onderbreking van 2 meter ontstaat, representatief voor een onderbreking rond een kabeldoorvoer. Rond bovenleidingportalen is een grotere onderbreking (ca. 3,5 tot 4 meter) nodig, dit is niet onderzocht.

Opvallend genoeg volgt uit de STEM-berekeningen dat het effect van de MetaBarrier *groter* is bij een onderbreking dan zonder onderbreking. Onduidelijk is hoe dit komt, of dit een modelmatig artefact is (mesh te grof, fout in rekenmodel, …) of dat interferentie van trillingsgolven zorgt voor een groter dan verwacht effect bij deze onderbreking. Om dit verder te verifiëren kan (1) meer in detail worden ingezoomd op de trillingsbeelden vanuit STEM of (2) een gedetailleerder model worden gedraaid met een fijnere mesh.

Samenvattend geldt dat er geen negatieve impact met de modelberekeningen is vastgesteld van een beperkte onderbreking in de MetaBarrier. Het wordt aanbevolen met STEM nader te onderzoeken vanaf lengte van de onderbreking het trillingsreducerende effect wel minder wordt.

Onderzoeksvraag 2. Wat is de beste uitvoeringsmethode om de MetaBarrier langs het spoor te realiseren?

Hypothese: De proefinbouw van 60 m' MetaBarrier past in een GIO (grootschalige infra-onttrekking) van 52 uur, waarin wij meeliften met een derde partij of zelf WBI-houder zijn. We zijn tevreden als de installatie binnen de gestelde tijdsduur van de BD en zonder wezenlijke neveneffecten heeft plaatsgevonden. Het inzicht in (nadelige) effecten na installatie is input voor de doorontwikkeling van de uitvoeringsmethode van de MetaBarrier na fase 2. Voorbeelden zijn de mate van afkalving van de sleufranden, eventuele aantasting van het ballastbed of issues met het zo vlak mogelijk onderling verbinden van MetaBarrier-elementen.

Resultaten

Uit de praktijkproef blijkt dat de inbouw van 60 meter MetaBarrier uitstekend mogelijk is binnen een tijdsbestek van drie diensten van 8 uur. Dit is sneller dan oorspronkelijk voorzien. De inbouw zou zelfs nog iets vlotter zijn verlopen, wanneer er minder verstoring was geweest vanuit andere partijen binnen de GIO (passage van werkvoertuigen, opstopping bij de railinzetplaats). Anderzijds zijn er bij deze proefinbouw geen wezenlijke technische verstoringen opgetreden die zouden leiden tot meer tijdsbesteding (denk aan defect materieel, graafschade of onverwachtse bodemvondsten). Dergelijke tegenvallers zijn bij grootschaliger toepassing nooit geheel uit te sluiten.

Tijdens en na de inbouw van de MetaBarrier zijn geen nadelige effecten opgetreden op de spoorconstructie en is geen schade ontstaan aan het ter plaatse aanwezige kabeltracé. Door de gekozen werkmethode voor ontgraving en de relatief korte opentijd van de sleuf is geen instabiliteit van het baanlichaam opgetreden. Ook zijn de sleufwanden stabiel gebleven tijdens de uitvoering, zelfs als de graafmachines zich begeven direct naast de openliggende ontgraving. Een en ander wordt bevestigd door de resultaten van de monitoring die IV-infra heeft uitgevoerd ten aanzien van de ligging en stabiliteit van de spoorconstructie tijdens en in de periode na inbouw.

Als gevolg van de plaatsing onder het schouwpad, zo dicht mogelijk bij het spoor, is enige ballast van de ballastkop verdwenen tijdens het maken van de ontgraving. Het optrekken van de ballastkop bleek onvoldoende te zijn om dit volledig te voorkomen. Enige aanvulling van (de teen

van) het ballastbed is bij deze plaatsing benodigd. Indien de ligging van het kabeltracé het mogelijk maakt om de MetaBarrier midden onder, of aan de buitenzijde van het schouwpad te positioneren, is aantasting van het ballastbed niet te verwachten.

Aanbevolen wordt om de ontgraving en plaatsing van de elementen in werkvakken van telkens enkele tientallen meters te realiseren. Dit bevordert een volkomen vlakke sleufbodem en daardoor spleetvrije aansluiting tussen de elementen. Ook leidt dit tot een hoge bouwsnelheid en logistieke efficiëntie. Hoewel de opentijd van de bodem hierdoor iets langer uitvalt dan bij ontgraving van één of enkele elementen blijkt een opentijd van enkele uren in de praktijk niet tot problemen te leiden.

Evaluatie van de resultaten
Tijdens de proef is per dienst circa 20 meter (10 elementen) ingebouwd. Wanneer het uitvoeringsteam meer routine zou opdoen met de inbouw, achten wij een hogere productie per dienst realistisch. Veel tijd gaat op aan het zorgvuldig ontgraven van de sleuf (rekening houdend met nabijheid van kabels en leidingen) en het nauwkeurig op de juiste hoogte uitvlakken van de sleufbodem. Wanneer de sleuf eenmaal is geprepareerd, vergt het plaatsen van de elementen nog maar weinig tijd.

Het wordt niet aanbevolen om in nachtgaten van circa 4 uur te werken, omdat de benodigde tijd voor aan- en afvoer van materiaal en materieel dan onevenredig veel uitvoeringstijd vergt.

Tijdens de werkzaamheden was het spoor dubbelsporig buiten dienst. Insteek van de werkzaamheden was dat er vanaf één spoor gewerkt wordt en het nevenspoor in principe beschikbaar is voor werkzaamheden van derden of doorvoer van werkmaterieel. Het enkelsporig werken is in de praktijk mogelijk gebleken. Wel was het soms handig (maar niet vereist) om materialen tijdelijk tussen de sporen te positioneren, mede omdat als gevolg van de aanwezigheid van een geluidsscherm dicht langs de werkplek geen ruimte was voor materiaalopslag langs het werkspoor. Ook bij de railinzetplaats was niet volledig uit te sluiten dat bij de overslag van materialen mensen of materieel kortstondig dichtbij of in het nevenspoor zouden komen. Het wordt daarom niet aanbevolen de MetaBarrier (met toepassing van een *safety fence*) in enkelsporige buitendienststellingen in te bouwen.

Onderzoeksvraag 3. Welke invloed heeft de inbouw van de MetaBarrier op de stabiliteit van de spoorligging?

Hypothese: Onze aanname is dat in 3 lagen verdichten van de sleuf een goed uitvoerbare verdichtingsmethode is die afdoende ongewenste zettingen van de spoorconstructie voorkomt. De onderste lagen verdichten we middels bevochtigen met water, de bovenste laag mechanisch met trilstamper.

Evaluatie van de resultaten
- De voorgenomen verdichtingsmethode is uitgevoerd zoals beschreven en eerder uitgedacht. In de voorproef te Oosterhout bleek het verdichten middels aanstamper en inwatering intensief qua uitvoering, maar met als resultaat een zeer goed verdichte onderste laag.
- De verdichtingswijze van de bovenste lagen werkt efficiënt en conform verwachtingen vanuit de voorproef.
- In de praktijkproef bij Breda Prinsenbeek is eveneens conform oorspronkelijk bedachte verdichtingsmethode gewerkt. Wel is lokaal beperkter gebruik gemaakt van inwatering en is de bovenlaag omwille van tijdsbesparing niet verdicht met het trilblok van de krol, maar met

een wackerstamper. Tijdens de uitvoering is als aandachtspunt gebleken dat bij het ontgraven de grondsoorten van de verschillende lagen nog beter van elkaar konden worden gescheiden. De beperkte ruimte en mogelijkheden om het ontgraven bodemmateriaal op verschillende hopen te deponeren was hierbij een logistieke uitdaging.

- De verwachting is dat een MetaBarrier die in een zorgvuldig verdichte bodem is achtergelaten een stabiele en aan de situatie voor de aanbrenging van de MetaBarrier gelijkwaardige toestand teweegbrengt.
- Uit metingen aan de spoorgeometrie tijdens de voorproef in Oosterhout en uit uitgebreide monitoring van spoorgeometrie, positie portalen en blinde vering bij Prinsenbeek blijken geen noemenswaardige afwijkingen in de meetwaarden op te treden.
- Wij trekken hieruit de conclusie dat de uitgevoerde werkmethode van inbouw van de MetaBarrier voldoet en geen ongunstige effecten heeft gehad op de spoorgeometrie en de ligging en stabiliteit van het baanlichaam.

6.2 Lopende begroting fase 2

In **Bijlage I** is de vergelijking opgenomen van de lopende begroting ten opzichte van de oorspronkelijke begroting voor fase, zoals opgenomen in [1]. Vanwege de vertrouwelijke aard van deze informatie, is de status, zijn conclusies en de onderbouwing opgenomen in dezelfde bijlage.

6.3 Herijking Risicodossier

Hieronder staan de risico's 1 op 1 overgenomen uit de documenten van fase 1.
Deze risico's hebben we bijgesteld op basis van de opgedane ervaringen en resultaten:

- Beheersmaatregelen zijn afgevallen of toegevoegd;
- Effect van beheersmaatregelen is bijgesteld;
- Risicokwantificering is bijgesteld.

Risico 1	**Aantasting spoorligging door verzakken van de spooropbouw tijdens en na het realiseren van de MetaBarrier**
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Bij de ontgraving blijven wij zoveel mogelijk buiten de drukzone van het spoor. Zorgvuldigheid tijdens de uitvoering, ontgraving zo snel mogelijk weer aanvullen. **BM2 (preventief):** We verdichten de ontgraven sleuf deugdelijk. Hiertoe voeren we verdichtingsproeven uit tijdens een voorproef (ruim voor het inbouwweekend voor de praktijkproef); we kiezen op basis van de voorproef de beste verdichtingsmethodiek (zie ook maatregelen bij risico 3). **BM3 (preventief):** We monitoren de spoorligging visueel en met een waterpasmal voor en na het aanbrengen van de MetaBarrier. Bij overschrijding van een bodemwaarde (BW) of onderhoudswaarde (OW) wordt correctief onderhoud direct uitgevoerd of ingepland. Bij overschrijding van een veiligheidswaarde (VW) c.q. Interventiewaarde (IW) wordt terstond correctief liggingsonderhoud uitgevoerd (BM5 en BM6). Te hanteren normwaardes in lijn met de ter plaatse gecontracteerde PGO-eisen (OHD00022, OHD00129 of IHS00001). ~~**BM4 (preventief voor commerciële toepassing, dus na fase 2):** Wij leveren input voor het installatievoorschrift in de vorm van o.a. onze aanbevelingen en geleerde lessen.~~ ~~**BM5 (correctief):** Stopunit op afroep beschikbaar tijdens uitvoering.~~ ~~**BM6 (correctief):** Onderhoudsaannemer ASSET Rail staat voor ons beschikbaar om de spoorligging te corrigeren indien uit de monitoring te hoge zettingen blijken. Zo minimaliseren we de kans op treinhinder.~~ **BM7 (preventief)**: Voorafgaand aan de uitvoering voeren wij geotechnische en spoorconstructieve berekeningen uit ten aanzien van drukzone en glijcirkel ballastbed op baanlichaam. Doel van de berekeningen is meer zekerheid te krijgen in behoud van

	stabiliteit, nadelige effecten te ontkrachten en de effectiviteit van andere beheersmaatregelen te kwantificeren. ~~**BM8 (correctief):** Wij rekenen in onze begroting voor fase 2 met eenmalige inzet van een stopmachine in de periode na uitvoering om eventuele onaanvaardbare liggingsdegeneratie te herstellen.~~
Evaluatie na praktijkproef	Vooraf is vastgesteld en uitgewerkt om buiten de drukzone van de spoorconstructie te werken. Dit uitgangspunt kon worden gehandhaafd tijdens de uitvoering van de voorproef en de praktijkproef. In beide proeven is vastgesteld dat de spoorligging niet is aangetast en dat er geen verzakking is opgetreden tijdens en na het inbouwen van de MetaBarrier.
Conclusie	De preventieve risicobeheersing is effectief (BM1, 2, 3 en 7) en heeft het optreden van het risico voorkomen. Correctieve maatregelen zijn daarom niet getroffen.

Risico 2	**Graafschade aan ondergrondse (spoorgebonden) kabels en leidingen bij installatie van de MetaBarrier**
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Tijdens engineeringsfase inventariseren waar kabels en leidingen onder het schouwpad liggen (graven proefsleuven). ~~**BM2 (preventief):** Modulair overzetstuk of passtuk fabriceren om kruisingen te faciliteren (vanaf commerciële toepassing, dus niet tijdens de praktijkproef).~~ **BM3 (preventief):** Onderzoeken impact van onderbrekingen en van variabele diepte van de blokken. Indien acceptabele (dus kleine) impact, dan dit meenemen in het ontwerp van het scherm. **BM4 (preventief):** Kabels verleggen of schermtracé aanpassen. **BM5 (preventief):** Bij kabelligging rakelings langs de sleuf niet graven, maar sleufzuigen. ~~**BM6 (correctief):** Kabelherstelploeg op afroep beschikbaar tijdens de uitvoering.~~ **BM7 (preventief)**: Voorwaarde voor de locatiekeuze van de praktijkproef: liefst vrije baan, risico-arme locatie met standaard ligging kabeltracé (dus niet direct bij overwegen of relaiskasten, etc).
Evaluatie na praktijkproef	Het is mogelijk gebleken een proeflocatie te vinden zonder interferentie met kabels en leidingen. Wel heeft dit het zoekgebied naar een geschikte proeflocatie wezenlijk kleiner gemaakt hetgeen heeft bijgedragen dat de uiteindelijk gekozen proeflocatie niet op alle overige criteria ideaal bleek. De gekozen locatie heeft tussen twee bovenleidingpalen een regelmatige loop van het kabeltracé, afwezigheid van objectaansluitingen of kruisingen, waarbij het tracé net buiten het schouwpad ligt en voldoende ruimte is voor het graven van een smalle sleuf. De theoretische ligging van het kabeltracé is voorafgaand aan de werkzaamheden getoetst door het graven van vier proefsleuven. Hierbij bleken de kabeltekeningen goed overeen te stemmen met de werkelijke ligging. Het maken van de ontgraving vond plaats onder begeleiding van een voorman spoorse kabels en leidingen, om het risico verder te beheersen.
Conclusie	De preventieve risicobeheersing is effectief (BM1 en 7) en heeft het optreden van het risico voorkomen. Correctieve maatregelen zijn daarom niet getroffen.

Risico 3	**Waterafvoer baanlichaam verstoord door aanwezigheid MetaBarrier**
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Uitgangspunt is dat de MetaBarrier voornamelijk wordt ingezet in zandgrond. Zandgronden zijn goed waterdoorlatend, waardoor het risico op waterophoping tussen het schouwpad en het spoor klein is. **BM2 (preventief):** De MetaBarrier is aan de onderzijde open en in lengterichting hol. Water kan zich in langsrichting vrij verplaatsen en weglopen naar een plek waar infiltratie of drainage wel mogelijk is. ~~**BM3 (correctief):** Wij monitoren de spoorligging na inbouw en verbeteren de drainage bij constateren van waterophoping.~~ **BM4 (preventief)**: Voorwaarde voor de locatiekeuze van de praktijkproef: enkel op locatie zonder historie van afwateringsproblemen.
Evaluatie na praktijkproef	De gekozen proeflocatie heeft geen bekende historie van afwateringsproblemen, ook is tijdens de ontgraving geen grondwater aangetroffen.

Conclusie	De preventieve risicobeheersing is effectief (BM1 en 4) en heeft het optreden van het risico voorkomen. Correctieve maatregelen zijn daarom niet getroffen.

Risico 4	**ProRail AM regionaal houdt inbouw tegen door belemmeringen of aanvullende eisen/wensen**
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Vanuit de korte lijnen tussen Arcadis en ASSET Rail en vanuit Kampa hebben wij warme contacten met ProRail AM in alle regio's; we werken in lopende projecten samen met gebiedsmanagers, operationeel managers, inspecteurs en vakdeskundigen. Wij gebruiken deze korte lijnen om ProRail AM vanaf aanvang van een nieuw project, zoals de praktijkproef maar ook na fase 2, actief te betrekken, informeren, enthousiasmeren en ontzorgen. **BM2 (preventief)**: Locatiekeuze in een onderhoudsgebied waar onze partner ASSET Rail de onderhoudsaannemer is, zodat wij hun warme contacten met ProRail AM kunnen gebruiken. Een plek waar vanuit de regio daadwerkelijke trillingsklachten spelen heeft onze voorkeur; dit vergroot de kans op betrokkenheid en eigenaarschap bij ProRail AM.
Evaluatie na praktijkproef	Zowel het SBIR-team van ProRail als wij hebben onze lijntjes actief ingezet, waardoor de inbouw niet is tegengehouden.
Conclusie	De preventieve risicobeheersing is effectief (BM1 en 2) en heeft het optreden van het risico voorkomen. *N.B. Dit is ons inziens een risico voor de asset eigenaar (in Nederland: ProRail). Een pro-actieve houding van het interne team is belangrijk om intern de afdelingen – waaronder AM - mee te krijgen. Uiteindelijk maakt het product immers geen onderdeel uit van een PGO-contract; het heeft na installatie geen effect op het onderhoudsregime.*

Risico 5	**Uitvoering blijkt meer tijd en/of materieel te vergen dan voorzien**						
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Onze begroting en planning voor de praktijkproef zijn haalbaar en realistisch, omdat we deze hebben besproken en geverifieerd met uitvoerende partij en kostendeskundige. **BM2 (preventief):** Ruim vóór inbouwweekend de uitvoeringsmethode beproeven tijdens de voorproef. Op grond daarvan stellen we de methode waar nodig bij. **BM3 (preventief):** Risicoreservering in begroting opgenomen. **BM4 (preventief):** Buffer van 15 uur in planning. ~~**BM5 (correctief):** Indien tijdens TVP blijkt dat we 60 m³ niet halen, dan brengen we minder lengte aan (+ naderhand aanpassen van de meetopstelling).~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	Score (Kx∑G)
Initieel:	3	4	4	1	5	1	**45**
Rest (na BM's):	1	2	3	1	3	1	**10**
Evaluatie na praktijkproef	Alles valt en staat met een goede voorbereiding en goede en duidelijk afstemming: - Hoe ziet het kabeltracé eruit - Is er OO-onderzoek uitgevoerd - Hoe is de bodemsamenstelling - Capaciteit van de onderaannemer of de aannemer waarmee we mee mogen liften. De voorbereiding heeft meer tijd gekost dan vooraf ingeschat. Hier is een deel van de risicoreservering in de begroting voor ingezet (BM3). De werkzaamheden van de aannemer in sommige tijdsvensters bleken weleens conflicterend met onze werkzaamheden (voorbeeld passage werktrein). Dit soort zaken zijn goed ondervangen door de goede voorbereiding en bijvoorbeeld door het uitvoeren van een aantal toetsen op het werkplan en draaibroek van de aannemer. De buffer (BM4) is niet nodig gebleken, ondanks dat de beschikbare tijd tijdens de TVP korter was dan vooraf gepland.						
Conclusie	De combinatie aan preventieve maatregelen BM1, 2 en 3 hebben gezorgd dat het risico niet is opgetreden.						

Risico 6	**Meer (trillings)overlast door MetaBarrier dan zonder toepassing ervan**

Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief):** Locatie praktijkproef zonder kwetsbare objecten in de nabije omgeving, omdat we nog niet weten of en hoe groot eventuele negatieve effecten zijn. **BM2 (preventief):** EEM-modellering. ~~**BM3 (correctief):** MetaBarrier verwijderen, hiervoor is budget opgenomen.~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	Score (Kx∑G)
Initieel:	3	5	1	1	5	1	**39**
Rest (na BM's):	1	3	1	1	5	1	**11**
Evaluatie na praktijkproef	Er is een locatie gevonden zonder kwetsbare objecten in de omgeving. Er zijn meerdere varianten doorgerekend in EEM-modellen. Uit de metingen en uit de modelberekeningen volgt geen reflectie van trillingsgolven.						
Conclusie	Het risico treedt niet op, hetgeen zowel is aangetoond in de praktijk (BM1) als in de modelberekening (BM2).						

Risico 7	**Geen geschikte proeflocatie te vinden die voldoet aan de door ons gestelde eisen**						
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief)**: Tijdige afstemming criteria met ProRail en regionale assetmanagers. ~~**BM2 (correctief)**: Proef uitvoeren in niet-exploitatieve omgeving, zoals bij het Railcenter of in het vrije veld (green-field).~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	Score (Kx∑G)
Initieel:	3	1	5	4	1	1	**36**
Rest (na BM's):	1	1	4	3	1	1	**10**
Evaluatie na praktijkproef	Leidende selectiecriteria waren de ligging in zandbodem, tijdige beschikbaarheid van geschikte buitendienststellingen en gunstige ligging van kabels en leidingen. De proeflocatie was geschikt op de meeste selectiecriteria. Hoewel de bodeminformatie die was geraadpleegd tijdens de selectiefase een beeld van voldoende geschiktheid leverde, bleek de daadwerkelijk aangetroffen bodemopbouw in de praktijk minder ideaal om de MetaBarrier bij toe te passen.						
Conclusie	Het risico is grotendeels voorkomen, echter bleek de bodemsamenstelling achteraf gemêleerder te zijn dan verwacht. Hierdoor vallen de resultaten tegen. Aan de andere kant geeft dit juist ook waardevol inzicht om vast te stellen waar het scherm wel of beter toegepast kan worden. *Opgedane beheersmaatregel voor toekomstige locaties: detailinzicht verkrijgen in de bodemsamenstelling middels grondboringen.*						

Risico 8	**Geen geschikte TVP beschikbaar**						
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief)**: Bij aanvang fase 2 direct locatiekeuze maken. **BM2 (preventief)**: BTD-planner raadplegen voor mogelijkheden meeliften met derden. **BM3 (preventief)**: Warme contacten in de regio (ProRail AM) benutten; we werken dagelijks met hen samen. Hierdoor korte lijnen naar nieuwe ingangen. ~~**BM4 (correctief)**: TVP aanvragen (1 jaar doorlooptijd) met dan wel concessie in resultaten vanwege kortere proeftijd of uitloop van fase 2.~~ ~~**BM5 (correctief)**: Proef uitvoeren in niet-exploitatieve omgeving, zoals bij het Railcenter of in het vrije veld (green-field).~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	Score (Kx∑G)
Initieel:	3	4	5	1	1	1	**36**
Rest (na BM's):	1	4	5	1	1	1	**12**
Evaluatie na praktijkproef	Er is tijdig een geschikte TVP gevonden voor inbouw van de MetaBarrier. Er is meegelift op een grootschalige infra-onttrekking waarin diverse partijen werkzaamheden aan spoor en bovenleiding hebben uitgevoerd in en rond Breda. Het vinden van een geschikte TVP voor uitbouw van de MetaBarrier blijkt een grotere uitdaging, doordat de proeflocatie een omleidingsroute is gedurende de sluiting van de grensovergang in de Betuweroute. Tussen de inbouw en start van de omleiding bleken er geen geschikte tijdsloten meer te zijn op mee te liften. ProRail zoekt daarom nog naar een geschikt moment voor de uitbouw.						

Conclusie	Voor de inbouw is het risico niet opgetreden. Voor de uitbouw wel, maar door omstandigheden die vooraf niet konden worden voorzien.

Risico 9	**Niet verkrijgen TVG voor de praktijkproef**						
Beheers-maatregelen (BM's)	**BM1 (preventief)**: 6 maanden in planning voor fase 2 opgenomen om TVG te verkrijgen. **BM2 (preventief)**: Go No-Go moment opgenomen in planning. **BM3 (preventief)**: Zo vroeg mogelijk aanhaken systeemspecialist. ~~**BM4 (correctief)**: Proef uitvoeren in niet-exploitatieve omgeving, zoals bij het Railcenter of in het vrije veld (green-field).~~						
Risico kwantificering	K. Kans	G1. Geld	G2. Tijd	G3. Kwaliteit	G4. Omgeving	G5. Veiligheid	Score (Kx∑G)
Initieel:	3	1	3	5	1	1	**33**
Rest (na BM's):	1	1	2	2	1	1	**7**
Evaluatie na praktijkproef	De TVG voor exploitatie is verleend onder nummer TVG00749, geldig van 1 oktober 2024 tot 1 juni 2026. Voorwaarde bij het verlenen van deze TVG was het monitoren van de spoorligging, blinde vering en grondwaterstand. De monitoringresultaten wijzen uit dat er geen nadelige gevolgen zijn opgetreden voor de genoemde aspecten.						
Conclusie	Het risico is niet opgetreden doordat de beheersmaatregelen effectief zijn ingezet.						

7. HERIJKING BUSINESS CASE

De oorspronkelijke business case is opgenomen in [4]. In dit hoofdstuk volgt de herijking van de financiële haalbaarheid van de MetaBarrier op basis van resultaten van de praktijkproef.

7.1 Impact resultaten op financiële haalbaarheid

De belangrijkste uitgangspunten in de oorspronkelijke business case:

- De initiële investeringskosten voor de MetaBarrier zijn **€3.250 per m¹**
  Dit eenheidsbedrag is opgebouwd uit 2 posten.
- Productkosten: **€1.600 per m¹**
- Realisatiekosten: **€1.650 per m¹**
    - Hierbij is uitgegaan van het plaatsen van **300 m¹** wand in **2 weekenden** (104 uur).

De ervaringen en geleerde lessen die zijn opgedaan tijdens de praktijkproef, vormen geen aanleiding bovenstaande bedragen bij te stellen. Uitzondering hierop zijn de invloed van materiaalkosten en inflatie op eenheidskosten.

- Het plaatsen van de elementen gaat sneller dan vooraf ingeschat. Dit zou kunnen resulteren in lagere realisatiekosten.
- Om de elementen te installeren is meer klein materiaal nodig dan vooraf ingeschat. Dit zorgt voor een toename van de realisatiekosten.
- De engineering voor een nieuwe locatie vergt meer tijd dan vooraf ingeschat, met name vanwege uitgebreid locatieonderzoek: bodemopbouw, verdacht gebied en inventarisatie van kabels en leidingen.

De concrete oorzaken van de hogere engineerings- en voorbereidingskosten:

- Intensiever TVG-traject dan vooraf ingeschat.
- Uitdagende en daardoor langere zoektocht naar een geschikte locatie.
- Uitgebreidere conditionering, met name door verdacht gebied wat betreft bodemverontreiniging en OO.

7.2 Herijkte business case 2025 (TCO)

Aangezien de eenheidsprijzen niet wijzigen, verandert de TCO ook niet. Wel is het verwachte toepassingsgebied kleiner dan vooraf ingeschat, waardoor het in fase 1 aangenomen aantal locaties en strekkende meter per jaar mogelijk lager gaat uitvallen in de praktijk.

7.3 Herijkte doorkijk potentiële markten en toepassingsgebied

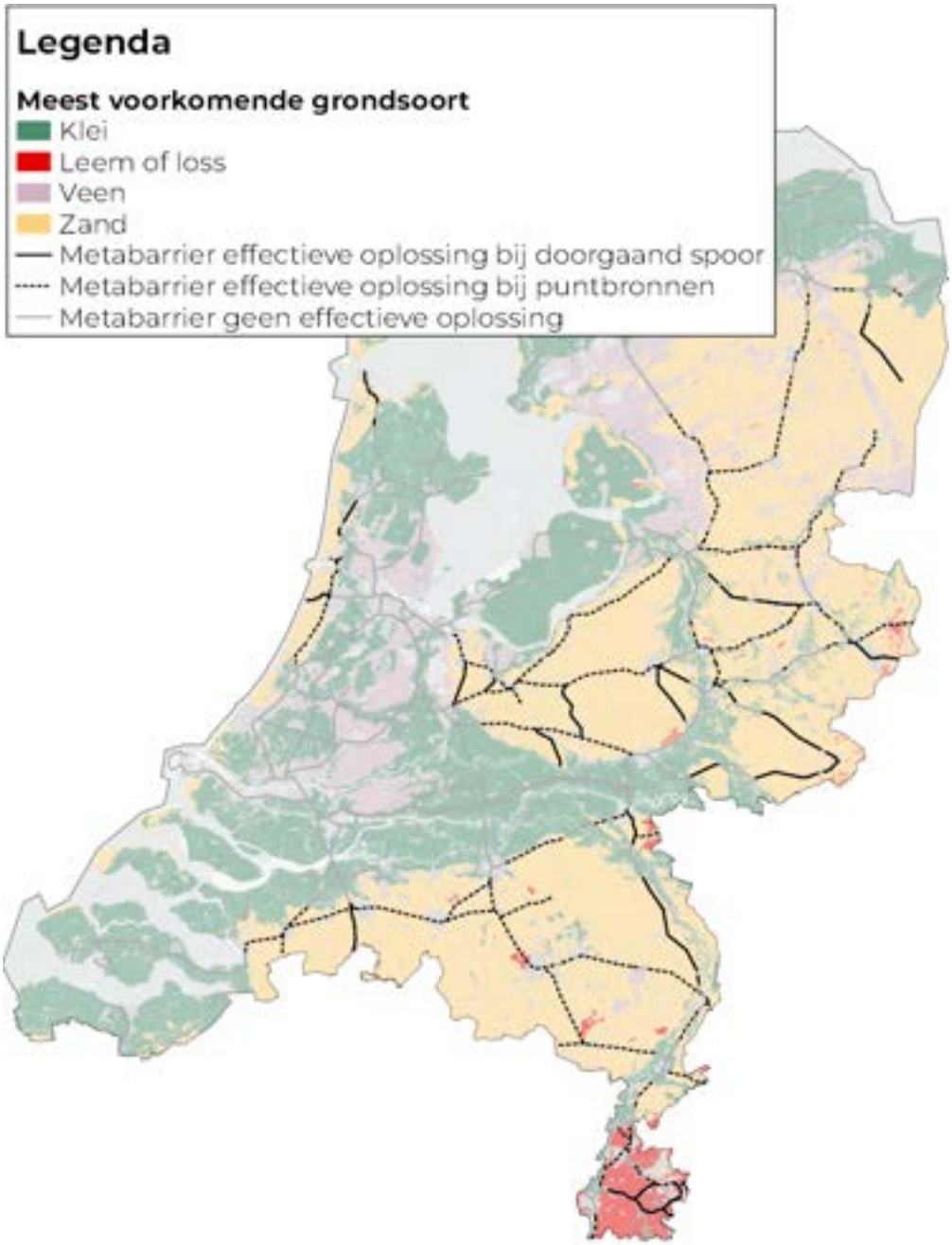
Vanuit de praktijkproef blijkt dat de MetaBarrier een beperkt effect heeft op de trillingen (ca. 20 procent afname van de trillingen bij frequenties hoger dan 20 Hz), maar dat dit effect groter kan zijn bij stijvere bodemtypes.

In de praktijk zien we dit soort situaties vooral in de volgende gevallen:

- Bij lichtere voertuigen (reizigerstreinen, lightrailvoertuigen), omdat goederentreinen vooral trillingen hebben bij lagere frequenties (onder de 10 Hz).
- Op stijvere bodems (draagkrachtige zandbodems, met een beperkte gelaagdheid).
- Op korte afstanden van het spoor, omdat op grotere afstanden de laagfrequente trillingen minder maatgevend zijn.
- Bij puntbronnen, zoals wissels, overwegen en ES-lassen, omdat daar vaak een grote bijdrage aan de hinder is van hoogfrequente trillingen.

Op basis van bovenstaande criteria is bepaald op welke trajecten de MetaBarrier een geschikte oplossing is (aan de hand van de bodemplattegrond van Nederland in **Figuur 40**):

- Vooral bij trajecten op een zandbodem waar geen goederentreinen rijden; dit is circa 11% van het Nederlandse spoor, gelijk aan 318 km spoor. Hierbij kan de MetaBarrier aan twee kanten worden toegepast, dus in totaal 636.000 m[1].
- Daarnaast is de MetaBarrier geschikt op trajecten op een zandbodem rond puntbronnen (ES-lassen, wissels en overwegen), dit is circa 28% van het Nederlandse spoor.
- Op de overige circa 61% van het Nederlandse spoor is de MetaBarrier geen effectieve oplossing.



Figuur 40. *Geschikte en minder geschikte trajecten voor MetaBarrier*

De MetaBarrier zou ook een uitkomst kunnen zijn voor locaties waar in het kader van baanstabiliteit, kritische treinsnelheid en duurzaam beheersbare spoorgeometrie een nieuw zandpakket wordt aangebracht en derhalve behoefte bestaat aan mitigerende maatregelen ten aanzien van de trillingseigenschappen van de zandgrond.

Tabel 6. *Indicatief overzicht waarin MetaBarrier een geschikte oplossing is voor trillingsreductie op zandgronden, op basis van interpretatie vanuit metingen Movares en expert judgment*

Reiziger treinen	Goederen treinen	Punt bronnen	Bij bebouwing binnen deze afstand tot het spoor is de MetaBarrier geschikt
Ja	Ja	Ja	< 30 mtr
Ja	Ja	Nee	< 15 mtr
Ja	Nee	Ja	< 50 mtr
Ja	Nee	Nee	< 30 mtr
Nee	Ja	Ja	< 30 mtr
Nee	Ja	Nee	< 15 mtr

Onzekerheid

De grootste onzekerheid van de huidige proef was de (achteraf) beperkte geschiktheid van locatie van de praktijkproef: de bodem was gelaagder en slapper dan verwacht en de funderingspalen van het geluidsscherm zorgen ook voor een trillingsreducerend effect. Hierdoor kon naar verwachting niet het volledige potentieel van de MetaBarrier worden aangetoond. Op basis van eindige elementenmodellen lijkt de MetaBarrier effectiever op spoorlijnen met een stijvere bodem. Om het effect beter te bepalen, is een aanvullende test in een stijvere bodem aan te bevelen.

8 CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

8.1 Conclusies

De MetaBarrier resulteert in een trillingsreducerend effect (±30% reductie). Dit is minder groot dan vooraf verwacht. Of er alternatieve oplossingen zijn met een groter trillingsreducerend effect voor dezelfde kosten, hangt af van de oorzaak van het verschil tussen het verwachte en gemeten effect*. Kijkend naar de 3 onderzoeksvragen zijn de antwoorden grotendeels positief, echter kan nog geen eenduidig en onvoorwaardelijk antwoord gegeven worden op de eerste en belangrijkste vraag.

- ✗ *1a. Trillingsreducerend werking in Nederlandse spooromgeving:* het gemeten effect van de MetaBarrier op de locatie van de praktijkproef is kleiner dan verwacht
- ✓ *1b. Invloed van diepte van het blok:* er volgt geen negatief effect uit de modelberekening.
- ✓ *1c. Invloed van onderbrekingen:* er volgt geen negatief effect uit de modelberekening.
- ✓ *2. Optimale uitvoeringsmethode:* de optimalisaties uit de voorproef hebben geleid tot een snellere plaatsing van de MetaBarrier tijdens de praktijkproef dan vooraf ingepland.
- ✓ *3. Invloed inbouw op spoorligging:* uit zowel de metingen tijdens de voorproef als tijdens de praktijkproef volgen geen verzakkingen. De inbouw heeft geen impact op de stabiliteit van de spoorligging.

** Het tijdens de praktijkproef gemeten effect van de MetaBarrier is kleiner dan verwacht. De oorzaak is niet met 100% zekerheid aan te wijzen. Op basis van uitgebreide evaluatie en aanvullende analyses met modelberekeningen, is het resultaat het gevolg van een combinatie van de volgende mogelijke oorzaken:*

- *Een ongunstigere bodemsamenstelling dan verwacht op basis van vooronderzoek (sondering, boringen), waardoor trillingen onder het scherm door gaan:*
  - *Slapper, met als gevolg langere trillingsgolven die dieper door de bodem gaan.*
  - *Meer gelaagd, waardoor trillingen reflecteren tegen dieper gelegen lagen.*
- *Onzekerheid in de trillingsmetingen van Movares, door:*
  - *Relatief nieuw spoor dat nog moet zetten. Dit kan leiden tot verschillen in de metingen tussen de nulmetinglocatie en de locatie met MetaBarrier.*
  - *De toplaag van de bodem bij de meetopstelling is tussen de voor- en nameting bewerkt (afgegraven, vervangen geëgaliseerd). De exacte impact ervan op de metingen is niet aan te wijzen, maar het vergroot in ieder geval niet de betrouwbaarheid ervan.*
- *De funderingspalen van het geluidsscherm langs het spoor hebben veel meer invloed dan vooraf verondersteld. De funderingspalen staan op een hartafstand van 4 meter en bestaan uit 5 meter diepe buispalen met een doorsnede van 800mm. Deze funderingspalen werken als een trillingsscherm, zowel bij de referentielocatie als de praktijkproeflocatie. In dat geval is de impact van de MetaBarrier kleiner dan verwacht, omdat een deel van de trillingen wordt afgevangen in de funderingspalen. In eerste EEM-berekeningen van Phononic Vibes - met dunnere palen van 2,5 meter lengte – is een trillingsreducerend effect tot 3 dB berekend.*

8.2 Aanbevelingen en vervolg

Op basis van de conclusies - en dan met name de onzekerheid in de oorzaken van het lagere trillingsreducerende effect van de MetaBarrier - wordt het volgende aanbevolen om de toepasbaarheid in Nederlandse bodem nader te bepalen:

1. Een tweede praktijkproef op een betere locatie om het effect van enkel de MetaBarrier te bepalen. Randvoorwaarden voor een dergelijke vervolgproef:
   - **Geschiktheid bodem**. De bodem moet bestaan uit stijve, uniforme zandgrond, met zo min mogelijk invloed van leem- of kleilagen (aan te tonen middels grondonderzoek).
   - **Geschiktheid spoor**. Er moet sprake zijn van een dubbelsporige TVP van minimaal 52 uur en er mogen geen belemmerende kabels en leidingen liggen in het werkgebied (of deze moeten voorafgaand aan inbouw worden vrijgelegd). Daarnaast moet het spoor op maaiveld zijn gesitueerd (geen verhoogde of verdiepte ligging). Ook moet in het kader van zuiverheid van de metingen (niet meerdere variabelen tegelijkertijd wijzigen) tijdens de beproeving voorkomen worden dat er in de periode van twee maanden voor het plaatsen van de MetaBarrier tot en met het einde van de trillingsmeting ballastroerende- of liggingswerkzaamheden aan het spoor worden uitgevoerd.
   - **Geschiktheid meetlocatie**. Er moet sprake zijn van een meetlocatie zonder greppel tussen spoor en meetpunten, geen verstorende objecten zoals bomen en een vast object binnen 20 meter, om onzekerheden in de meting te voorkomen.
     Mogelijk kan dit in een weiland, met een kunstmatige trillingsbron. Het gaat dan alleen om de absolute effectiviteitsmeting in een ideale bodemsoort. De spoortechnische onderzoeksvragen zijn immers afdoende beproefd. Voordelen van een “weilandproef”:
     - Goedkoper.
     - Meer keuze in geschikte locaties.
     - Minder randvoorwaarden voor de uitvoering.
     - Geen TVP nodig.
2. Uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse van het STEM-model, om de betrouwbaarheid van de resultaten uit de modelberekeningen te vergroten. Hierin wordt onderzocht wat de randvoorwaarden en modelinstellingen moeten zijn om resultaten te krijgen die beter overeenkomen met de gemeten effecten.
3. Bij een gedragen beeld bij de te hanteren parameters in het STEM model: Extra EEM-berekeningen uitvoeren, waaronder met een tweede trillingsscherm (funderingspalen van 5 meter diepte, elke 4 meter) en de situaties van onderzoeksvraag 1b en 1c.

BIBLIOGRAFIE

[1] Kampa, Arcadis en We-Boost, "SBIR Modulaire MetaBarrier fase 1 - PvA Praktijkproef," Utrecht, 2023.

[2] Phononic Vibes, *Productblad 'MetaSolution. Undergrond Vibration Reduction Design Update 19-12-2023'),* 2023.

[3] Phononic Vibes, "MetaVibration Modules - Preliminary Installation 29-04-2024," 2024.

[4] Kampa, Arcadis en We-Boost, "SBIR Modulaire MetaBarrier fase 1 - PvA Business case," Utrecht, 2023.

BIJLAGES

Bijlage A1. Trillingsrapportage praktijkproef van Movares v2.0 d.d. 27 februari 2025 (kenmerk D79-ANI-HS-RAP-240111316) *(separaat PDF document)*

Bijlage A2. Rapport Langeduurmeting MetaBarrier van Movares v2.0 d.d. 22 mei 2025 (kenmerk D79-ANI-HS-RAP-25003977) *(separaat PDF document)*

Bijlage B. Monitoring Spoorligging IV-Infra 240699-RAP-029 Prinsenbeek en Diepenveen *(separaat PDF document)*

Bijlage C. EEM modellering Phononic Vibes *(separaat PDF document)*

Bijlage D. Input STEM berekeningen juni 2025

Bijlage E. Fotoverslag uitvoering praktijkproef

Bijlage F. Werkplan uitbouw MetaBarrier *(separaat PDF document)*

Bijlage G. Rapport Praktijkproef MetaSolution Deutsche Bahn in Elze (Phononic Vibes, juli 2020) *(VERTROUWELIJK - separaat PDF document)*

Eigendom van Kampa, Arcadis en We-Boost. Toegevoegd als los PDF-document.

Bijlage H. Rapport Praktijkproef MetaSolution Piazza San Marco in Firenze (Phononic Vibes, mei 2023) *(VERTROUWELIJK - separaat PDF document)*

Eigendom van Kampa, Arcadis en We-Boost. Toegevoegd als los PDF-document.

Bijlage I. Bevroren begroting (eind 2023) versus lopende begroting (juni 2025) *(VERTROUWELIJK - separaat PDF document)*

Eigendom van Kampa, Arcadis en We-Boost. Toegevoegd als los PDF-document.

BIJLAGE D. INPUT STEM BEREKENINGEN JUNI 2025

Naar aanleiding van de resultaten van de STEM berekeningen begin 2025 (zie paragraaf 5.4), is het model in mei 2025 besproken met Deltares. Vanuit dit overleg is de input voor de berekeningen bijgesteld. Dit zijn de instellingen waarmee in juni 2025 drie situaties opnieuw zijn doorgerekend. Tevens zijn dit de instellingen om aanvullend onderzoek mee te doen (zie Aanbevelingen).\

Hieronder zijn de nieuwe instellingen weergegeven, in dezelfde tabellen zoals opgenomen in paragraaf 5.4 (pagina 29 t/m 31 van onderliggend document).

Tabel 2. De gebruikte bodemeigenschappen in STEM

Aanpassingen:

- Voor de dichtheid op alle dieptes de bulk density van grond aangehouden (2.650 kg/m^3).
- Waarde van de Porositeit aangepast

Diepte	Dichtheid [kg/m^3]	Dynamisch E-modulus [Pa]	Poisson's ratio [-]	Porositeit [-]
0.0 tot 1.9 m	~~1949~~ 2.650	1.86E+08	0.299	~~0,15~~ 0.26
1.9 tot 3.7 m	~~1967~~ 2.650	2.19E+08	0.483	~~0,16~~ 0.26
3.7 tot 5.7 m	~~1990~~ 2.650	2.68E+08	0.495	~~0,17~~ 0.25
5.7 tot 7.5 m	~~2037~~ 2.650	3.44E+08	0.495	~~0,19~~ 0.23
7.5 tot 9.4 m	~~2072~~ 2.650	4.3E+08	0.495	~~0,20~~ 0.22
9.4 tot 11.2 m	~~2014~~ 2.650	3.43E+08	0.495	~~0,18~~ 0.24
11.2 tot 13.1 m	~~1992~~ 2.650	4.08E+08	0.495	~~0,17~~ 0.25
13.1 tot 14.9 m	~~1896~~ 2.650	3.14E+08	0.495	~~0,13~~ 0.28
14.9 tot 16.8 m	~~1945~~ 2.650	3.49E+08	0.495	~~0,15~~ 0.27
16.8 tot 18.6 m	~~2065~~ 2.650	5.83E+08	0.495	~~0,20~~ 0.22

Tabel 3. De eigenschappen van de MetaBarrier in STEM

Aanpassing: Porositeit verhoogt van 0.09 naar 0.095

Parameter	Waarde
Beton MetaBarrier	• E-modulus = 40 GPa • Dichtheid = 2.350 kg/m^3 • Poisson's ratio = 0.15 • Porositeit = ~~0.09~~ **0.095**

Ophanging MetaBarrier	• Afstand tussen ophangingspunten = 0.5 m
	• Dikte EPS = 0.04 m
	• Stijfheid
	  ○ X = 0 N/m
	  ○ Y = 0 N/m
	  ○ Z = 0 N/m
	• Rotatiestijfheid
	  ○ X = 0 Nm/rad
	  ○ Y = 0 Nm/rad
	  ○ Z = 2.51e8 Nm/rad
	• Dempingscoëfficiënt
	  ○ X = 0 Ns/m
	  ○ Y = 0 Ns/m
	  ○ Z = 0 Ns/m

Parameter	Waarde

	• Rotatiedempingscoëfficiënt
	  ○ X = 0 Ns/rad
	  ○ Y = 0 Ns/rad
	  ○ Z = 2,72e3 Ns/rad

Interne massa	• Type = 3D EulerBeam • Dichtheid = 2.350 kg/m^3 • E-modulus = 30e9 Pa • Poisson's ratio = 0.15 • Doorsnede = 1,15e-1 m^2 • Traagheidsmoment om y-as = 2.50e-4 m^4 • Traagheidsmoment om z-as = 5.20e-3 m^4 • Torsietraagheidsmoment = 9,80e-3 m^4

Tabel 4. De berekeningsparameters

Aanpassingen:

- Meetpunt op 32 meter weggehaald om rekentijd te reduceren (in het kader van tijdig opleveren van de eindrapportage)
- Langere duur (2,75 sec i.p.v. 1,25)
- Statische initialisatie toegevoegd
- Lengte en breedte toegevoegd
- Toevoeging op/af-rij spoor. Dit is een stuk spoor voor en na het model waar geen bodem wordt gemodelleerd, maar deze wordt benaderd als een veer. Wat het makkelijker maakt het model te initialiseren en een trein eerst een stukje te laten rijden voordat de bodem impact heeft.

Parameter	Waarde
Type model	2,5D
Meshgrootte	0.5 meter
Type belasting	UVEC (standaard voertuigmodel met moving load)
Dt	2e-4 seconden
Duur	~~1,25~~ 2.75 seconden
Output	Op 8, 16, en 24 ~~en 32~~ meter vanaf spoor
Demping	Rayleigh demping
Nieuw: Lengte	**60 meter**
Nieuw: Breedte	**25 meter**
Nieuw: Statische initialisatie	**0.1s**
Nieuw: Op/Af-rij spoor	**25 meter**

Tabel 5. de doorgerekende modelvarianten in STEM met de nieuwe instellingen

Toelichting: Vanwege de beperkte tijd tot het opleveren van het definitieve eindrapport, in combinatie met de lange rekentijd van het model in STEM, zijn in juni 2025 vier varianten doorgerekend, hieronder weergegeven in de tabel.

Nr.	Bodem	MetaBarrier	Bijzonderheden
0	Referentie	Geen	Geen
4	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor	Geen
7	5% lagere dichtheid, 50% lagere stijfheid toplaag	Standaard, 2.5m van spoor	Geen
12	Referentie	Standaard, 2.5m van spoor	Onderbreking van 2 meter

BIJLAGE E. FOTOVERSLAG PRAKTIJKPROEF

Deze bijlage bevat een fotoverslag van de uitvoering van de praktijkproef.

Figuur 41. *Situatie voorafgaand aan start werkzaamheden*

Figuur 42. *Optrekken ballastkop en verwijderen schouwpad. Het werkgebied is uitgezet met piketten.*

Figuur 43. *Verwijderen eerste laag, sensoren in het spoor (rechts, oranje) zijn zichtbaar*

Figuur 44. *Transport van MetaBarriers vanaf vrachtwagen naar lorrie*

Figuur 45. *MetaBarriers op platte lorrie*

Figuur 46. *Schuimrubber wordt voorafgaand aan de plaatsing aangebracht (© Stefan Verkerk)*

Figuur 47. *Aanvoer van materiaal, dit wordt zoveel mogelijk in het nevenspoor en tussen beide sporen geplaatst*

Figuur 48. *Egaliseren van ondergrond m.b.v. waterpas en laser*

Figuur 49. *Plaatsen van de blauwe lastspreidingsplaten*

Figuur 50. *Door schuine afwerking van de bovenkant van de sleuf kan deze veilig worden betreden (© Stefan Verkerk)*

Figuur 51. *Plaatsing van het eerste element, rechts worden de blauwe kunststof lastspreidingsplaten geplaatst*

Figuur 52. *Plaatsen van aansluitende blokken*

Figuur 53. *Plaatsen van aansluitende blokken, deze moeten exact in lijn staan (© Stefan Verkerk)*

Figuur 54. *Afstand MetaBarrier tot lijf buitenste spoorstaaf*

Figuur 55. *Overgang tussen twee elementen, met links en rechts de koppelplaten, en midden een stuk geotextiel voor bescherming van de overgang*

Figuur 56. *Boren van gaten t.b.v. de koppelplaten* *© Stefan Verkerk*

Figuur 57. *Deel van MetaBarrier is geplaatst*

Figuur 58. *Aanvullen van grond langs al geplaatste elementen*

Figuur 59. *Mechanisch verdichten d.m.v. Wackerstamper langs de MetaBarrier (© Stefan Verkerk)*

Figuur 60. *Situatie na aanbrengen MetaBarrier, afwerking met porfierlaag van 10 cm*