

Dierlijke graverijen detecteren met glasvezel

Onderzoek naar mogelijkheden



Dierlijke graverijen detecteren met glasvezel

Onderzoek naar mogelijkheden

Auteur(s)

Frans van den Berg

Roeland Nieboer

Dierlijke graverijen detecteren met glasvezel

Onderzoek naar mogelijkheden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Reindert Stellingwerff
Referenties	Corporate innovatie programma
Trefwoorden	Dierlijke graverij, waterkeringen, graverij, glasvezel, DAS, detectie, bever

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	04-12-2024
Projectnummer	11210320-010
Document ID	11210320-010-BGS-0001
Pagina's	25
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Frans van den Berg Roeland Nieboer	

Samenvatting

Dierlijke graverijen in waterkeringen en infrastructuur leveren een verhoogd risico op voor de veiligheid van deze lichamen. Om het risico te verminderen is het van belang dat deze graverijen tijdig gelokaliseerd en hersteld worden. Vooral de detectie van de bevergraverijen is lastig, omdat de bever de toegang tot zijn hol onder de waterlijn, van bijvoorbeeld een teen- of spoorloot graaft.

ProRail heeft langs het spoor glasvezelkabel liggen om verschillende metingen uit te voeren. Het idee is om met deze glasvezelkabel gravende dieren, zoals bever en das, te kunnen detecteren. Hiervoor worden eind 2024, begin 2025 langs een spoortraject metingen uitgevoerd op een traject waar gravende bevers en/of dassen worden verwacht.

Vooruitlopend op dat onderzoek is in dit rapport aangegeven welke glasvezeltechniek hiervoor wordt gebruikt, 'Distributed Acoustic Sensing' (DAS), en wordt deze techniek nader beschreven. Tevens zijn meetsimulaties uitgevoerd als proof of concept middels GeoSim. Deze meetsimulaties geven een positieve eerste indruk van de te gebruiken techniek. De simulaties zijn voor de geavanceerde gebruiker volledig reproduceerbaar en FAIR¹ gemaakt.

Vooruitlopend op het plaatsen van glasvezel in de dijken is een aantal dijkprojecten beschreven waar al glasvezel is toegepast met als doel om te bezien hoe deze glasvezels in de ondergrond zijn aangebracht en welke lessen hieruit zijn geleerd.

Ook is vooruitgeblikt naar de verwachte grote datavolumes voor het meten van hoogfrequente trillingen over lange afstanden en of real-time processing met 'edge computing' hierbij een rol kan spelen. Uit deze analyse volgt dat bij het meten van hoger frequente trillingen (kilohertz) en over lange afstanden (kilometers), het datavolume van DAS metingen snel oploopt. Er zijn verschillende manieren om hier mee op te gaan. Er kan bijvoorbeeld worden gekozen worden om vooral, of alleen, op bepaalde (kritieke) tijdsintervallen te meten, bijvoorbeeld bij hoog water. Ook kan worden gekeken naar real-time verwerken met 'edge computing'. Hierbij wordt de data gelijk, op de plek waar gemeten wordt, verwerkt en wordt de relevante informatie eruit gehaald. De ruwe data hoeft vervolgens niet bewaard te worden.

¹ FAIR-principes zijn gecreëerd met de bedoeling de vindbaarheid, toegankelijkheid, interoperabiliteit en herbruikbaarheid van digitale bronnen te verbeteren. FAIR is de afkorting van de Engelse termen "Findability, Accessibility, Interoperability, en Reusability".

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Context	6
1.2	Probleemstelling	6
1.3	Aanpak	7
2	Glasvezelmonitoring	8
2.1	Meetprincipe	8
2.2	Verschillende types backscatter voor verschillende metingen	8
2.3	Innovatie op het gebied van kabelomhullingen	9
2.4	Keuze voor detectie van dierlijke graverij – DAS (Rayleigh scattering)	9
3	Simulaties	11
3.1	Aanpak met GeoSim	11
3.2	Meetsimulaties	12
3.2.1	Probleem beschrijving en parameterisatie	12
3.2.2	Direct graafgeluid uit graafgang in een dijk	13
3.2.3	Interferentie omgevingstrillingen en -geluid met graafgang in een dijk	14
3.3	Reproduceerbaarheid en FAIR data	16
4	Mogelijkheden voor detectie van graverijen in waterkeringen	17
4.1	Verschillende projecten met glasvezel in waterkeringen	17
4.1.1	Inleiding	17
4.1.2	Dijkversterking langs de Keen	17
4.1.3	IJkdijk	19
4.1.4	Gele rivier	19
4.1.5	Kosten	20
4.1.6	Overige	21
4.2	Glasvezeltechniek met Distributed Acoustics Sensing (DAS)	21
5	Conclusies en aandachtspunten	23
5.1	Conclusies	23
5.2	Aandachtspunten	23
	Referenties	24

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 sleuteldeur 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 aangepast. Dit houdt in dat het van belang is om snel te reageren bij een startende graverij van een bever of das (die ook beschermd is). Bij vestiging van deze dieren is het niet meer zo gemakkelijk om deze te verplaatsen.

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

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 Taarlo².

Langs het spoor in Nederland liggen glasvezelkabels, die voor verschillende doelen worden gebruikt, zoals het eigen communicatienetwerk (GSM-R), maar ook bijvoorbeeld als trillingssensor³.

Het onderzoek naar de vindbaarheid van bevers in de ondergrond zal worden uitgevoerd middels verschillende onderdelen van een glasvezelonderzoek. Dit rapport kan gezien worden als een inleiding voor het onderzoek dat eind 2024, begin 2025 door ProRail uitgevoerd wordt naar het inzetten van de glasvezel ter detectie van bevergraverijen. Het uit te voeren onderzoek heeft als doel om te bepalen of het mogelijk is om het gegraveerde van bevers en dassen, die een trilling veroorzaken (een zogenaamd spectrum), te kunnen identificeren en zo te bepalen waar langs het spoor wordt gegraven. Hierdoor zou men tijdig kunnen ingrijpen, omdat men dan exact weet waar de graverij heeft plaatsgevonden.

ProRail gaat samen met de Deltares de analyse van de data uitvoeren en de verdere mogelijkheden onderzoeken.

In dit rapport wordt aangegeven welke glasvezeltechniek hiervoor wordt gebruikt en wordt deze nader beschreven. Tevens zijn meetsimulaties uitgevoerd middels GeoSim⁴ (zie paragraaf 3.1) die een proof of concept geven van het voorgesteld meetprincipe voor de detectie van dierlijke graverij met 'Distributed Acoustic Sensing' (DAS). Vooruitlopend op het mogelijk plaatsen van glasvezel in de dijken is ook een aantal dijkprojecten beschreven waar al glasvezel is toegepast met als doel om te bezien hoe deze glasvezels in de ondergrond zijn aangebracht en welke lessen hieruit zijn geleerd.

² <https://www.rtvdrenthe.nl/varia/14382776/prorail-in-actie-om-gravende-bever-te-weren>

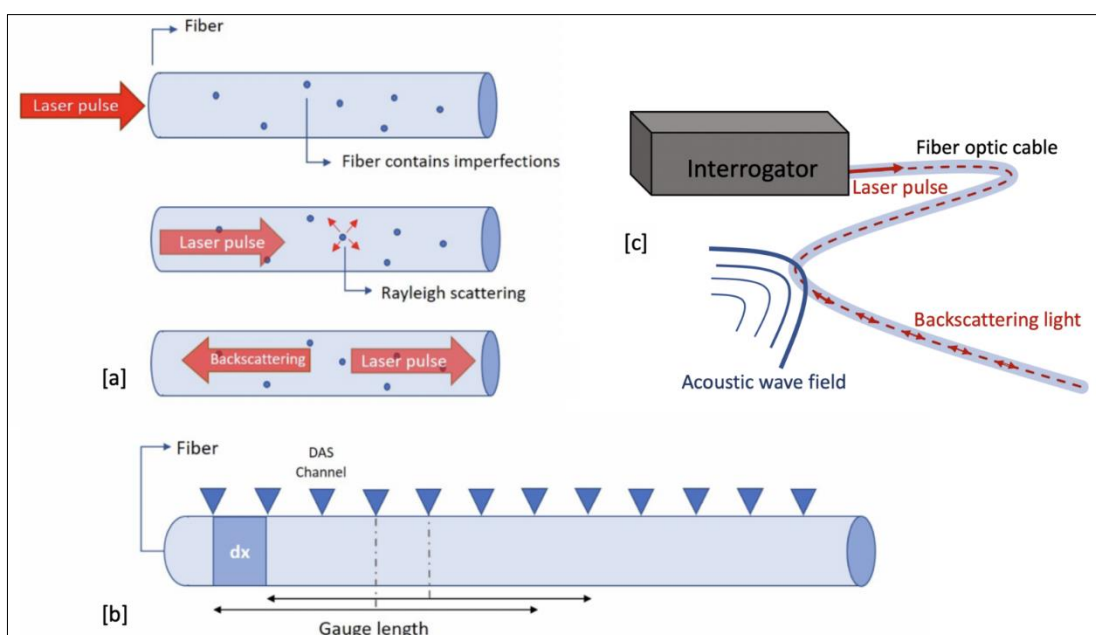
³ <https://www.prorail.nl/nieuws/glasvezel-inzetten-als-sensoren>

⁴ Een door Deltares ontwikkelde simulatiemethodiek van monitoring onder laboratoriumomstandigheden

2 Glasvezelmonitoring

2.1 Meetprincipe

In gedistribueerde 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 zelf maar een klein beetje vervormt, veranderen (lokaal) de afstanden tussen deze imperfecties, wat door de ontvanger (interrogator) wordt geregistreerd als een amplitude- of faseverschil in het teruggekaatste licht. Om de ruis te verminderen wordt de gemeten backscatter over een bepaald lengte-interval gemeten, dat wordt de 'gauge length' genoemd. Er wordt een gemiddeld signaal berekend over dit lengte-interval. Vaak kan deze lengte ingesteld worden, hierbij moet dus enerzijds worden gekeken naar het ruisniveau en anderzijds naar de gewenste resolutie. Figuur 2.1 geeft een overzicht van de beschreven werking.



Figuur 2.1 [a] Schematische tekening van het meetprincipe met glasvezel. Door een vervorming, in dit geval door een akoestische golf (c), veranderen de posities van imperfecties in de glasvezel ten opzichte van elkaar. Dit kan worden gedetecteerd door het amplitude- of faseverschil te meten in het teruggekaatste licht (backscatter) van een laserpuls (a). Door het signaal te middelen over een bepaalde afstand (de 'gauge length') wordt het ruisniveau naar beneden gebracht, maar dit gaat ten koste van de horizontale resolutie (b). Figuur aangepast naar Nap (2020).

2.2 Verschillende types backscatter voor verschillende metingen

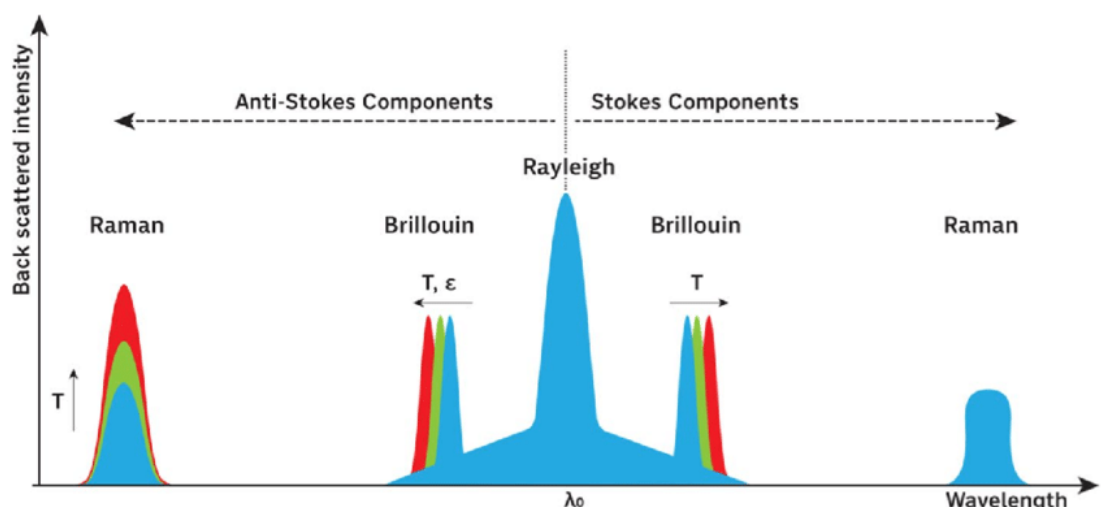
Er zijn verschillende fysische processen die een vervorming van de glasvezelkabel kunnen veroorzaken die met verschillende typen backscatter kunnen worden gemeten. De vervorming van de kabel kan mechanisch van aard zijn, er kan bijvoorbeeld rek op de kabel komen, maar kan ook worden veroorzaakt door verandering van temperatuur. Ook kunnen trillingen en geluid heel kortstondige vervormingen van de kabel geven, die ook kunnen worden gemeten.

Er zijn drie verschillende vormen van backscatter op verschillende golflengtes die worden waargenomen en die gevoelig zijn voor verschillende fysische processen en daarom hun specifieke toepassingen hebben voor metingen.

In alle gevallen worden metingen overall, langs de volledige lengte van de kabel verkregen, daarom worden deze metingen gedistribueerd ('distributed') genoemd:

- Raman scattering heeft de grootste gevoeligheid voor vervorming van de kabel door temperatuur. Metingen met Raman scattering worden 'distributed temperature sensing' (DTS) genoemd.
- Brillouin scattering is gevoelig voor mechanische vervorming van de kabel. Deze metingen worden 'distributed strain sensing' (DSS) genoemd.
- Rayleigh scattering is gevoelig voor het meten van kortstondige trilling en geluid. Deze metingen worden 'distributed acoustic sensing' (DAS) genoemd. Deze vorm wordt in dit rapport nader onderzocht voor de toepassing van de detectie van dierlijke graverijen.

Figuur 2.2 geeft een overzicht van de drie verschillende vormen van backscatter. λ_0 is de golflengte van het licht dat wordt uitgezonden door de laser. De 'anti-Stokes' componenten geven backscatter op lagere golflengtes dan de laser. Deze zijn het gevoeligst voor vervormingen en daarom het meest geschikt voor metingen.



Figuur 2.3 Drie verschillende vormen van backscatter waar (1) Raman scattering sterker of zwakker wordt bij temperatuurverandering, (2) Brillouin scattering een faseverandering krijgt bij mechanisch vervorming en (3) Rayleigh scattering een faseverandering krijgt bij kortstondige vervorming door trilling of geluid. De anti-Stokes componenten (golflengtes lager dan de laser input λ_0) zijn het gevoeligst en daarom het meest bruikbaar voor metingen. Figuur uit Di Palma (2024).

2.3 Innovatie op het gebied van kabelomhullingen

Een nieuwe ontwikkeling binnen de glasvezelmonitoring is de vergroting van gevoeligheid voor een bepaalde fysische parameter door een specifieke omhulling te gebruiken. Een omhulling gemaakt van een materiaal dat sterk uitzet bij een temperatuurverandering geeft een sterke vervorming van de kabel. Zo kan een kleine temperatuurverandering gemeten worden door strain sensing (DSS) door het meten van vervorming met Brillouin scattering. Er zijn ook coatings die geluidsversterkend kunnen werken, maar ook bijvoorbeeld die osmotisch uitzetten, zodat de mate van vervorming een verandering van saliniteit in water kan weergeven. Er is veel innovatie in deze ontwikkelingen, maar er is ook nog veel onderzoek nodig om gemeten vervorming te kalibreren aan de daadwerkelijk fysisch te meten parameter.

2.4 Keuze voor detectie van dierlijke graverij – DAS (Rayleigh scattering)

In dit project onderzoeken we de toepasbaarheid van akoestische glasvezelmeteringen (distributed acoustic sensing of DAS) met Rayleigh scattering voor de detectie van dierlijke graverij.

Dit doen we door te kijken naar (1) directe detectie van graafgeluiden en (2) door te kijken naar veranderingen van omgevingstrillingen en geluid door interferentie hiervan met een nieuw ontstane graafgang in een dijk. Deze twee principes worden verder onderzocht aan de hand van meetsimulaties die een 'proof of concept' geven voor een simpele, ideale situatie in Hoofdstuk 3.

Het voordeel van DAS is dat de graverij niet heel nabij de detectiekabel hoeft zijn. Dit is wel het geval bij strain sensing (DSS met Brillouin scatter), want als de kabel niet fysiek vervormt, door bijvoorbeeld verplaatsing van de grond door inzakking, wordt de graverij niet gedetecteerd. Temperatuurmetingen (DTS met Raman) lijkt het minst kansrijk voor detectie van graverijen.

Innovaties op het gebied van kabelomhullingen dienen goed gevolgd te worden. Bijvoorbeeld als er een omhulling komt die de gevoeligheid verhoogt voor specifieke geluidsfrequenties (zeg graafgeluid op 3 kilohertz). Dit is nu nog op een te laag TRL-niveau⁵ om meegenomen te worden in deze studie.

⁵ De TRL's (Technical Readiness levels) geven de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is. Dus klaar om naar de markt te gaan.

3 Simulaties

3.1 Aanpak met GeoSim

De glasvezeltechniek zoals hier gebruikt is een geofysische onderzoeksmethode. In de geofysica is het niet altijd mogelijk om vooraf een inschatting te maken van de haalbaarheid van een bepaalde techniek voor het oplossen van een ondergrond gerelateerd probleem. Hiervoor heeft Deltares de GeoSim-aanpak ontwikkeld.

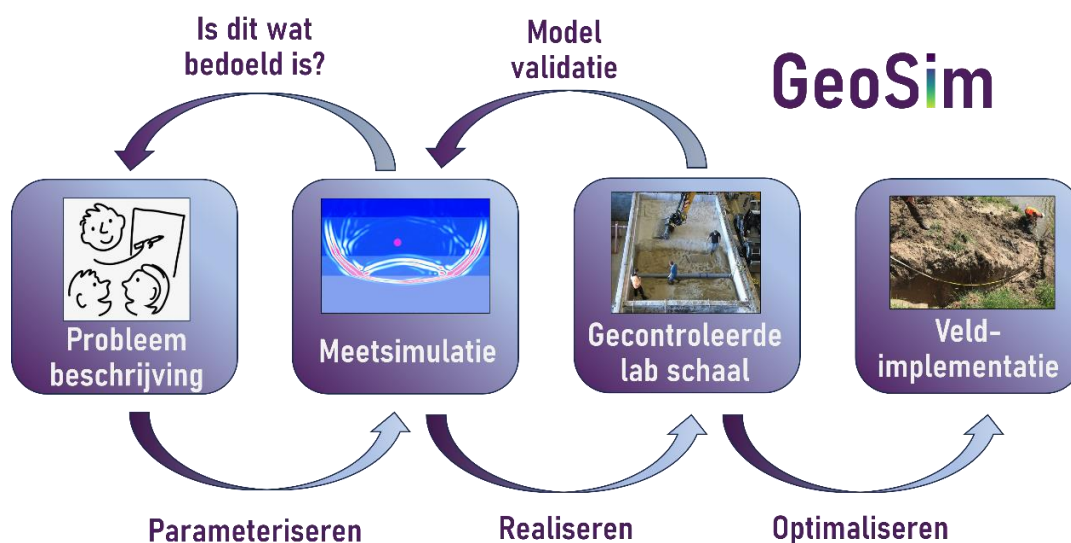
De eerste stap van de aanpak is het zo precies mogelijk beschrijven van het probleem en het vervolgens te parameteriseren. Er wordt een schematische schets van de situatie gemaakt en een inschatting van de parameters die invloed hebben op de geofysische meting. Vragen die hier beantwoord moeten worden zijn bijvoorbeeld: *Hoe diep zit een beverhol onder de grond, wat is een typische doorsnede van zo'n hol? Wat is de dichtheid van de klei waar het hol in gegraven is?*

De tweede stap is het uitvoeren van een meetsimulatie. Voorbeelden van vragen hier zijn: *Hoe zou de data eruitzien, als we de metingen zouden toepassen met de schematisatie en parameterisatie zoals beschreven in de eerste stap? Lijkt de toepassing haalbaar? Voldoet dit aan de verwachtingen? Is de resolutie voldoende?*

De daaropvolgende stappen betreffen een gecontroleerde (lab-)omgeving, waar alle parameters zoals hierboven beschreven bekend zijn. De vragen hier zijn: *Kunnen we inderdaad meten wat we hadden verwacht? Komt dit overeen met de meetsimulatie? Zijn de beste meetinstellingen gebruikt?*

De laatste stap is dan de werkelijke *veldimplementatie* waarbij de kans op succes sterk is verhoogd en ook de TRL (technical readiness level) van de meetmethode voor het specifiek onderzochte probleem bij elke bovenstaande processtap is gestegen, doordat je pas aan een volgende stap begint als de resultaten van de voorgaande stappen positief zijn

In deze studie zetten we de eerste twee stappen: de probleemstelling en de meetsimulaties. De simulatiemethodiek en resultaten worden gepresenteerd in 3.2.



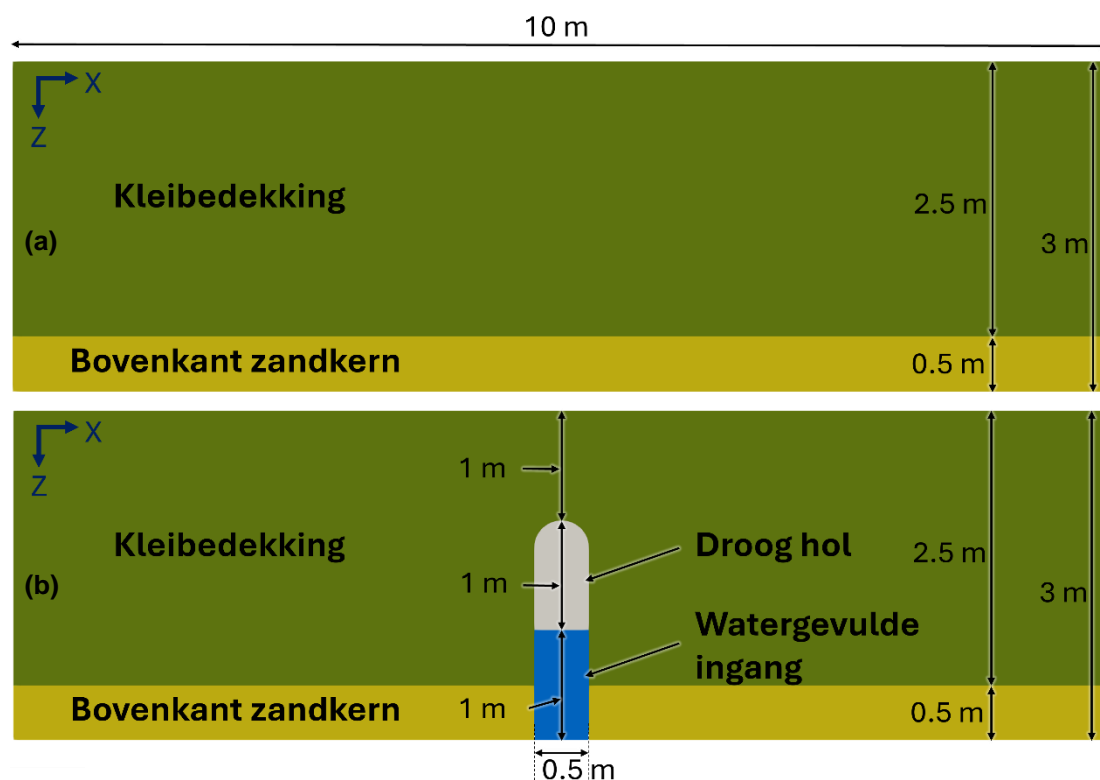
Figuur 3.1 De GeoSim aanpak brengt van vraag naar veldoplossing door de haalbaarheid te testen in meetsimulaties en optimalisatie in gecontroleerde labomgeving..

3.2 Meetsimulaties

3.2.1 Probleem beschrijving en parameterisatie

In deze stap wordt een simpele casus onderzocht voor de meetsimulatie. Dit betreft een elastisch-akoestisch golfveldsimulatie die is uitgevoerd in SPECMED 2D (Tromp et al,2008). Figuur 3.2a is de schematisatie van een 10 m lange langsdoorsnede van een dijk met een kleibedekking van 2,5 m dik boven op een zandige kern. Boven op de dijk is een glasvezelkabel aangelegd met een 'gauge length' van 0,5 m. Deze opzet wordt als basis gebruikt, waarbij de dijk nog 'intact' is. Figuur 3.2b laat dezelfde schematisatie zien, maar nu is er een hol in gegraven door een bever. De top van het hol bevindt zich 1 m onder het maaiveld en de holdoorsnede is 0,5 m. Het hol is tot 1 m boven de waterlijn gegraven en daaronder zit een watergevulde gang. Ter simplificatie is er geen freatische lijn voor het grondwater meegenomen, die er in werkelijkheid natuurlijk wel is.

Voor de parameterisatie zijn voor de verschillende media de elastisch-akoestische parameters gegeven in Tabel 3.1. Dit betreft dichtheid, drukgolfsnelheid en schuifgolfsnelheid waarbij hier typische waarden voor klei, zand, lucht en water zijn gebruikt. Vloeistoffen en gassen kunnen geen schuifspanning opbouwen en daarom hebben de lucht en het water in het hol geen schuifgolfsnelheid.



Figuur 3.2 (a) Schematisatie van een langsdoorsnede van een kleidijk met een zandige kern. (b) Hier is een 0,5 m diameter beverhol erbij gegraven met een droge kamer en een watergevulde ingang.

Tabel 3.1 Akoestische-elastische parameterisatie.

Medium	Dichtheid (ρ) [kg/m ³]	Drukgolfsnelheid (V_p) [m/s]	Schuifgolfsnelheid (V_s) [m/s]
Kleibedekking	1784	1700	500
Zandkern	1886	1600	400
Watergevulde gang	1000	1480	-
Droog hol (lucht)	1	343	-

3.2.2 Direct graafgeluid uit graafgang in een dijk

De meest voor de hand liggende methode om graverij te detecteren met DAS is door te pogen om de graafgeluiden direct te detecteren. Wanneer een bever aan het graven is, propageert het geluid hiervan door de kleilaag (en de zandkern als daarin gegraven wordt) naar de oppervlakte. De DAS kabel is zeer gevoelig voor dit soort geluiden als de sampling frequentie hoog genoeg is ingesteld.

Een precieze inschatting maken van de frequentie van graafgeluid is lastig, maar het is naar verwachting een paar kilohertz. Voor de simulatie is een frequentie van 3 kilohertz gebruikt, maar bij het variëren van 1 - 6 kilohertz werden vergelijkbare resultaten verkregen.

Navolgend figuur laat de data zien van graafgeluid aan de top van het hol (zoals in Figuur 3.2), dus 1 meter onder het oppervlakte. Figuur 3.3a geeft de ruwe DAS data en Figuur 3.3b geeft dezelfde data met interpretatie. Op de horizontale as staat de horizontale receiver positie en op de verticale as 'reistijd' van het signaal waarbij volgens conventie de as bovenaan begint.

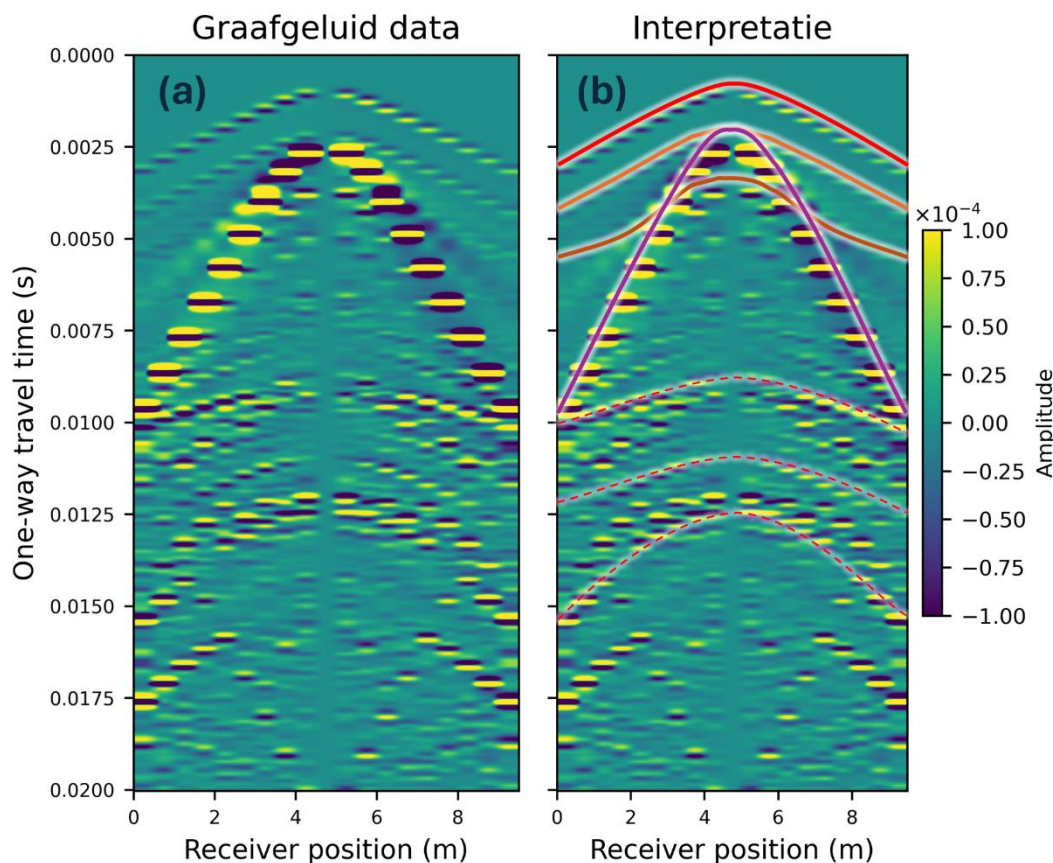
Zoals verwacht, wordt het signaal als eerst ontvangen op de positie recht boven de graafgang, dus op 5 meter. Hier zien we dan ook de drukgolf (rood) als eerste binnenkomen na 0,8 ms (0,0008 s). Voor posities verder van de gang duurt het langer voordat de drukgolf aankomt, wat een typerende parabolische vorm geeft in de grafiek. Als we het signaal verder zouden vervolgen zou deze parabool nog uitbreiden totdat het signaal uitdempt door inelastische frictieprocessen. De schuifgolf (oranje) is langzamer en komt na ongeveer 2 ms binnen. Deze laat ook een parabolisch patroon zien.

Wanneer de schuifgolf aan de oppervlakte komt, initieert deze een golf die langs de oppervlakte loopt (Rayleighgolf, paars). Deze is nog langzamer dan de druk- en de schuifgolf en laat daarom een parabool zien met steilere flanken. In de simulatie heeft de oppervlaktegolf een sterke amplitude, in werkelijkheid zal dit minder zijn door de demping van de bovenste laag (bijvoorbeeld gras).

Minder van belang voor detectie zijn de signalen die eerst naar beneden lopen en dan (1) op de zandlaag reflecteren (bruin) en (2) die door het hol op het wateroppervlak reflecteren (eerste paarse stippel) en 'multiple' (heen en weer-reflecties) van alle bovengenoemde golven (rest paarse stippels).

De aanwezigheid van graafgeluid laat dus een duidelijk patroon van een set van parabolen zien. De apex van de parabolen geeft de horizontale locatie langs de dijk weer, waar de graverij is gedetecteerd. De aankomsttijd van de schuifgolf geeft een indicatie van de diepte van de top van de graafgang, waarvan de nauwkeurigheid afhangt van hoe goed de aanname is voor de golfsnelheid.

Door bovenstaande diffractie patronen te filteren uit opgenomen data en de focus te leggen op het kilohertz domein, kan mogelijk graafgeluid geïsoleerd worden van ander omgevingsgeluid.



Figuur 3.3 DAS kabel detectie van direct bever graafgeluid uit een graafgang. (a) Ruwe data en (2) interpretatie toegevoegd. De drukgolf is het snelst en komt als eerst binnen (rood) gevolgd door de schuifgolf (oranje) en de daardoor geïnitieerde oppervlaktegolf (Rayleigh, paars). Alle golfvormen vormen een parabool waarbij de locatie van de apex de horizontale locatie van de graafgang geeft, en de aankomsttijd van de golf een indicatie voor de diepte van de top van de graafgang geeft.

3.2.3 Interferentie omgevingstrillingen en -geluid met graafgang in een dijk

Een tweede wijze waarmee graverij gedetecteerd kan worden is door te kijken hoe omgevingsgeluiden interfereren met de aanwezigheid van een graafgang. Bij omgevingsgeluid kan gedacht worden aan vibraties door verkeer, industrie of bouw. Maar bijvoorbeeld ook watergolven die op de dijk breken. Omgevingsgeluid gebruikt kan worden is dus erg afhankelijk van de locatie. Er moeten voldoende omgevingsgeluiden of -trillingen zijn en ook moeten de frequenties van dit geluid voldoende hoog zijn om de invloed van een holte in de dijk waar te nemen. De frequenties zullen in een andere orde van grootte zijn (tientallen tot honderden Hertz). Hierdoor hoeft er minder vaak gesampled te worden dan bij het direct meten van graafgeluid waardoor er een lager datavolume verwerkt hoeft te worden.

Het principe hier is om de verandering van de gemeten seismische golven (trillingen en geluid) als gevolg van een verandering in de ondergrond (de graafgang) te meten. Hiervoor simuleren we eerst een intacte dijk, en vervolgens een dijk met een graafgang erin. Door verschil in de opgenomen data te analyseren en er net als bij het direct graafgeluid een patroon in te ontdekken, kan bij continue monitoren (of per uur of dag) gedetecteerd worden wanneer er een graafgang ontstaat.

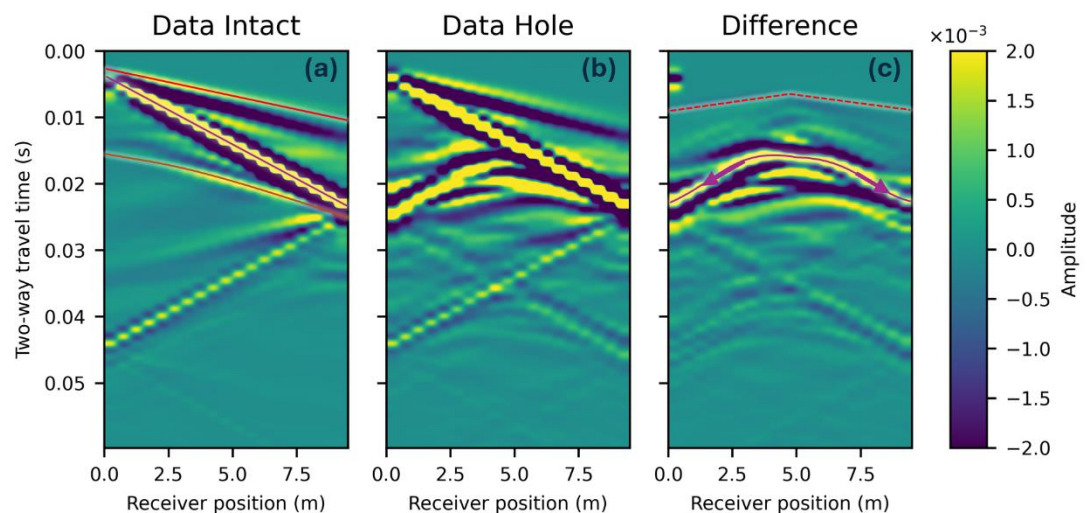
Voor de simulatie is op horizontale positie $x=0$ en aan het oppervlakte ($z=0$) een trilling geïnitieerd. Om hier een voorstelling bij te maken kan dit worden gezien als een hamerslag op een plaat. Dit geeft een trilling in de grond met een frequentie van ongeveer 300 Hz.

Figuur 3.4a geeft aan hoe het signaal dat door de intacte dijk loopt, wordt geregistreerd door de DAS-kabel. De drukgolf (rood) loopt in een rechte lijn door de dijk en wordt eerst geregistreerd aan het begin van de DAS kabel. Het signaal komt daarna met lineair toenemende reistijd met afstand binnen zoals verwacht. Hetzelfde geldt voor de oppervlaktegolf (Rayleigh, paars) maar met een lagere snelheid en dus een steilere lijn. Hieronder is nog de reflectie van de drukgolf op de zandkern zichtbaar (bruin).

Figuur 3.4b laat de data zien met de graafgang in de dijk wederom zoals in de schematisatie in Figuur 3.2b. Hierin zijn dezelfde signalen te herkennen als in de intacte dijk, maar er is duidelijk veel interferentie met het hol. Om dit verschil goed te kunnen onderscheiden is in Figuur 3.4c, het verschil tussen a en b berekend. Hier kunnen we een aantal observaties maken:

- (1) De drukgolf reflecteert tegen de bovenkant (en de zijkant) van het hol. Dit resulteert in een vergelijkbaar parabolisch patroon (rode stip) zoals ook te zien is in de graafgeluid simulatie.
- (2) De oppervlaktegolf lijkt deels gereflecteerd te worden op de zijkant van het hol (paars, pijl naar links).
- (3) De oppervlakte golf wordt wat vertraagd en komt hierdoor iets later binnen (paars, pijl naar rechts).

Door de 2D aard van deze simulaties heeft het hol een veel sterker effect dan wanneer het golfveld in 3D ook 'om' het hol heen krult, daarom is het de vraag in hoeverre deze observaties ook in velddata te maken zijn. Toch geven de simulaties wel duidelijk weer wat voor patronen te verwachten zijn.



Figuur 3.4 (a) Een seismische golf veroorzaakt door omgevingstrillingen en -geluid, loopt door de intacte dijk en (b) door een dijk met graafgang. (c) Het gemeten verschil geeft parabolische structuren. Voor de drukgolf geeft de top hiervan de horizontale locatie van de graafgang. De oppervlaktegolf ondervindt ook (complexe interferentie) door de aanwezigheid van de graafgang.

In werkelijkheid komen omgevingstrillingen en -geluid niet binnen zoals een hamerimpact zoals gebruikt voor de simulatie, maar zijn er verschillende bronnen die continu geluid of herhalend geluid produceren. Door gebruik te maken van seismische interferometrie kan dit geluid toch omgezet worden naar data die overeenkomt met data die van een impactbron komt. Hiervoor wordt binnen Deltares de open source software Noispy gebruikt (Jiang et al, 2020).

3.3 Reproduceerbaarheid en FAIR data

De meetsimulatie en resultaten zoals uitgevoerd voor deze studie zijn volledig reproduceerbaar. Hierbij is gebruik gemaakt van de FAIR-principes, deze zijn gecreëerd met de bedoeling de vindbaarheid, toegankelijkheid, interoperabiliteit en herbruikbaarheid van digitale bronnen te verbeteren. FAIR is de afkorting van de Engelse termen “Findability, Accessibility, Interoperability, en Reusability”.

Dit geldt zowel voor de (1) de simulaties van het golfveld als (2) de verwerking van de data en de productie van de figuren in Hoofdstuk 3.

1) Simulaties van het golfveld (op WSL/linux, voor geavanceerde gebruikers):

<https://github.com/Deltares-research/specfem-examples/tree/main/DiggerDAS>

Animaties van het golfveld dat uit de simulaties komt zijn direct beschikbaar via:

<https://github.com/Deltares-research/DeltaSEIS/blob/main/examples/>

- Graverij_golfveld_geenbeverhol.avi, geeft een animatie van het golfveld veroorzaakt door omgevingtrillingen of -geluid door een dijk waar geen graafgang inzit (base case).
- Graverij_golfveld_beverhol.avi: zelfde als vorige, maar nu met graafgang, zodat de interferentie ermee kan worden waargenomen.
- Graverij_golfveld_bevergeluid: geeft animatie van het golfveld veroorzaakt door het geluid van graverij *vanuit* de dijk.

2) Verwerking en productie figuren (Windows, python)

<https://github.com/Deltares-research/DeltaSEIS/tree/main/examples>

- Graverij_bevergeluid_detectie verwerkt de *graafgeluid simulatie data* en produceert Figuur 3.3.
- Graverij_beverhol_detectie.py verwerkt de *interferentie simulatie data* en produceert Figuur 3.4.

De ruwe data van alle meetsimulatie die zijn gedraaid (ook die niet gebruikt zijn voor de rapportage) en de geproduceerde data zijn opgeslagen in de cloud. Op verzoek kan hiertoe toegang worden verleend door Deltares.

<https://s3-console.deltares.nl/browser/detectie-dierlijke-graverijen>

4 Mogelijkheden voor detectie van graverijen in waterkeringen

4.1 Verschillende projecten met glasvezel in waterkeringen

4.1.1 Inleiding

In Nederland is bij een beperkt aantal dijkwerkzaamheden gebruik gemaakt van glasvezel als monitoringstechniek. De glasvezelkabel wordt hierbij in een lus aangelegd in de waterkering. Door te kijken naar verandering in de frequentie van de lichtbundel die erdoor heen wordt gestuurd, kan door middel van computerberekeningen worden bepaald waar de vervorming plaatsvindt en hoe groot deze is. Wanneer de relatieve verplaatsing sterk afwijkt, worden maatregelen in werking gesteld om de waterkering beter te monitoren. Om de glasvezelkabel beter te kunnen laten functioneren, kan deze ook in een geotextielmat worden geplaatst, zodat de kabel niet door de slappe grond kan snijden. Hierbij kunnen de vervormingen nauwkeuriger gemeten worden en levert de mat tevens enige versteviging aan de waterkering. Een nadeel is wel dat alleen een betrekkelijk dunne coating kan worden ingeweven, waardoor er altijd een betrekkelijk kwetsbare kabel moet worden toegepast (Van den Berg & Koelewijn, 2014). In de volgende subparagrafen zal een aantal projecten met glasvezel worden toegelicht waarbij de focus op de toepasbaarheid ligt. Tevens zullen de kosten worden toegelicht. In de laatste subparagraaf wordt ook de reactie van een bezorgde dijkbeheerder over glasvezel in de kering getoond.

4.1.2 Dijkversterking langs de Keen

Voor de dijkversterking van de regionale waterkering langs de Keen in Strijen in het beheersgebied van het Waterschap Hollandse Delta is glasvezel toegepast om de zettingen en stabiliteit te monitoren tijdens en na het ophoogproces. Over dit project is informatie ontvangen van Tom de Gast (Waterschap Hollandse Delta/ TUDelft)

In de voorfase zijn zettings- en stabiliteitsberekeningen uitgevoerd, waar een zeer groot ontwerp uit kwam. Op basis van ervaringen, engineering judgement en kennis van de kering is de beheerder beter gaan kijken naar de kering, en met betrouwbaarder, minder conservatieve parameters, alsmede door met monitoring het gedrag te volgen, tot een optimaler ontwerp gekomen. Om continue inzicht te hebben in het gedrag van de dijk is door het Waterschap besloten om glasvezel toe te passen.

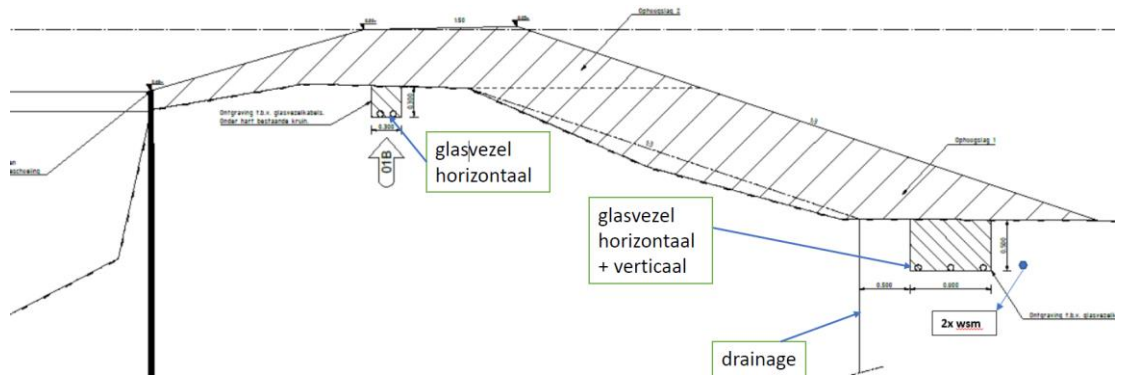
Er zijn, voorafgaand aan het aanbrengen van het materiaal voor de verbetering, horizontale glasvezelkabels op twee verschillende plekken in het dwarsprofiel van de kade aangebracht, op een vak met een lengte van circa 478 m:

- Onder het hart van de bestaande kruin op een diepte van 30 cm.
- In de teen van de bestaan de kruin op een diepte van 50 cm.

Bij de grootste ophoging zijn op vijf locaties (om de 50 m) glasvezelkabels verticaal ingebracht als inclinometer. Dit om een (beginnende) afschuiving te identificeren.

De aangebrachte glasvezelkabels meten rek en temperatuur en zijn aan één zijde verbonden met een optische interrogator. Elke 15 minuten wordt een meting uitgevoerd.

Zie navolgend figuur (Figuur 4.1) voor de ruimtelijke ligging in het versterkingsprofiel van de kade.



Figuur 4.1 Dwarsdoorsnede versterking met de locaties van de glasvezel (Bron: Waterschap Hollandse Delta).

De horizontale en verticale glasvezelkabels zijn niet los in de sleuf aangebracht, maar gekoppeld aan een geogrid en zo ingebracht. Dit is een voorwaarde voor rekmetingen (strain). Zie Figuur 4.2. De glasvezelkabels blijven liggen na het ophoogproces en worden volgens planning nog 10 jaar na het ophogen gemeten. Voor het aanbrengen van de verticale glasvezelkabels is een gat gemaakt doormiddel van een mechanische boring en vervolgens is het boorgat opgevuld met een bentonietmengsel geschikt voor zachte bodems. Voor de keuze van het mengsel is het van belang dat er geen grote sterkte- en stijfheidsverschillen met de omliggende bodem ontstaan.



Figuur 4.2 Glasvezel verbonden met geogrid (bron: Waterschap Hollandse Delta).

Het doel van de metingen was om op antwoord te geven op de volgende vragen:

Tijdens uitvoering:

- Ontstaan er alarmwaarden?
- Hoe verhouden de metingen zich tot de voorspelde waarden?
- Wanneer kan er weer opgehoogd worden?
- Houdt de aannemer zich aan de afspraak?

Na de uitvoering:

- Zettingen en verschilzettingen monitoren.
- Hoe gedraagt de dijk zich op de lange termijn?
- Tijdig signaleren: Wanneer weer versterken?

In 2012 is langs de Gele Rivier, nabij Zhengzhou, een 'smart levee' pilot uitgevoerd bij een krib door onder andere AGT, Deltares en TenCate in samenwerking met de YRCC (Yellow River Conservancy Committee) om de werking van de verschillende monitoringstechnieken in een 'smart levee' te demonstreren.

Om te monitoren wat de gevolgen voor de stabiliteit van deze krib zijn, is ter plaatse van de buitenberm een glasvezelsysteem (TenCate GeoDetect S-BR) aangebracht om de optredende rekken van een hoogwatergolf te meten. Hierbij is gebruik gemaakt van textielmatten waarin glasvezelkabels zijn aangebracht. Zie Figuur 4.4. In Figuur 4.5 is het uitrollen van de textielmatten en de plaatsing van deze matten te zien.



Figuur 4.4 Glasvezelkabels opgenomen in een textielmat (bron: Ten Cate).



Figuur 4.5 Uitrollen van de textielrol waarin de glasvezels zijn aangebracht. (Bron: Deltares).

In deze situatie zijn de matten afgedekt met een steenlaag om de sterke stroming te kunnen weerstaan.

Conclusie

Uit de pilot zijn goed bruikbare resultaten gekomen van de meetdata en is geen kabelbreuk ontstaan. De matten met daarin de geweven glasvezelkabels konden makkelijk worden uitgerold. Het afdekken middels stenen was arbeidsintensief, maar is niet de manier zoals men deze in Nederland zou toepassen.

4.1.5 Kosten

De kosten voor de uitleesunits van de glasvezelkabels, de zogenaamde interrogator, zijn nog steeds vrij hoog.

De kosten van een enkele interrogator bevinden zich grofweg tussen de 100.000 en 150.000 euro en hiermee kan 3 tot 50 km worden bemeten. De mogelijke nauwkeurigheid en de resolutie lopen daarbij sterk uiteen. De minimumeisen volgen uiteindelijk uit de monitoringsbehoefte, die zal per situatie vastgesteld moeten worden. Dat geldt eveneens voor het type kabel dat toegepast wordt. De prijs daarvan kan variëren van 3 tot 15 euro afhankelijk van de soort metingen. Voor de metingen van een dierlijke graverij kan worden volstaan met een kabel met een tweetal glasvezels met een robuustere beschermende mantel.

4.1.6 Overige

Een aantal Waterschappen is aangeschreven om hun ervaring met glasvezelkabels in hun beheergebied te beschrijven. De meeste Waterschappen hebben hier (nog) geen ervaring mee. Van een dijkbeheerder (Theo Reuzenaar) van Waterschap HHNK ontvingen wij onderstaande reactie.

Mijn stelling is alsjeblieft: "Geen kabels en leidingen en ook geen glasvezel in onze dijken!!!"

Mijn ervaring met het aanbrengen van glasvezel of andere kabels en leidingen is dat er veel schade aan de dijk kan ontstaan en dat je er in de toekomst veel last van hebt als je werkzaamheden aan de dijk hebt. Het ligt veelal in de weg en het veroorzaakt ook onregelmatigheden in de opbouw van de dijk of zelfs holle ruimte, lekkage van de dijk, enz. De freatische lijn wordt erdoor aangetast. Het zijn ook plekken waar water (regen, lekwater) ophoopt en problemen veroorzaakt.

Soms gaat er ook water langs de kabel stromen. Water zoekt een weg langs iets (net als wortels) waardoor de dijk schade oploopt.

Door het aanbrengen (zowel via boren of graven) wordt schade toegebracht aan de dijk, zowel op de korte als lange termijn. Soms geeft het zelfs afschuivingen of scheurvorming.

Ook na hevige neerslag.

We hebben onderbermafchuivingen van een meter gehad door aanleg van kabels en leidingen.

Ook bij eventueel herstel wordt de dijk te pas en te onpas open gegraven om bijvoorbeeld een beschadigde kabel te herstellen.

Mijn stelling is altijd laat de dijk met rust en geen kabels en leidingen in de dijk.

We kunnen een dijk vol stoppen met sensoren en kabels hiervoor, maar waarschijnlijk zullen ze meer problemen dan zgn. veiligheid geven.

Samenvattend geldt dat dijkbeheerders zelf het risico willen kunnen bepalen bij de volgende facetten: namelijk schade bij aanleg, freatische lijn beïnvloeding, langsstromend kwelwater, scheurvorming en afschuivingen na aanbrengen, onderhoudsgraafwerk van kabelbeheerder.

4.2 Glasvezeltechniek met Distributed Acoustics Sensing (DAS)

Zoals uit bovenstaande projecten blijkt, is er al een aantal proeven uitgevoerd om de vervorming (DSS) en temperatuur (DTS) in dijken te meten. Hoewel dierlijke graverij ook vervorming kan geven, zeker bij het bezwijken ervan, wordt deze vervorming alleen gemeten op de plek(-ken) waar de kabel daadwerkelijk ligt. Voor DAS acoustic sensing is dat anders. Zoals uit de simulaties uit het vorige hoofdstuk blijkt, kunnen in principe graafgeluiden en misschien ook interferenties van opgevangen omgevingstrillingen met een graafgang gemeten worden door een enkele kabel, ondiep begraven in de top van de dijk.

Voor het meten van vervorming in de dijk zoals langs de Keen in Strijen is het van belang dat de gemeten beweging van de kabel een maat is van de vervorming van de dijk zelf. Als de kabel bijvoorbeeld te los ligt of juist in een te stijve omhuizing zit, dan zijn de metingen van minder waarde of helemaal niet nuttig.

Voor DAS ligt dit anders omdat er wordt gekeken naar kortstondige trillingen. Desondanks is het nog steeds van belang dat de glasvezel wel een goede 'koppeling' heeft met de grond, zodat geluid en trillingen er wel goed aan worden doorgegeven. De beste manier van het ingraven van een DAS kabel voor de specifieke toepassing van de detectie van graverij, met de ervaringen van de waterschappen zoals hierboven in §4.1.6 omschreven in ogenschouw genomen, moet goed worden onderzocht.

Voor het ontwikkelen van een verwerkingsmethode om van data naar detectie te gaan, wordt als vervolg van het huidige project in samenwerking met ProRail een DAS-dataset onderzocht die is opgenomen in een baanlichaam onder het spoor waar dierlijke graverij waarschijnlijk plaatsvond tijdens deze metingen. De bevindingen hieruit moeten vervolgens worden vertaald naar de situatie in dijken.

Zeker bij het meten van hoger frequente trillingen (kilohertz) en over lange afstanden (kilometers), loopt het datavolume van DAS metingen snel op. Er zijn verschillende manieren om hier mee op te gaan. Er kan bijvoorbeeld worden gekozen worden om vooral, of alleen, op bepaalde (kritieke) tijdsintervallen te meten, bijvoorbeeld bij hoog water. Ook kan worden gekeken naar real-time verwerken met 'edge computing'. Hierbij wordt de data gelijk, op de plek waar gemeten wordt, verwerkt en wordt de relevante informatie eruit gehaald. De ruwe data hoeft vervolgens niet bewaard te worden. In (Truong et al. 2024) wordt edge computing voor DAS-data omschreven voor verkeersdetectie. Een andere toepassing, maar de opzet en infrastructuur zullen vergelijkbaar kunnen zijn.

Indien gewenst, kan alle ruwe data toch bewaard worden door deze direct vanuit het veld te uploaden naar de cloud (bijvoorbeeld in Azure of AWS 'buckets'). Zelfs als bovenstaande edge computing kan worden toegepast voor de graverij kan de ruwe data in de toekomst wellicht voor andere doeleinden worden gebruikt.

De informatie die eruit gehaald kan worden zou dan bijvoorbeeld een alarm kunnen zijn, dat er op een bepaalde positie langs de kabel een anomalie is gedetecteerd in de dijk.

5 Conclusies en aandachtspunten

5.1 Conclusies

Dierlijke graverijen in het talud van een waterkering of (spoor-)weg kunnen zorgen voor een afname van de stabiliteit van deze constructies en dienen daarom voorkomen te worden. Aangezien de aanwezigheid van bevers in een talud vermeden dient te worden, zullen deze in een vroegtijdig stadium van graven moeten worden ontdekt, zodat er maatregelen genomen kunnen worden. Een mogelijke oplossingsrichting voor vroege detectie is met behulp van de Distributed Acoustic Sensing-methode (DAS) met glasvezel.

Aan de hand van de GeoSim aanpak zijn simulaties uitgevoerd die dienen als een 'proof of concept' voor de mogelijkheid om een beverhol te detecteren met DAS. De eerste bevindingen hieruit zijn positief, omdat die techniek interferentie laat zien bij holen voor en na graverij (afgezien van aanwezigheid) en daarnaast ook toepasbaar kan zijn bij het opvangen van graaftrillingen (tijdens graafwerk).

ProRail heeft langs het spoor al glasvezelkabels liggen voor meerdere doeleinden en zou daarmee een kabel kunnen gebruiken voor detectie. Eind 2024 begin 2025 wordt hiermee een proef uitgevoerd.

Een aantal waterschappen heeft al ervaring met het gebruik van glasvezelkabels in de waterkering voor monitoringsdoeleinden, met positief gevolg voor wat betreft de uitvoerbaarheid (plaatsing) en gebruik (monitoringsperiode). Echter, er wordt vanuit dijkbeheer ook aandacht gevraagd voor de mogelijke risico's van kabels in de waterkering.

Voor het meten van geluid uit beverholen (of trillingen die ermee interfereren), is een heel grid van kabels niet noodzakelijk. Een enkele kabel kan volstaan om de geluiden op te vangen. Er moet wel een goede aansluiting van de kabel op de grond zijn, zodat de geluiden wel aan de kabel worden doorgeven.

Bij het meten met DAS kunnen grote datavolumes ontstaan. Hiervoor is het van belang om te onderzoeken of real-time monitoring met 'edge computing' een optie is (Truong et al. 2024).

5.2 Aandachtspunten

De belangrijkste aanbevelingen zijn:

- Indien er nog geen glasvezelkabels liggen in de waterkering: hoe worden deze aangebracht en hoe wordt de koppeling met de ondergrond gemaakt.
- Houd rekening met toekomstbestendigheid van het aan te brengen systeem. Denk hierbij onder meer aan veel data waarvoor edge computing benodigd kan zijn, maar ook technologieën zoals shape sensing waar de daadwerkelijk de vorm van de kabel in 3D en daarmee de absolute vervorming van een dijk in kaart kan worden gebracht.
- De kosten voor een uitleesunit zijn nog vrij prijzig en zijn in de orde van 100.000 - 150.000 euro. Dit kan voor de monitoring van dierlijke graverij een obstakel vormen. Het is zinnig om onderzoek uit te voeren naar de mogelijkheden van een goedkopere dedicated use uitleesunit (interrogator).
- Bij het genoemde onderzoek volgend jaar naar de resultaten van de case bij ProRail, zal ook onderzocht moeten worden welke facetten van DAS nog onderzocht dienen te worden, welke graaf-geluids-analyses nodig zijn en welke stappen genomen dienen te worden om tot een hogere TRL te komen.

Referenties

- Di Palma et al (2024), Di Palma, P., Collin, A., De Caro, F. et al. The Role of Fiber Optic Sensors for Enhancing Power System Situational Awareness: A Review. *Smart Grids and Energy* 9, 2 2024. <https://doi.org/10.1007/s40866-023-00183-0>.
- Fenta et al (2021), Fenta, Mulugeta & Szanyi, János. . *Fibre Optic Methods of Prospecting: A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics*. *Surveys in Geophysics*. 10.1007/s10712-021-09634-8.
- 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>.
- Koelewijn et al, (2017) Koelewijn, A.R., Van den Berg F.P.W. & Saathof, L.E.B. Toepassingsmogelijkheden voor continue glasvezelmonitoring bij dijken, Betere detectiemogelijkheden van begin van lokaal falen in Geotechniek augustus 2017.
- Nap, Ana, (2020), On the fidelity of Distributed Acoustic Sensing (Master thesis), ETH Zürich, Switzerland.
- 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.
- Tromp et al, (2008), Tromp, Jeroen, Dimitri Komatitsch, and Qinya Liu.. “Spectral-Element and Adjoint Methods in Seismology.” *Communications in Computational Physics* 3 (1): 1–32.
- Truong et al, (2024). Truong, Khanh & Eidsvik, Jo & Rørstadbotnen, Robin.. *Edge Computing in Distributed Acoustic Sensing: An Application in Traffic Monitoring*. 10.48550/arXiv.2410.16278.
- Van den Berg & Koelewijn, (2014), Van den Berg, F.P.W. & Koelewijn, A.R , IV-keten, Veiligheid als basis, Monitoringsfilosofie en proeftuinen, Deltares rapport met kenmerk 1207933-000-VEB-0001 d.d. Januari 2024 https://publications.deltares.nl/1207933_000.pdf.
- Van den Berg et al (2012). Van den Berg, F., Heaton, J., & Moen, W., Real time Monitoring of Levees through Sensor Technology along the Yellow River, 5th International Yellow River Forum, Zhengzhou, China, 24-28 september 2012, p235-238.

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