

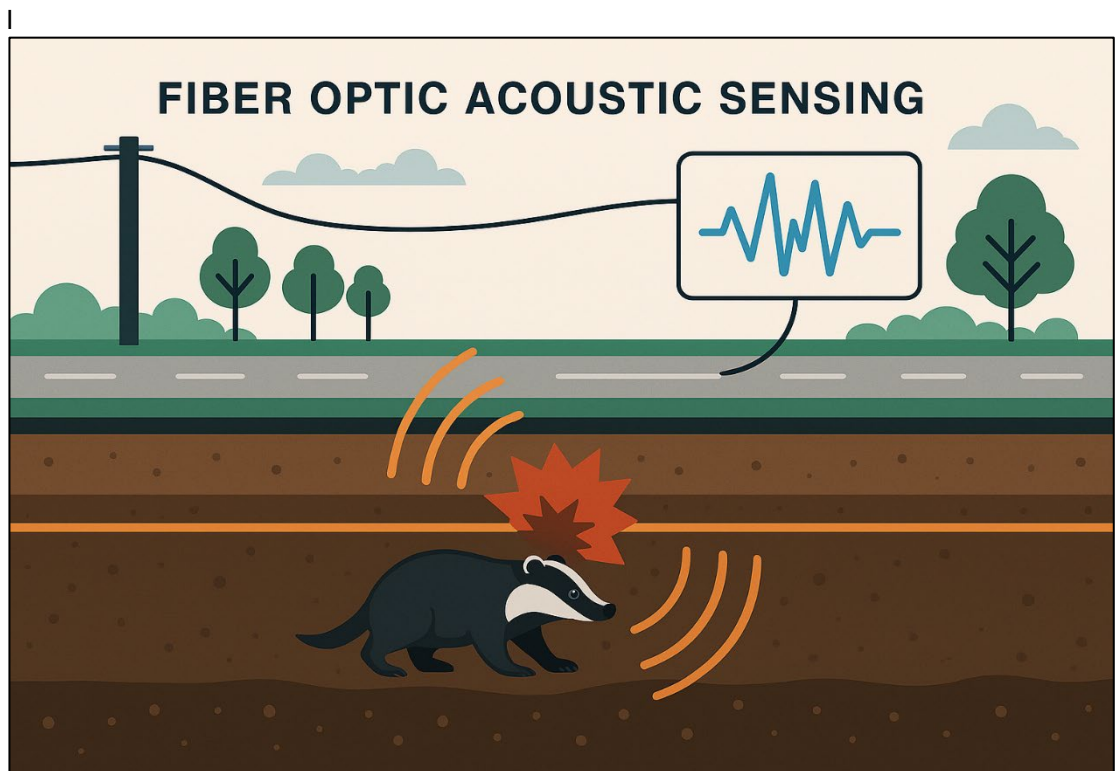
## Veldstudie voor detectie dierlijke graverijen met glasvezel



## Veldstudie voor detectie dierlijke graverijen met glasvezel

Auteur(s)

Roeland Nieboer



*AI-impressie van "detectie van dierlijke graverij met fiber optic sensing". De AI heeft in dit geval gekozen voor een das.*

## Veldstudie voor detectie dierlijke graverijen met glasvezel

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Reindert Stellingwerff
<b>Projectreferenties</b>	Corporate Innovatie Programma (CIP)
<b>Trefwoorden</b>	Dierlijke graverij, Bevers, Dassen, Geofysische metingen, Glasvezelkabel, DAS, Fiber Optic Acoustic Sensing, ProRail, TU Delft

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	22-12-2025
<b>Projectnummer</b>	11211520-007
<b>Document ID</b>	11211520-007-GEO-0001
<b>Pagina's</b>	26
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)

	Roeland Nieboer	

# Samenvatting

Deze veldstudie onderzocht of glasvezeltechnologie (Distributed Acoustic Sensing, DAS) geschikt is voor het detecteren van ondergrondse activiteiten van gravers zoals dassen en bevers. Het onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met ProRail langs het spoor bij Ravenstein en Wijchen, waarbij zowel passieve monitoring als gerichte experimenten werden uitgevoerd. De glasvezelkabel fungeerde als sensor, waarmee enerzijds trillingen en geluiden veroorzaakt door dierlijke activiteit en anderzijds echo's van omgevingsgeluiden met bestaande hollen werden geregistreerd. Het doel was om te bepalen of deze techniek bruikbaar is voor vroegtijdige detectie van risico's voor waterkeringen door ondergravingen, maar werd uitgevoerd langs spoorwegen omdat daar vergelijkbare problemen spelen en daar al glasvezelonderzoek wordt gedaan. De resultaten hiervan zijn grotendeels terug te vertalen naar dijkomgevingen.

De resultaten laten zien dat het detecteren van loop- en graafactiviteiten van dassen – en daarmee ook van bevers - technisch haalbaar is, mits de glasvezelkabel binnen enkele meters van de activiteit ligt. In de data zijn duidelijke trillingen geïdentificeerd die overeenkomen met een das die tussen hollen loopt, waarbij zelfs de loopsnelheid uit de data kan worden afgeleid. Ook actieve graafactiviteiten op een vaste locatie zijn zichtbaar, en de intensiteit en het patroon van de trillingen maken het mogelijk onderscheid te maken tussen lopende en gravende dieren en andere omgevingsgeluiden. Dit biedt perspectief voor verdere ontwikkeling van automatische detectie, mits de monitoringopstelling goed is afgestemd op het gedrag van de dieren en de lokale omstandigheden.

Het detecteren van hollen met seismische interferometrie, waarbij gebruik wordt gemaakt van omgevingstrillingen zoals die veroorzaakt door treinen, bleek uitdagender. In theorie is het mogelijk om echo's van hollen te detecteren, ook met dezelfde DAS technologie, maar in de praktijk was het effect niet overtuigend zichtbaar. Deze techniek is alleen toegepast op de referentie-geofoondata. Dit is een kleine dataset, waardoor het succes van interferometrie sterk wordt verlaagd. Het uitwerken van de veel grotere glasvezeldataset paste niet binnen de scope en het budget van deze studie. Er liggen dus nog mogelijkheden voor holddetectie met interferometrie, maar de Technology Readiness Level (TRL) voor deze toepassing is een stuk lager dan het direct detecteren van gravers en graverij.

De aanbevelingen zijn gericht op het verder ontwikkelen van deze technieken. De focus moet liggen op het detecteren van actief geluid, zoals lopende en gravende dieren. Deze methode is het meest kansrijk en direct toepasbaar. Holddetectie met interferometrie kan in een later stadium worden toegevoegd, omdat het dezelfde data betreft, maar een andere analysemethode. Vervolgstappen zijn onder andere het trainen van AI-algoritmes met een database van gravende bevers, het opbouwen van een ruisdatabase bij dijken, en het onderzoeken van holddetectie met glasvezel langs waterkeringen, waarbij boten en auto's als bron van trillingen worden gebruikt. Daarnaast is het belangrijk om omgevingsgeluid te analyseren en te filteren, zodat bevergeluiden beter geïsoleerd kunnen worden. Een veldproef in een dijkrelevante omgeving, waarbij het zenderen van bevers kan helpen om hun activiteit nauwkeuriger te koppelen aan de meetdata, wordt aanbevolen.

Samengevat laat deze studie zien dat glasvezel een veelbelovende techniek is voor het detecteren van ondergrondse activiteiten van dassen en bevers. Voor directe detectie van hun bewegingen en graafactiviteiten is de techniek klaar voor verdere implementatie. Voor holddetectie via interferometrie is meer onderzoek nodig, met name gericht op langere meetperiodes en grotere datasets. De aanbevelingen geven concrete handvatten voor vervolgonderzoek en implementatie in de praktijk.

# Summary

This field study investigated whether fiber optic technology (Distributed Acoustic Sensing, DAS) is suitable for detecting underground activities of burrowing animals such as badgers and beavers. The research was carried out in collaboration with ProRail along the railway near Ravenstein and Wijchen, involving both passive monitoring and targeted experiments. The fiber optic cable acted as a sensor, recording vibrations and sounds caused by animal activity as well as echoes of ambient noise interacting with existing burrows. The aim was to determine whether this technique can be used for early detection of risks to water defenses caused by burrowing, but the study was conducted along railways because similar problems occur there and fiber optic research is already being done in those locations. The results can largely be translated to dike environments.

The findings show that detecting walking and digging activities of badgers, and therefore also beavers, is technically feasible, provided the fiber optic cable is located within a few meters of the activity. Clear vibrations were identified in the data that correspond to a badger moving between burrows, and even its walking speed can be inferred from the data. Active digging at a fixed location is also visible, and the intensity and pattern of the vibrations make it possible to distinguish between walking and digging animals and other environmental sounds. This offers prospects for further development of automatic detection, provided the monitoring setup is well aligned with animal behavior and local conditions.

Detecting burrows using seismic interferometry, which relies on ambient vibrations such as those caused by trains, proved more challenging. In theory, it is possible to detect burrow echoes using the same DAS technology, but in practice the effect was not convincingly visible. This technique was only applied to reference geophone data. This is a small dataset, which significantly reduces the success of interferometry. Processing the much larger fiber optic dataset was beyond the scope and budget of this study. Therefore, there are still opportunities for burrow detection using interferometry, but the Technology Readiness Level (TRL) for this application is much lower than for direct detection of burrowing animals and digging activity.

The recommendations focus on further developing these techniques. The emphasis should be on detecting active sounds, such as walking and digging animals. This method is the most promising and immediately applicable. Burrow detection using interferometry can be added at a later stage, as it uses the same data but a different analysis method. Next steps include training AI algorithms with a database of digging beavers, building a noise database for dikes, and investigating burrow detection with fiber optics along water defenses using boats and cars as vibration sources. Additionally, it is important to analyze and filter ambient noise so that beaver sounds can be better isolated. A field trial in a dike-relevant environment, where tagging beavers could help link their activity more accurately to the measurement data, is recommended.

In summary, this study shows that fiber optics is a promising technique for detecting underground activities of badgers and beavers. For direct detection of their movements and digging activities, the technology is ready for further implementation. For burrow detection via interferometry, more research is needed, particularly focusing on longer measurement periods and larger datasets. The recommendations provide concrete guidance for follow-up research and practical implementation.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Summary</b>	<b>5</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Context	7
1.2	Probleemstelling	7
1.3	Aanpak	7
1.4	Vertaling van baanlichamen langs het spoor naar waterkeringen	8
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>10</b>
2.1	Glasvezelmonitoring	10
2.2	Meetlocatie	10
2.3	Veldwerk	12
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>15</b>
3.1	Monitoring bewegingen en graafgeluiden	15
3.2	Interferenties met gegraven holen	17
3.2.1	Hamerslagen gemeten met gefoons	17
3.2.2	Hamerslagen gemeten met glasvezel	17
3.2.3	Treinpassages gemeten met gefoons	19
3.2.4	Treinpassages gemeten met glasvezel	21
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>23</b>
4.1	Haalbaarheid van het detecteren van loop- en graafactiviteit van dassen	23
4.2	Haalbaarheid van het detecteren van holen met seismische interferometrie van treintrillingen	23
<b>5</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>24</b>
5.1	Veldproef als cruciale vervolgstap	24
5.2	Focus op actieve detectie van dierlijke activiteit	24
5.3	Holdetectie met interferometrie	24
5.4	AI-algoritmes trainen met praktijkdata	24
5.5	Ruisdatabase en filtering van omgevingsgeluid	24
	<b>Referenties</b>	<b>25</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Context

Rijkswaterstaat heeft de ambitie om met innovaties te garanderen dat Rijkswaterstaat ook op middellange termijn zijn maatschappelijke opgave kan verwezenlijken. Medio 2010 is daarom het Corporate innovatieprogramma opgericht met de opdracht om:

- Meer rendement voor het primaire proces te realiseren.
- Te komen tot een corporate aanpak van innovatie.
- Beter gebruik te maken van de innovatiekracht van de markt en de omgeving (Rijkswaterstaat, 2013).

Van de laatste deelopdracht is dit rapport een uitwerking: het detecteren van dierlijke graverijen in een dijklichaam, in het bijzonder de bevers. Bevers zijn sleuteldieren die bekend staan om hun vermogen om de omgeving naar hun hand te zetten. Hoewel deze activiteiten belangrijk zijn voor de toename van de flora en fauna, kunnen ze ook aanzienlijke risico's vormen voor de waterveiligheid door een toename van de faalkans door het graven in waterkeringen. Bevers kunnen een complex driedimensionaal tunnelnetwerk maken inclusief diverse kamers en verschillende ingangen onder de waterlijn. De complexiteit van het gangenstelsel hangt af van de grootte en de leeftijd van de gravers samen met de eigenschappen van de ondergrond en de potentie om te groeien. Deze gangen en kamers zijn visueel lastig te detecteren en dit vereist dus een andere manier van detecteren. Buiten de bever is het wellicht ook mogelijk om de das te detecteren.

## 1.2 Probleemstelling

Dierlijke graverijen in waterkeringen zijn een fenomeen wat al jaren in Nederland en daarbuiten wordt bestreden om de waterveiligheid van de kering te waarborgen. Deze taak wordt door de Waterschappen en de Muskusrattenbestrijding voortvarend uitgevoerd. Echter, sinds de herintroductie van de bever in Nederland in 1988 is deze in aantal exponentieel gegroeid en vormt een veiligheidsprobleem voor onze keringen en (spoor)wegen doordat:

- De waterveiligheid van de waterkering of de veiligheid van de (spoor)wegen (ernstig) in gevaar kan komen door het graven in de grondlichamen, dit kan een negatieve impact hebben op de verschillende faalmechanismen.
- De bevergraverij zeer slecht te detecteren is, doordat zijn ingang onder de waterspiegel ligt en vervolgens te diep onder de oppervlakte blijft om met conventionele detectiemethoden te ontdekken.
- De bever een (Europees) beschermd dier is, het is een sleuteldier en zorgt door zijn aanwezigheid ook voor een toenemende biodiversiteit in flora en fauna. De bever mag hierdoor niet 'zomaar' gedood worden of verplaatst en zijn leefomgeving mag niet worden aangetast.

Om het tweede aspect van het veiligheidsprobleem verder te onderzoeken zal in dit rapport een onderzoek worden gedaan om bevers te kunnen detecteren met hulp van glasvezel.

## 1.3 Aanpak

Deze studie is een vervolg op een haalbaarheidsstudie uitgevoerd door Deltares (Van den Berg en Nieboer 2024). Bovenstaande context en probleemstelling zijn daarom hieruit overgenomen. In die studie is middels meetsimulaties onderzocht of trillingen veroorzaakt door activiteit van gravers gedetecteerd kunnen worden met glasvezelkabels. Ook is gesimuleerd of hollen in een dijklichaam interferentie patronen veroorzaken, denk bijvoorbeeld aan echo's, in het (natuurlijk) omgevingsgeluid en of deze meetbaar zijn. Deze resultaten gaven voldoende vertrouwen om de stap naar een veldstudie te zetten.

De mogelijkheid deed zich voor om aan te sluiten bij een monitoringscampagne die bij ProRail liep. De laatste jaren heeft ProRail veel last van dierlijke graverijen in de spoortaluds, vooral van de bever en de das. Hierdoor is al een aantal malen het treinverkeer over een traject gestopt, zoals bijvoorbeeld in 2021 en 2022 bij Taarlo<sup>1</sup>.

ProRail beheert de glasvezelkabels die langs het spoor in Nederland liggen, die voor verschillende doelen worden gebruikt. Naast het gebruik als communicatienetwerk, wordt het bijvoorbeeld ook ingezet als trilling sensor<sup>2</sup>. Deze studie maakt gebruik van dit laatste.

## 1.4 Vertaling van baanlichamen langs het spoor naar waterkeringen

Voor het detecteren van graverij kunnen dezelfde glasvezeltechnieken worden ingezet, zowel in baanlichamen van het spoor als in waterkeringen. Er zijn echter wel belangrijke verschillen waardoor de resultaten uit dit onderzoek niet direct 1 op 1 te vertalen zijn. De materiaaleigenschappen en hydrologische eigenschappen zijn bijvoorbeeld erg verschillend, maar de analyse kan daar wel op worden aangepast. Met betrekking tot de akoestiek (trillingen/geluid) zijn de volgende zaken relevant.

- **Directe activiteit**, lopende en gravende dieren zullen heel vergelijkbare trillingen geven in een dijk of en spoorlichaam, dus de analyse zal overeenkomstig zijn.
- **Holdetectie** – door middel van interferentie met omgeving geluid zal anders zijn. Langs het spoor kunnen de trillingen van passerende treinen ingezet worden, die op waterkeringen niet aanwezig zijn.

Er moet dus gekeken worden wat voor omgevingsgeluid er wél vaak op dijken te verwachten is. Hierbij kan gedacht worden aan passerende auto's, tractoren of wandelaars. Ook moet worden gekeken naar het schroefgeluid van schepen en de boeg- en hekgolven van schepen die op de dijk breken.

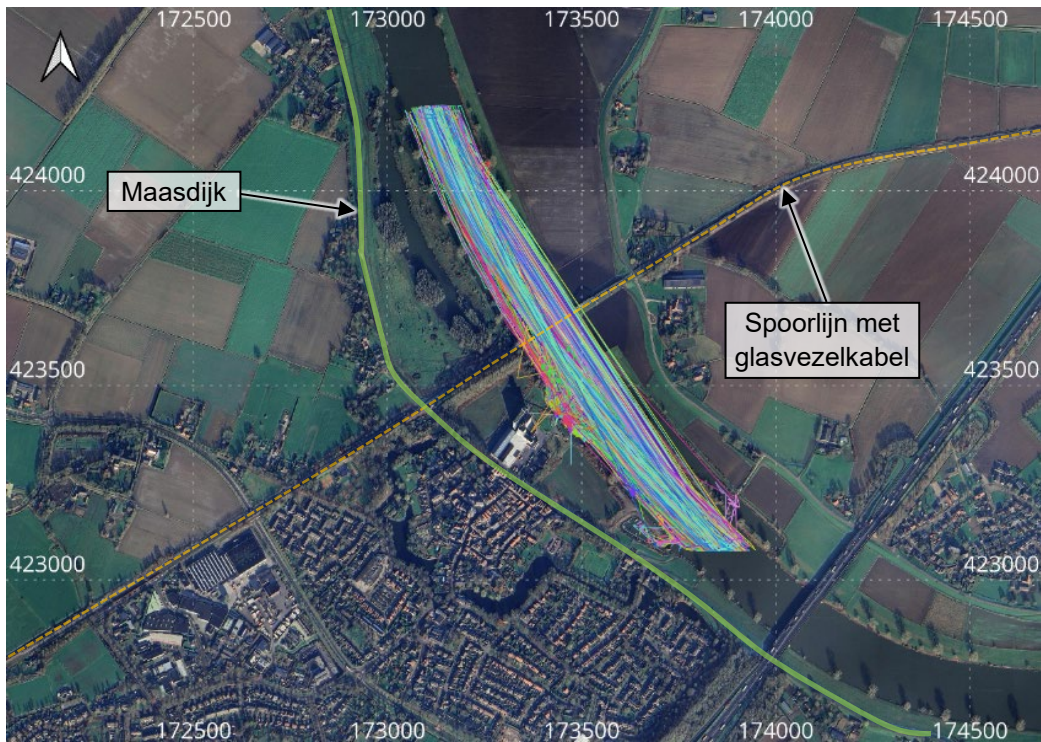
Dit laatste is kort bekeken om mee te nemen in de monitoringscampagne, omdat het gemeten spoorwegtraject ook de Maasdijk kruist. Echter, de ligging van de glasvezelkabel (haaks op de vaarrichtingen in de Maas) en de situering bij de brug is onvergelijkbaar met een glasvezel in de lengterichting van een dijk. Daarom is deze onderzoekslijn niet verder uitgewerkt.

Wel zijn de geanonimiseerde scheepsbewegingen bij Ravenstein opgevraagd bij Rijkswaterstaat (Figuur 1.1). Deze geven de locatie in de tijd, maar ook scheepsgrootte en snelheid van passerende schepen. Door slimme selecties te maken van bijvoorbeeld een groot, snel schip, dat vlak langs de oever vaart zal een goed signaal worden verkregen in de glasvezelkabel. Meer details hierover zijn te vinden in de aanbevelingen in Hoofdstuk 4.

---

<sup>1</sup> <https://www.rtdvrenthe.nl/varia/14382776/prorail-in-actie-om-gravende-bever-te-weren>

<sup>2</sup> <https://www.prorail.nl/nieuws/glasvezel-inzetten-als-sensoren>



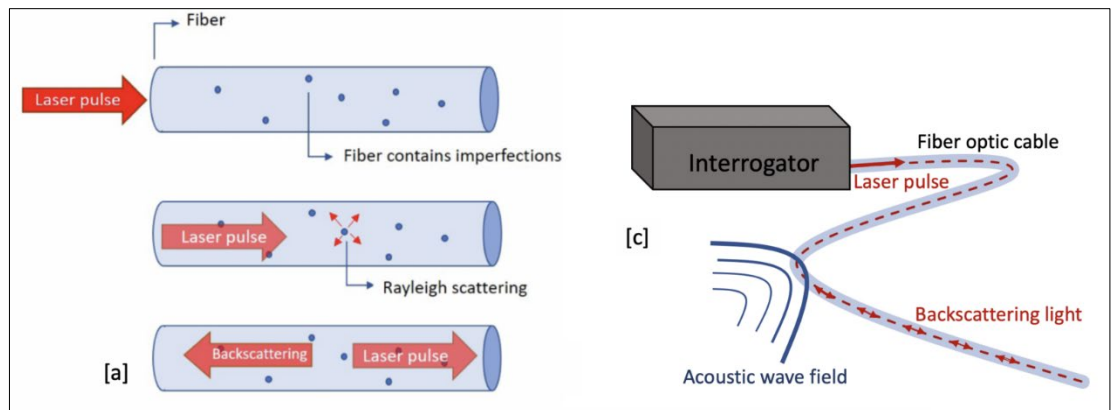
*Figuur 1.1 Alle scheepsbewegingen onder de spoorbrug bij Ravenstein tijdens de meetcampagne. Het spoor met daarnaast de glasvezelkabel (oranje stippellijn) kruist de Maasdijk (groene kromme).*

## 2 Methode

### 2.1 Glasvezelmonitoring

Glasvezelkabels kunnen ingezet worden om trillingen, temperatuur, vervorming of vorm te meten. Voor dit onderzoek is het meten van geluid/trillingen het meest relevant. De argumentatie hiervoor is opgenomen in het rapport dat hier direct vooraf ging (Van den Berg & Nieboer 2024). Een korte herhaling van het meetprincipe wordt hieronder beschreven (Fenta et al., 2021).

In gedistribueerde akoestische glasvezel monitoring wordt een glasvezelkern in een kabel langs diens volledige lengte ingezet als een sensor. Met een laser wordt een lichtstraal door de vezel gestuurd die op kleine imperfecties in de kabel een heel klein beetje van het licht terugkaatst, dit wordt 'backscatter' genoemd. Als de kabel zelfs maar een klein beetje vervormt door binnenkomend geluid of trilling, veranderen (lokaal) de afstanden tussen deze imperfecties, wat door de ontvanger wordt geregistreerd als een amplitude- of faseverschil in het teruggekaatste licht. Dit geeft de langs de hele kabel de reksnelheid ("strain rate") die is geïnduceerd door de akoestische signalen in de grond (geluid/ trillingen). Dit vormt de basis voor het gebruik van glasvezel als trillingssensor langs de hele kabel ('gedistribueerd').



Figuur 2.1 Meetprincipe akoestische glasvezelmonitoring.

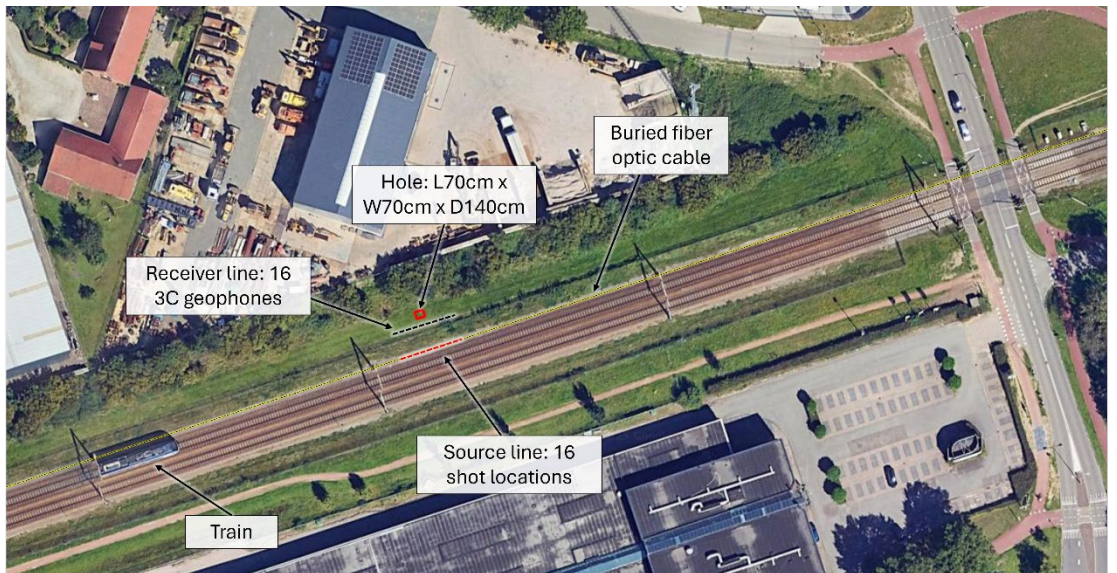
### 2.2 Meetlocatie

De monitoringscampagne van ProRail duurde 3 maanden en liep van medio maart tot in juni. Het traject dat werd bemeten loopt tussen Kleine Koolwijk tot net over de Maasbrug bij Ravenstein over een afstand van ongeveer 8 km (Figuur 2.2). De glasvezelkabel is ten noorden van dit traject gesitueerd en is begraven op 80 cm diepte. Het traject was gekozen omdat hier veel dierlijke graverij werd waargenomen door ecologen en wildcamera's van ProRail. De graverij werd langs dit traject niet veroorzaakt door bevers maar door dassen.

Naast het 'passief' monitoren van activiteit van gravers is er als onderdeel van de haalbaarheid ook een veldwerk uitgevoerd. Dit vond plaats meer westelijk van bovenstaand traject, in Wijchen vlak bij de spoorwegovergang Celciusstraat (Figuur 2.3). Op deze locatie werd een gat gegraven om de holddetectiemethode te testen. Het veldwerk wordt beschreven in §2.3.



Figuur 2.2 8 km lang meettraject tussen voor dierlijke graverij rond Ravenstein.



Figuur 2.3 Veldwerklocatie met zelf gegraven hol bij Wijchen (spoorwegovergang Celciusstraat).

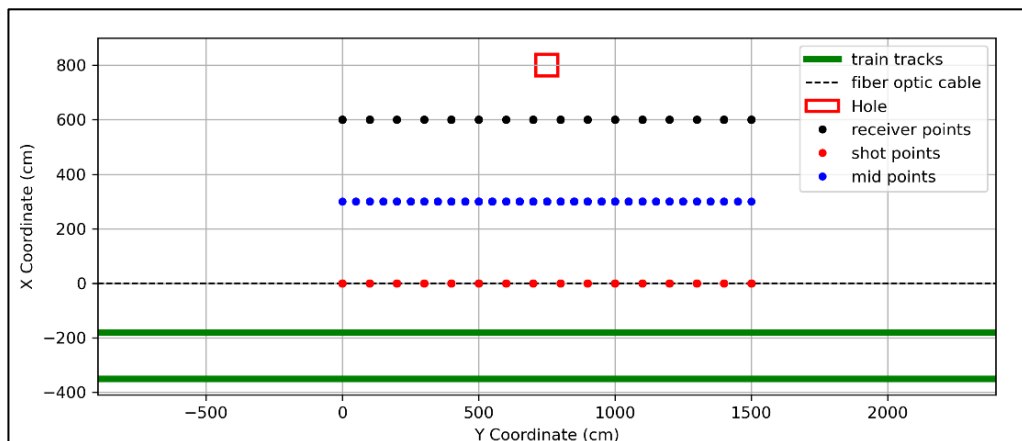
## 2.3 Veldwerk

Als aanvulling op het ‘passief’ monitoren van dierlijke graverij hebben Deltares en ProRail gezamenlijk een dag veldwerk georganiseerd. Omdat het tijdens de monitoringscampagne nog niet duidelijk was of er actieve graverij (voor direct geluid) of nieuwe hollen (voor interferenties) zouden ontstaan was het voor de haalbaarheid van belang om dit zelf in een gecontroleerde omgeving te doen. De focus van het veldwerk lag op holddetectie.

Het onderzoek is uitgevoerd op 7 augustus 2025 op een terrein beheerd door ProRail en buiten een scheidinghek met het spoor om de veiligheid te waarborgen. Naast de glasvezelkabelmetingen heeft Deltares ook een set van 16 drie-componenten gefoons geplaatst als een referentiemeting. De geluiden van de passerende treinen werden opgenomen met zowel de glasvezelkabel als met de gefoons. Ook is er nog een serie slagen op een plaat uitgevoerd over een afstand van 16 m, met elke meter 1 slag. Dit is een conventionele manier van seismische ondergrondonderzoek en is uitgevoerd om nog een extra validatiedataset te verkrijgen. Zie Tabel 2.1 voor een overzicht van alle metingen. Figuur 2.4 is een vergroot en schematisch overzicht van Figuur 2.3. Het geeft de opzet van de meetcampagne en de afstanden tussen:

- Het gegraven hol van 70 cm x 70 cm x 140 cm diep (zie Figuur 2.5a).
- 16 gefoons met een 1 meter onderlinge afstand (“receiver points”, gefoon in Figuur 2.5b en inkomende data in Figuur 2.5c).
- 16 hamerslagen op een plaat vlak naast het spoor (“shot points”) (zie Figuur 2.6).
- De ligging van het spoor.

De ‘mid points’ zijn relevant als er geluid is dat reflecteert op de horizontale gelaagdheid van de ondergrond. Dit bleek niet van belang tijdens de analyse.



Figuur 2.4 Schematische weergave van de veldwerklocatie met zelf gegraven hol bij Wijchen met de locaties van gegraven hol, gefoons, glasvezelkabel en de spoorbaan.



Figuur 2.5 (a) Het gegraven hol en een passerende trein, (b) Driecomponenten gefoon, (c) Trillingen van de gefoons komen binnen in het opnamesysteem.

Tabel 2.1 Overzicht metingen.

Onderdeel	Locatie	Geluidsbron	Ontvanger	Datum
<b>Monitoring</b>	Traject Ravenstein	Treinen (en omgevingsgeluid)	8 km glasvezel	Maart – Juni
<b>Veldwerk meting</b>	Spoorwegovergang Celciusstraat, Wijchen	Treinen (en omgevingsgeluid)	100 m glasvezel	7 Augustus
		Hamerslagen op plaat	100 m glasvezel	
		Treinen (en omgevingsgeluid)	16 m, elke meter 1 gefoon	
		Hamerslagen op plaat	16 m, elke meter 1 gefoon	



*Figuur 2.6 Medewerker van ProRail voert hamerslagen op een metalen plaat uit vlak naast het spoor. De medewerker heeft een speciale veiligheidstraining doorlopen om te mogen werken nabij het spoor.*

## 3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden eerst de resultaten uit de monitoring bij Ravenstein gepresenteerd (§3.1), gevolgd door de resultaten van het veldwerk bij Wijchen (§3.2).

### 3.1 Monitoring bewegingen en graafgeluiden

Wildcamera's hebben duidelijk activiteit vastgelegd binnen het monitoringsgebied, wat bevestigt dat er op 22 en 27 april dassen (maar geen bevers) daadwerkelijk aanwezig waren. Dit valt binnen de monitoringsperiode (Figuur 3.1). Opvallend is echter dat deze specifieke activiteit niet is waargenomen in de data van de glasvezelkabel. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de dassen zich niet direct in de nabijheid van het baanlichaam hebben begeven waar de glasvezelkabel is ingegraven, waardoor de trillingen of geluiden die door de dassen werden veroorzaakt buiten het detectiebereik van de kabel vielen. Dit benadrukt het belang van een slimme positionering van de glasvezel en de noodzaak om rekening te houden met het gedrag en de bewegingspatronen van gravende dieren. Zie hiervoor ook de aanbevelingen in Hoofdstuk 5.



Figuur 3.1 Een wildcamera heeft een das waargenomen op (a) 22 april en (b) op 27 april.

Doordat er geen controle is over de dasactiviteit tijdens de monitoringscampagne is het een lastige taak om indicaties hiervan te vinden in de glasvezeldata. We weten nog niet precies waar we naar op zoek zijn, dat wil zeggen wat voor geluid en trillingen gravers produceren en hoe deze geregistreerd worden door de glasvezelkabel. Daarom is er handmatig door de data gezocht en zijn er 2 instanties gevonden die waarschijnlijk dasactiviteit en dasgraverij laten zien. De trillingen (lichte kleuren) hier van zijn respectievelijk in Figuur 3.2 en Figuur 3.3 weergegeven.

Figuur 3.2 laten de trillingen zien die worden veroorzaakt door een kleine spoorloper. Menselijk spoorlopers zouden individuele stappen laten zien in de data en geven luidere trillingen<sup>2</sup>. Na inspectie bleek dat op de locaties bij channel 610 en 660 dassenhollen aanwezig waren. Zeer waarschijnlijk liep hier dus een das van het ene hol naar het andere. Doordat de channel spacing van de glasvezelkabel hier 1 m is, kan de x-as hier direct als meters afgelezen worden. Als we dus de hellingshoek van de (oranje) lijn door het 'migrerende' geluid berekenen komen we op de snelheid waarmee de das zich bewoog.

$$\text{das snelheid} = \frac{\text{Afstand tussen hollen (m)}}{\text{Wandeltijd (s)}} = \frac{50}{40} = 1.25 \text{ m/s}$$

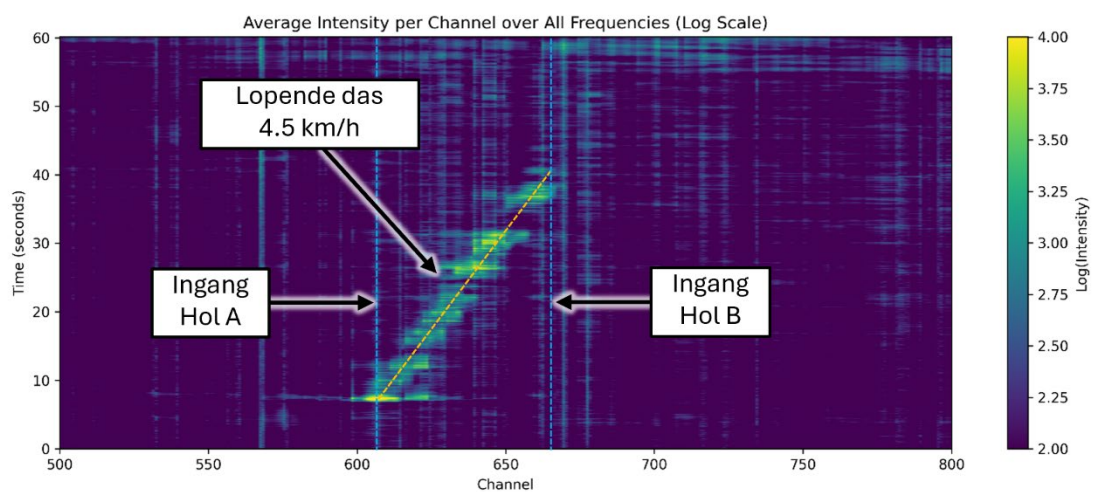
Dit komt overeen met 4.5 km/h wat een rustig drafje voor een das is. Het tweede voorbeeld (niet opgenomen in deze rapportage) gaf 9 km/h wat ook goed haalbaar is voor een das, die maximaal snelheden van 30 km/h kan halen (Bij12, 2017). Het detecteren van direct geluid van de grotere graver, de bever, is waarschijnlijk net zo goed of zelf beter haalbaar. Door de

grotere massa van de bever (typisch 2x zo groot), veroorzaakt deze sterkere trillingen bij beweging, die makkelijker detecteerbaar zijn.

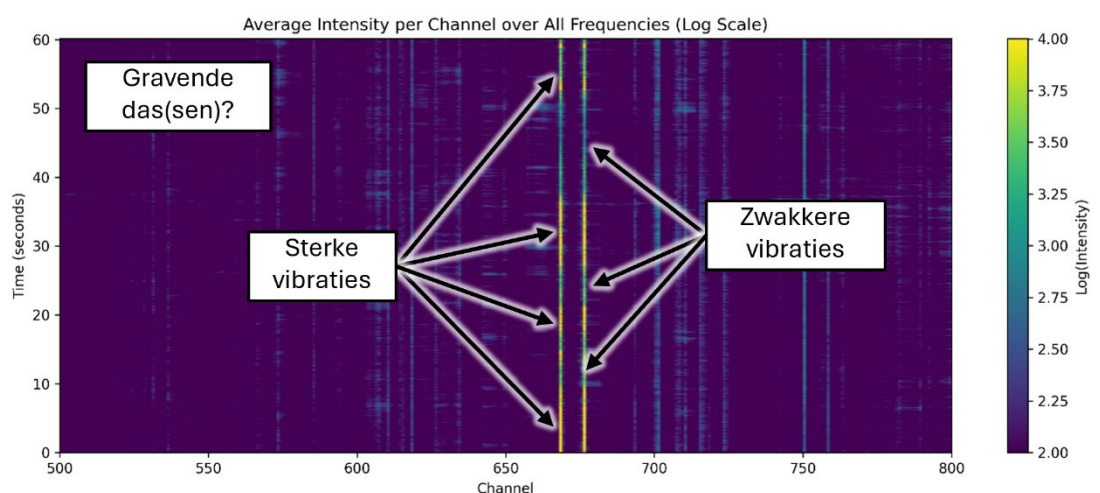
Figuur 3.3 laat vermoedelijk actieve graverij zien bij channel 660, dus waar bekend is dat er een hol aanwezig is. Hier zien we dat de trillingen niet migreren maar steeds op dezelfde plek blijven. Dit is een goede manier om het van andere bronnen van trillingen te scheiden, bijvoorbeeld van passerende treinen of auto's bij een spoorwegaanpak.

We lijken dus actieve graverij te zien, en door de tijd heen is te zien dat de trillingen in heftigheid toe- en afnemen. Speculerend zou dit verklaard kunnen worden door een das die eerst heel fanatiek graaft en daarna wat rustiger om op adem te komen. Het zou ook kunnen zijn dat er bij de heftigere trillingen meerdere dassen aan het graven zijn.

Deze beide manieren van dasdetectie, dus enerzijds het rondlopen en anderzijds het graven, kunnen dus gemeten worden met glasvezel, wanneer het dicht genoeg hierbij plaatsvindt. Het ontwikkelen van een algoritme voor het herkennen van specifiek deze trillingen zou een belangrijke volgende stap kunnen zijn (zie de aanbevelingen in Hoofdstuk 5).



Figuur 3.2 Trillingen geregistreerd door de glasvezelkabel van een das die van het ene naar het andere hol loopt. Door een lijn te trekken door de plekken waar de trillingen worden geregistreerd kan worden bepaald dat de snelheid van de das 4.5 km/h was.



Figuur 3.3 Trillingen die steeds op dezelfde plek worden geregistreerd bij Hol B geven een indicatie van graverij. Sterkere trillingen worden afgewisseld door zwakkere trillingen wat bijvoorbeeld wisseling van graafintensiteit zou kunnen aangeven.

## 3.2 Interferenties met gegraven holen

In deze paragraaf wordt bekeken of de interferenties (bijvoorbeeld 'echo's') van omgevingstrillingen met bestaande holen gedetecteerd kan worden. Dit onderwerp heeft een lagere Technology Readiness Level (TRL) dan het direct meten van geluid en heeft nog meer onderzoek, dat buiten de scope van deze studie ligt (zie aanbevelingen in Hoofdstuk 5). Hier worden al wel de eerste resultaten getoond. De gebruikte omgevingstrillingen zijn in dit geval natuurlijk voornamelijk van treinen. Ook wordt in de analyse naar hamerslagen op een plaat gekeken ('shotpoints' in Figuur 2.4) als controle. Deze twee trillingsbronnen gemeten met zowel gefoons als glasvezel worden in de volgende paragrafen behandeld, in de volgorde:

- Trillingen uit hamerslagen opgenomen door de gefoons (conventioneel).
- Trillingen uit hamerslagen opgenomen door glasvezel naast het spoor.
- Trillingen uit trein passages opgenomen door gefoons.
- Trillingen uit trein passage opgenomen door glasvezel naast het spoor ('einddoel').

De conventie bij het analyseren van seismische data is dat de verticale as de tijd geeft oplopend naar beneden. Alle figuren in dit hoofdstuk volgen die conventie.

### 3.2.1 Hamerslagen gemeten met gefoons

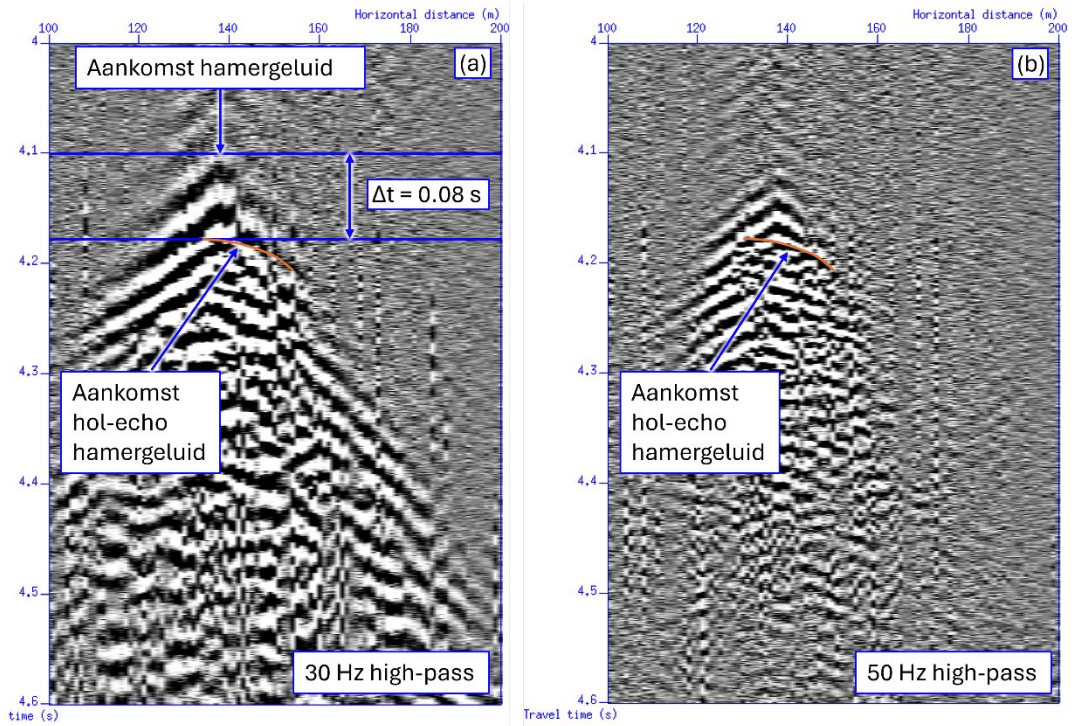
Dit is een conventionele manier van uitvoeren van reflectieseismiek voor het karakteriseren van de ondergrond, maar is dat niet voor deze toepassing. Doordat er maar 16 gefoons zijn ingezet is het patroon van echo's moeilijk te volgen. Een dieper gaande analyse van interne weerkaatsingen van de echo *in* het hol ging buiten de scope van dit project, maar zal worden onderzocht door een masterstudent aan de TU Delft waar Deltares ook bij betrokken blijft.

### 3.2.2 Hamerslagen gemeten met glasvezel

De trillingen van dezelfde hamerslagen zoals hierboven genoemd werden ook gemeten door 100 m glasvezel begraven langs het spoor (grijze stippellijn Figuur 2.4). De opname van één van deze hamerslagen (schot 16) is te zien in Figuur 3.4a. Waar 'aankomst hamergeluid' is aangegeven geeft het deel van de glasvezel weer dat het dichtst bij de hamerslag was, dus bij 'distance' 138 m. Deze eerste aankomst komt naar beide richtingen van de kabel lineair steeds iets later aan en zwakt af door de afstand. De zwart en witte kleuren geven de naar beneden gaande en de naar boven gaande beweging van de trillingen weer, wat vergeleken kan worden met rimpels in water.

De aankomst van de trilling die echoot tegen het hol is zichtbaar in de data en is aangegeven met de oranje kromme. Deze echo komt 0.08 seconden later aan dan de eerste aankomst. Figuur 3.4b geeft dezelfde data als in a, maar hier is een sterker filter toegepast zodat de echo beter zichtbaar is.

Het idee dat hier wordt toegepast is dat bij een verplaatsende bron de echo van het hol op zelfde plek blijft. De vertraging van de echo ten opzichte van de eerste aankomst geeft bij benadering de afstand van het hol ten opzichte van de glasvezel en dus het spoor. Hierbij is in dit geval de aanname gemaakt van de voortplantingsnelheid van de trilling van 240 m/s.

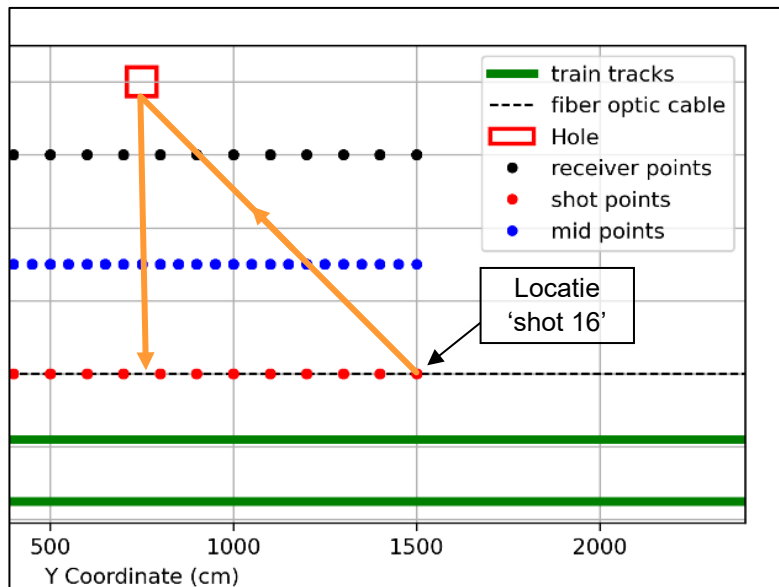


Figuur 3.4 Glasvezeldata uit 1 hamerslag met een lage-frequentie filter toegepast onder (a) 30 Hz om de aankomst van het de eerste trilling te zien en (b) 50 Hz om de hol-echo goed te zien.

Ter controle kan de verwachte aankomsttijd van de hol-echo ten opzichte van de eerste aankomsttijd uit de opzet van het experiment worden bepaald. In Figuur 3.5 is met de oranje pijlen het trillingsgolfpad aangegeven van de hol-echo: van de locatie van 'shot 16' en weer terug de glasvezelkabel.

$$aankomsttijd\ echo\ (s) = \frac{\text{Trillingsgolfpad (m)}}{\text{Trillingsgolfsnelheid}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = \frac{8.0 + \sqrt{7.5^2 + 8.0^2}}{240} = 0.079\ \text{seconden}$$

Dit komt goed overeen met de observaties uit de data in Figuur 3.4a.



Figuur 3.5 Opzet meetopstelling met het trillingsgolfpad van de snelste hol-echo.

### 3.2.3 Treinpassages gemeten met gefoons

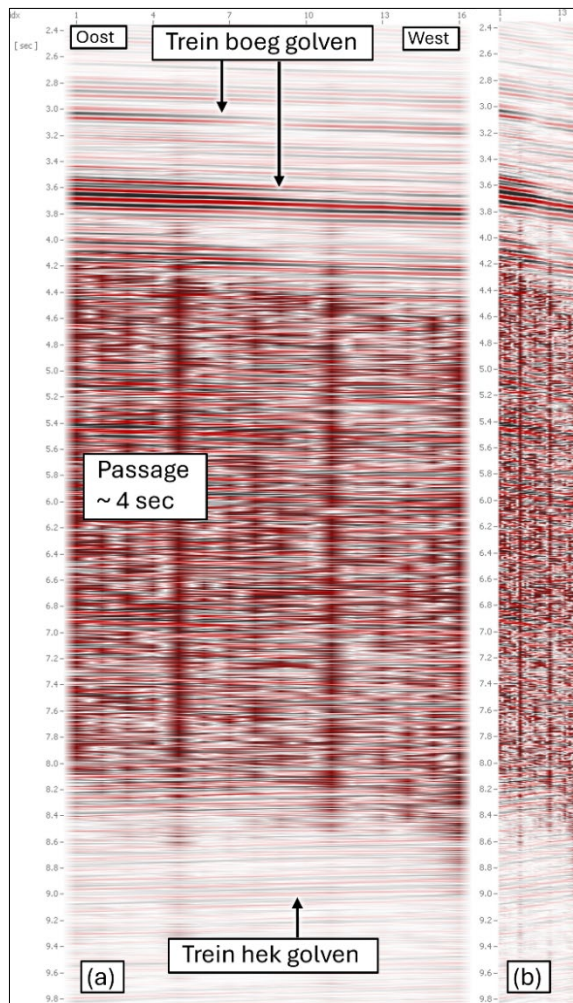
Anders dan bij een hamerslag, geven de trillingen van treinpassages allerlei verschillende golven door de grond, waardoor een hol-echo hier niet direct uit te halen is. Figuur 3.6a laat de trillingen gezien die gemeten zijn met de gefoons bij het passeren van de trein uit Nijmegen naar Den Bosch om 12:56 uur. Figuur 3.6b laat dezelfde data zien, maar met een samengedrukte horizontale as zodat hellingen van de lijnen beter zichtbaar zijn. De kleuren (hier zwart en rood) geven net als eerder de naar beneden gaande en de naar boven gaande beweging van de trillingen weer.

Al enkele seconden voor dat de trein de gefoons passeert worden de boeggolven die de trein door de grond genereert al geregistreerd. Aan de hand van de helling van het signaal van de boeggolven is af te leiden waar de trein vandaan komt. Dit is het beste te zien in Figuur 3.6b. De boeggolven komen als eerste aan bij gefoon 1 en als laats bij gefoon 16. De gefoons zijn oost-west georiënteerd, dus komt de trein uit het oosten, uit Nijmegen.

Een paar seconden later passeert de trein gedurende ongeveer 4 seconden. De trillingen die nu geregistreerd worden zijn complex, chaotisch en hebben relatief hoge frequenties in verhouding tot de boeggolven.

De hekgolven komen als de trein voorbij is en komen dus uit de westelijke richting, wat in Figuur 3.6b weer het duidelijkst te zien is.

Het vergelijken van deze signalen vóór en na het gat graven is door het chaotisch karakter, zelfs na filtering en andere databewerkingen, niet zinvol uit te voeren. Hiervoor is een andere aanpak nodig die gebruik maakt van het samennemen van meerdere signalen.

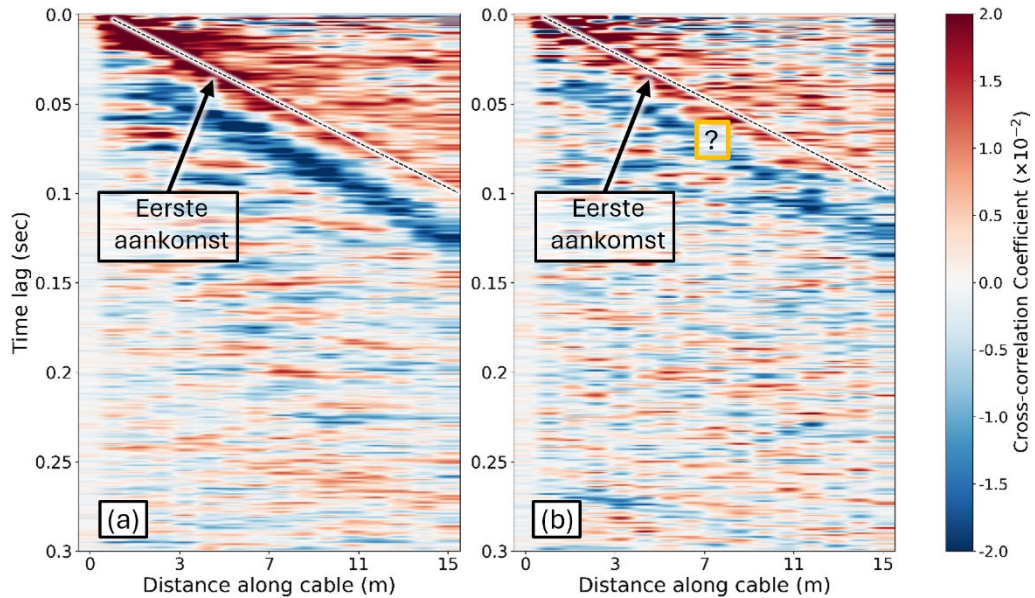


**Figuur 3.6** Trillingen gemeten door de geofoons van de trein Nijmegen - Den Bosch die om 12:56 langs de veldwerklocatie reed. De data zijn hetzelfde in (a) en (b), maar zijn in (b) horizontaal gecompriemd om de trends van de boeg- en hekgolven te accentueren.

Door meerdere treinpassages te combineren – vanuit beide richtingen, met verschillende snelheden en lengtes, en in aanwezigheid van ander omgevingsgeluid – ontstaat een complex signaal. Uit deze combinatie verkrijgen we een zogenoemd ‘trillingsgolfveld’ rond onze meetopstelling. Door een proces dat seismische interferometrie heet (Wapenaar et al., 2010), dat correlaties tussen de verschillende signalen uitrekt, krijgen we een soort ‘virtuele echo’ tussen onze meetpunten. Hierdoor worden de data vergelijkbaar met die van de hamerslag data van Figuur 3.4, waar de eerste aankomst van de trillingen van de virtuele bron (‘hamerslag’) op tijdstip 0 seconden is en bij gefoon nummer 1.

De analyse is uitgevoerd op signalen van vóór en na het graven van het gat. De resultaten hiervan zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 3.7a en 3.7b. Er is gebruik gemaakt van Python pakket NoisPy (Jiang et al., 2020). De eerste aankomst bij de verschillende geofoons is in beide deelfiguren duidelijk (zwarte stippellijn), maar in Figuur 3.7b is er geen echo van het hol te onderscheiden zoals dit in Figuur 3.4 wél het geval was.

Het beperkte aantal gefoons, maar vooral de hoeveelheid opgenomen data heeft een groot effect op het resultaat van de interferometrie. Tijdens het veldwerk zijn er maar 12 passages met 8 seconden vóór het graven, en 7 passages met 8 seconden aan data ná het graven opgenomen. Het verschil tussen dit aantal passages is al zichtbaar in Figuur 3.7, waar (a) een stuk duidelijker resultaat geeft dan (b). Als er voor beide een stuk meer data waren opgenomen, was er wellicht meer uit deze analyse gekomen, maar afgaande op onderstaande data, was interferometrie niet succesvol voor het opsporen van het zelf gegraven hol.



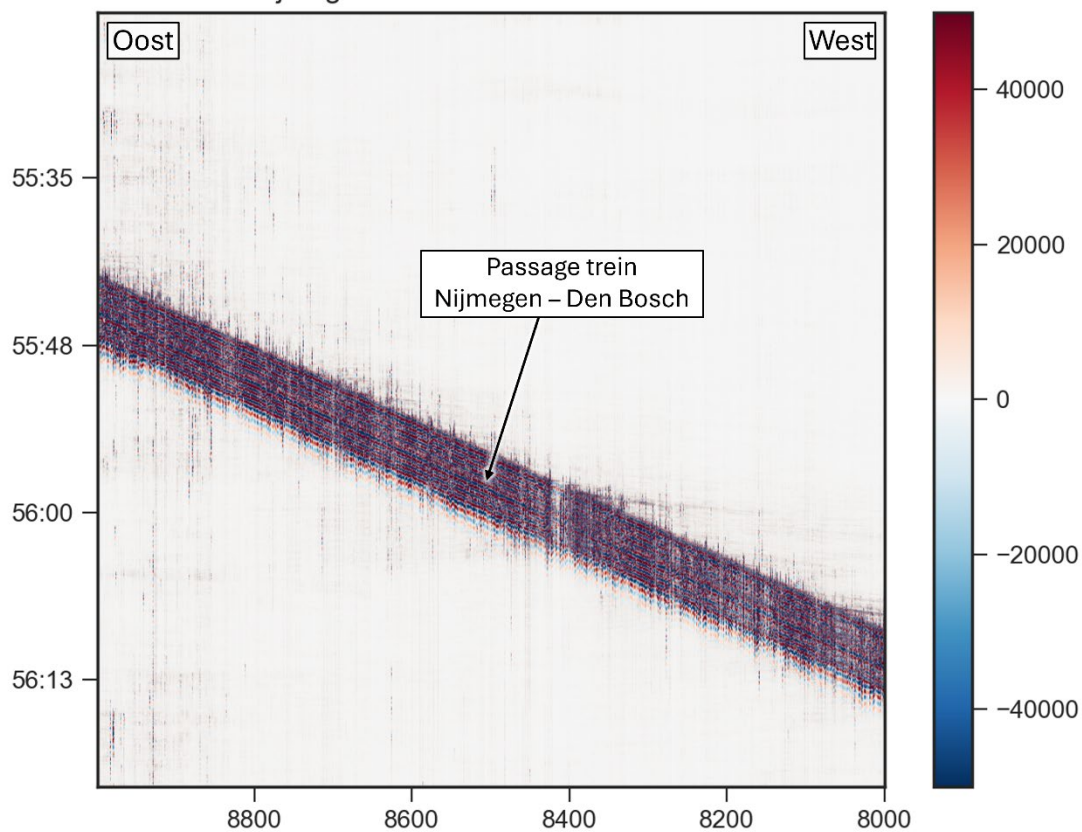
Figuur 3.7 Resultaat van de interferometrische analyse (a) voor het graven van het hol en (b) na het graven van het hol. Er is geen 'echo' van het hol te onderscheiden zoals wél het geval was in Figuur 3.4.

### 3.2.4 Treinpassages gemeten met glasvezel

Tijdens de veldwerkdag zijn de trillingen van alle treinpassages ook opgenomen met de glasvezelkabels langs het spoor. Figuur 3.8 geeft dezelfde passage van de trein Nijmegen - Den Bosch om 12:56 uur weer zoals ook geregistreerd door de gefoons (Figuur 3.6). Seismische interferometrie is niet toegepast op deze data, omdat dit niet binnen de scope van dit project paste. De analyse hiervan is heel veel meer omvattend door het heel veel hogere datavolume van de glasvezelkabels en ook omdat er uit de vorige paragraaf blijkt dat er veel data (dus vele passages) nodig zijn om tot een goed resultaat te komen.

Deze dataset blijft echter wel beschikbaar, dus een vervolgonderzoek is mogelijk (zie verder de aanbevelingen in Hoofdstuk 5).

Trein Nijmegen - Den Bosch - 2025-08-07 12:56



*Figuur 3.8 Ruwe data van de trillingen gemeten door de glasvezelkabel van de trein Nijmegen – Den Bosch die om 12:56 langs de veldwerklocatie reed.*

## 4 Conclusies

### 4.1 Haalbaarheid van het detecteren van loop- en graafactiviteit van dassen

De veldstudie toont aan dat het detecteren van zowel loop- als graafactiviteit van dassen – en daarmee ook van bevers - met behulp van glasvezeltechnologie (Distributed Acoustic Sensing, DAS) technisch haalbaar is, mits de glasvezelkabel zich binnen enkele meters van de activiteit bevindt. In de praktijk zijn er in de data duidelijke trillingen geïdentificeerd die overeenkomen met een das die tussen hopen loopt, waarbij de loopsnelheid uit de data kan worden afgeleid, en met actieve graafactiviteiten op een vaste locatie. De intensiteit en het patroon van de trillingen maken het mogelijk om onderscheid te maken tussen lopen en graven en andere, niet gerelateerde omgevingstrillingen. Dit biedt perspectief voor de verdere ontwikkeling van automatische detectie-algoritmes, die na enige aanpassing ook inzetbaar zijn voor andere gravers zoals bevers en in andere omgevingen zoals dijken.

### 4.2 Haalbaarheid van het detecteren van hopen met seismische interferometrie van treintrillingen

Het detecteren van hopen via seismische interferometrie op basis van treintrillingen blijkt in deze studie uitdagender. Hoewel het principe in theorie toepasbaar is—door het analyseren van echo's van trillingen veroorzaakt door externe bronnen zoals treinen zoals gedetecteerd met de DAS —waren de resultaten in de praktijk beperkt.

Met conventionele hamerslagen konden echo's van een hol in de glasvezeldata worden herkend, maar bij toepassing van seismische interferometrie op treintrillingen was het effect van het hol niet overtuigend zichtbaar. Dit komt deels omdat de analyse alleen op de geofondata is toegepast. Hiervoor was maar een beperkte hoeveelheid meetdata beschikbaar wat een grote beperking is voor interferometrie. De interferometrische analyse van de glasvezeldata viel buiten de scope van dit onderzoek. De dataset is beschikbaar om deze analyse alsnog uit te voeren. Door het grote datavolume van die de glasvezel produceert is dit wel rekenintensief. Er liggen dus nog mogelijkheden voor interferometrie, maar het Technology Readiness Level (TRL) voor deze toepassing is een stuk lager dan het direct detecteren van gravers en graverij.

# 5 Aanbevelingen

## 5.1 Veldproef als cruciale vervolgstap

Het uitvoeren van een uitgebreide veldproef in een dijkrelevante omgeving is essentieel voor de verdere ontwikkeling en toepassing van glasvezeltechnologie voor het detecteren van dierlijke graverijen. Plaats een glasvezelkabel in de kleibedekking van een dijk en monitor deze gedurende een langere periode met DAS.

Deze proef maakt het mogelijk om:

- Realistische data te verzamelen over beveractiviteit (indien mogelijk met gezenderde dieren).
- Omgevingsgeluid en trillingsbronnen bij dijken te inventariseren.
- Slimme algoritmes te trainen en te testen voor automatische detectie, en de haalbaarheid van holddetectie met interferometrie in de praktijk in een dijkomgeving te onderzoeken.

De veldproef vormt de basis voor alle verdere stappen en is noodzakelijk om de techniek te valideren en te optimaliseren voor dijktoepassingen.

## 5.2 Focus op actieve detectie van dierlijke activiteit

Richt het onderzoek primair op het detecteren van actief geluid, zoals lopende en gravende dieren. Deze methode is technisch haalbaar gebleken, mits de kabel zich dicht bij de activiteit bevindt. Detectie van holen met interferometrie kan in een latere fase worden toegevoegd, omdat dit een andere analysemethode vereist en het TRL hiervoor lager is. De kennis is hier wel voor ontwikkeld, maar voor deze toepassing is er nog wel bigdata analyse nodig om de haalbaarheid te kunnen inschatten.

## 5.3 Holddetectie met interferometrie

Holddetectie met interferometrie blijft relevant, vooral door gebruik te maken van omgevingstrillingen over een langere periode (uren in plaats van minuten). In deze studie is met geofoons slechts gedurende enkele minuten gemeten bij treinpassages. Voor een succesvolle toepassing is het uitwerken van glasvezeldata waar een veel groter datavolume is opgenomen, noodzakelijk.

## 5.4 AI-algoritmes trainen met praktijkdata

Gebruik de data uit de veldproef om AI-algoritmes te trainen. Verzamel tientallen voorbeelden van lopende en gravende bevers, zodat automatische detectie mogelijk wordt. Als zenderen van bevers mogelijk is, is dit een perfecte validatiemethode.

## 5.5 Ruisdatabase en filtering van omgevingsgeluid

Inventariseer en analyseer alle relevante trillingsbronnen bij dijken, zoals scheepvaart, verkeer en andere omgevingsgeluiden. Ontwikkel methoden om deze ruis te filteren, zodat trillingen veroorzaakt door bevers en andere gravers beter geïsoleerd kunnen worden.

# Referenties

- Rijkswaterstaat (2013) Innovatiebehoefte in beeld, Innovatieopgave Rijkswaterstaat 2015-2025, Rijkswaterstaat – Corporate Innovatie Programma d.d. 27 september 2013  
[https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/28456/innovatieopgave\\_rijkswaterstaat\\_2015-2025.pdf](https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/28456/innovatieopgave_rijkswaterstaat_2015-2025.pdf)
- Van den Berg & Nieboer (2024). Dierlijke graverijen detecteren met glasvezel, onderzoek naar mogelijkheden, Deltares rapport met kenmerk11211520-007-BGS-000111210320-010-BGS-0001  
[https://publications.deltares.nl/11210320\\_010\\_0001.pdf](https://publications.deltares.nl/11210320_010_0001.pdf)
- Fenta et al. (2021), Fenta, Mulugeta & Szanyi, János. Fibre Optic Methods of Prospecting: A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics. *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09634-8>
- Bij12 (2017), Kennis document Das (Meles meles), versie 1.0. <https://www.bij12.nl/wp-content/uploads/2023/11/Kennisdocument-Das.pdf>
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., & Verdel, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications. *Geophysics*, 75(5), 75A195–75A209. <https://doi.org/10.1190/1.3457445>
- Jiang et al. (2020), Jiang, C. and Denolle, M. NoisePy: a new high-performance python tool for seismic ambient noise seismology. *Seismological Research Letter* 91, no. 3 2020: 1853–1866. <https://doi.org/10.1785/0220190364>

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)