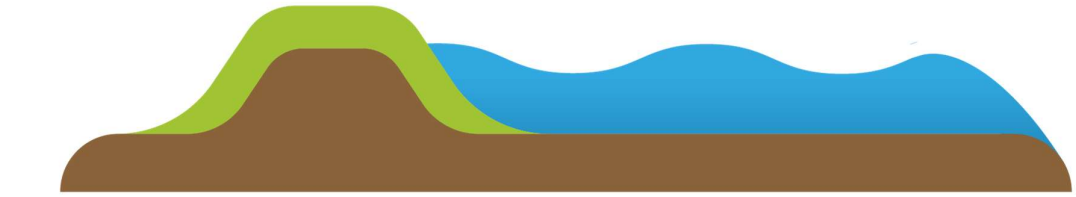
Detectie graverij in waterkeringen met glasvezel

Plan van aanpak





WaterInfra

CONSULTANCY

Works

Detectie graverij in waterkeringen met glasvezel

Plan van Aanpak

Opdrachtgever:

Waterschap Vallei en Veluwe,
Rijkswaterstaat

Opdrachtreferentie:

Inkooporder WSVV: opdrachtnummer EXPL072142
Inkooporder RWS: opdrachtnummer 4300115894
Inkooporder RWS: opdrachtnummer 4300118278

Opdrachtnemer:

Met medewerking van:

Rapportkenmerk: W-2501-R01

Status:

Versie	Datum	Auteur	Opm.
0.1	18 december 2025	F. den Heijer, W.S. Zomer (BZIM)	Onvolledig concept
0.2	21 januari 2026	F. den Heijer, W.S. Zomer (BZIM)	Concept
1.0			

Foto kaft:
Bron: © Rijkstwaterstaat | Ruben Smit



Samenvatting

De veiligheid van de Nederlandse dijken loopt risico door de exponentieel groeiende beverpopulatie. Traditionele inspecties van ondergrondse graverij zijn kostbaar en inefficiënt. Vroege detectie is cruciaal om overstromingsrisico's en herstelkosten te beperken. Voorliggend plan betreft de inzet van glasvezeltechnieken om graafactiviteiten via trillingen real-time te signaleren (Distributed Acoustic Sensing, DAS). Het doel is een gezamenlijk systeem te ontwikkelen dat beheerders tijdig informeert, zodat tijdig actie kan worden ondernomen en de Nederlandse waterveiligheid effectief geborgd blijft.

De technologie is klaar voor grootschalige praktijktoepassing. ProRail boekt reeds succesvolle resultaten met het detecteren van graverij via de DAS-techniek langs het spoor. Gecombineerd met de bewezen effectiviteit in praktijk-projecten, biedt glasvezel nu de mogelijkheid voor een betrouwbaar, real-time systeem om de Nederlandse waterveiligheid effectief te borgen tegen onopgemerkte bevergraverij.

De configuratie bestaat uit glasvezelkabels in de dijk, verbonden met een interrogator (uitleesunit). Deze hardware is gekoppeld aan computersystemen voor dataopslag en (real time, on site) dataverwerking en ontsluiting via een internetdashboard. Het ontwerp omvat meerdere kabels in het talud om trillingen real-time te monitoren.

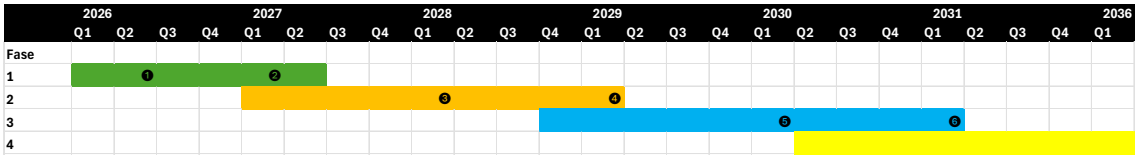
Succesvolle glasvezelmonitoring vereist een helder monitoringsdoel, en overeenstemming tussen de projectpartners daarover, en focus op de Total Cost of Ownership. Cruciaal zijn data-eigendom door de beheerder, een open architectuur tegen *vendor lock-in* en integratie in de gehele levenscyclus van de dijk. Technisch zijn een multisensor-aanpak, nauwkeurige positionering, goede mechanische grondkoppeling en een grondige nulmeting essentieel. Operationeel zijn betrouwbare energievoorziening en geautomatiseerde data-analyse noodzakelijk om grote datastromen te beheersen.

De projectfasering en organisatie van het monitoringsproject zijn ontworpen om innovatieve technieken stapsgewijs te integreren in het reguliere dijkbeheer, met een nadruk op publieke regie. Er dient een duidelijke scheiding te worden aangebracht tussen de fysieke infrastructuur en de datadiensten. De overheid financiert en beheert de hardware (kabels en interrogators) als publieke asset om data-eigendom te borgen en *vendor lock-in* te voorkomen. De markt wordt uitgedaagd tot innovatieve datadiensten via een funnel-aanpak, waarbij in de beginfase een Publiek-Private Samenwerking (PPS) risico's deelt. Er wordt een open data-architectuur met een standaard koppelvlak gebruikt, zodat diverse partijen hun algoritmen kunnen aansluiten op het centrale netwerk. Het programmamanagement ligt bij de overheid om sectorbrede samenwerking tussen waterschappen en RWS te waarborgen. Het project volgt een tijdspad van circa 10 jaar tot de volledige uitrol en is onderverdeeld in vier hoofdfasen (zie Tabel 1):

1. Fase 1: Ontwikkeling hardware en datadiensten: Verkenning van concepten en het invullen van kennisleemten over kabelinstallatie en signaalanalyse.
2. Fase 2: Proof of Concept (PoC): Het in de praktijk testen van de gekozen configuratie en algoritmen op een testlocatie (zoals Paddepol in 2027-2028).

3. Fase 3: Voorbereiding uitrol: Focus op configuratie, logistiek en vergunningverlening voor grotere dijktrajecten.
4. Fase 4: Uitrol: De daadwerkelijke installatie, het inregelen en het structurele gebruik in het beheerproces.

Tabel 1 Planning op hoofdlijnen



Gedurende dit proces zijn zes go-no-go momenten ingebouwd om de haalbaarheid en de voortgang te bewaken. Binnen de fasen worden drie onderdelen onderscheiden:

- Onderdeel A (Samenwerking en organisatie): De overheid voert de regie en het programmamanagement. Dit omvat draagvlakcreatie, financiering en vergunningen.
- Onderdeel B (Infrastructuur/Hardware): De fysieke assets (kabels en interrogators) worden behandeld als publieke assets. De overheid financiert en beheert deze ("Overheid Betaalt") om data-eigendom te borgen en *vendor lock-in* te voorkomen.
- Onderdeel C (Datadiensten): De ontwikkeling van algoritmen voor graverij-identificatie wordt aan de markt overgelaten. In de risicovolle beginfasen gebeurt dit via een Publiek-Private Samenwerking (PPS); bij de uiteindelijke uitrol kan de overheid diensten inkopen via een Data as a Service (DaaS) model.

De benodigde middelen voor het project zijn de personele capaciteit, de hardware (glasvezelkabels en interrogators), de software en testlocaties, en budget. Voor de monitoring van naar schatting 1000-2.000 km bevergevoelige primaire waterkerigen wordt een budget van €40 tot €50 miljoen geraamd. De kosten omvatten kabels (€1-€10/m) en interrogators (€100k-200k per stuk). De financiële fasering start met €4 miljoen voor de eerste drie fasen: ontwikkeling (1 M€), Proof of Concept (2 M€) en voorbereiding van de uitrol (1 M€). De grootschalige landelijke uitrol in fase 4 kost naar schatting orde €40 miljoen. Essentieel is een integrale benadering van aanleg en beheerkosten in het veld en de kosten en opbrengsten van de informatie uit de data-analyse (Total Cost of Ownership).

Er moet balans zijn tussen de projectrisico's en maatschappelijke baten. Risico's omvatten technische schade aan de dijk door de aanleg, kwetsbaarheid voor mechanische beschadigingen en hoge investeringskosten voor hardware. Ook vormen de enorme datavolumes en de afhankelijkheid van een constante stroomvoorziening organisatorische en technische uitdagingen. De baten richten zich op het voorkomen van directe schade, en het borgen van waterveiligheid. Jaarlijkse schadekosten bedragen gemiddeld meer dan €500 per bever. Het aantal bevers neemt exponentieel toe, maar zelfs met een voorzichtige inschatting daarvan en een maximum aan het aantal bevers is

de contante waarde van de totale schade voor de komende 30 jaar al meer dan €130 miljoen. Als glasvezelmonitoring dat bedrag kan halveren dan zijn de projectkosten al in evenwicht met de voorkomen directe schade. De verwachting is echter dat de vermeden directe schade al veel groter is. Alle verdere baten door de reductie van het overstromingsrisico door vroege detectie van holen zijn extra baten die de balans voor het uitvoeren van voorliggend plan van aanpak gunstiger maken.

Inhoudsopgave

Samenvatting 5

1 Inleiding 11
1.1 Aanleiding: de bever en onze waterveiligheid 11
1.2 Probleembeschrijving 14
1.3 Doel 15
1.4 De fasering van het project op hoofdlijnen 15
1.5 Leeswijzer 15
2 Monitoren met behulp van glasvezeltechnieken 17
2.1 De ontwikkelingen in vogelvlucht 17
2.2 Typen metingen met glasvezelkabel 18
2.3 toepassing van glasvezelkabel in dijken 19
2.3.1 Toepassingen in experimentele en praktijk opzet 19
2.3.2 Leerpunten samengevat 21
2.4 De stand van zaken samengevat 23
3 Indicatieve configuratie 25
4 Randvoorwaarden en uitgangspunten 29
4.1 Strategische en organisatorische randvoorwaarden en uitgangspunten 30
4.2 Technische randvoorwaarden en uitgangspunten 31
4.3 operationele randvoorwaarden en uitgangspunten 32
5 Organisatie en Samenwerkingsvormen 35
5.1 Drie organisatievormen voor markt en overheid 35
5.2 Voor- en nadelen voor infrastructuur en datadiensten 35
5.3 Onderscheid tussen de infrastructuur en de datadiensten 37
5.4 Overige belangrijke aspecten voor een succesvolle organisatie vanuit de overheid . 38
5.5 Voorwaarden voor het uitdagen van de markt 39
6 Uitwerking fasering, organisatie en planning 41
6.1 Samenvatting specifieke uitgangspunten voor de planning 41
6.2 Fasering en projectonderdelen 41
6.2.1 Fase 1: Ontwikkeling hardware en op gang brengen datadiensten 44
6.2.2 Proof of Concept hardware en datadiensten 47
6.2.3 Voorbereiding uitrol: configuratie, logistiek en vergunning 49

6.2.4 Uitrol: installatie, inregelen, gebruik en verdere ontwikkeling datadiensten 50
6.3 Planning 51
7 Middelen 53
7.1 Globale project begroting 53
7.2 Globale begroting voor de Fasen 1, 2 en 3 54
7.3 Globale begroting, uitgesplitst per jaar 54
8 Risico's en baten 55
8.1 Risico's projectuitvoering 55
8.2 Baten projectuitvoering 56
8.2.1 Schade aan de dijk 56
8.2.2 Voorkomen van schade en slachtoffers bij dijkdoorbraken 57
8.2.3 Samenvatting baten 58

Literatuurlijst 59

Bijlagen 61
Bijlage 1 Samenvatting van wetenschappelijke literatuur 62
Bijlage 2: Toepassingen 72
Bijlage 3: Interview CONEXYS 77
Bijlage 4: Interview ProRail 83
Bijlage 5: Interview Deltares 85
Bijlage 6: Interview TU Delft 92
Bijlage 7: Verslag bijeenkomst waterkeringbeheerders 95
Bijlage 8 Kosten schade door bevers 103

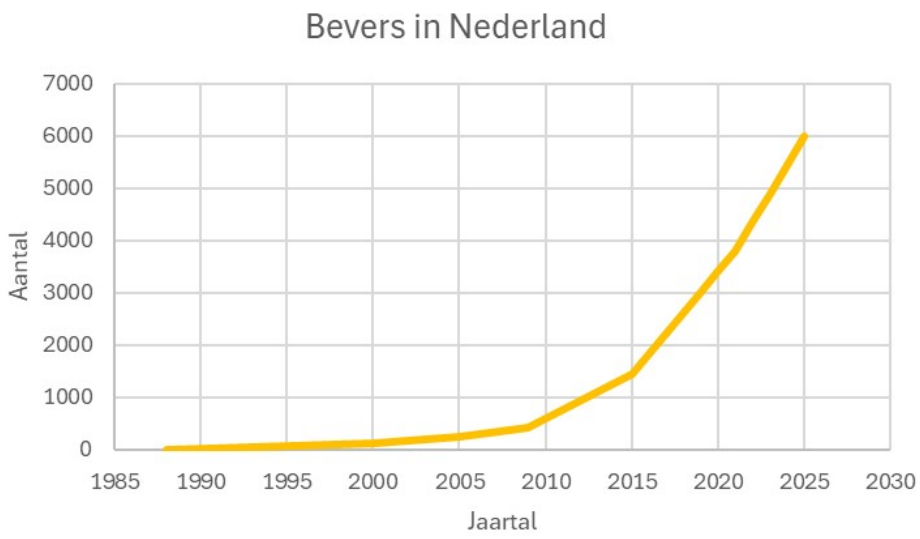
1 Inleiding

1.1 Aanleiding: de bever en onze waterveiligheid

Dijken beschermen een groot deel van Nederland tegen overstromen. Alle civiele infrastructuur veroudert, zowel absoluut ten opzichte van het ontwerp, als relatief door klimaatverandering. Dijken verouderen dus ook. Dat gebeurt niet altijd geleidelijk, zoals door zetting en zakking, maar ook relatief plotseling door bijvoorbeeld dierlijke graverij. Dijken moeten daarom worden onderhouden om voldoende veiligheid te blijven bieden. De dijkbeheerder (veelal de Waterschappen, maar ook Rijkswaterstaat) zijn verantwoordelijk voor het onderhoud van de dijken in hun beheer.

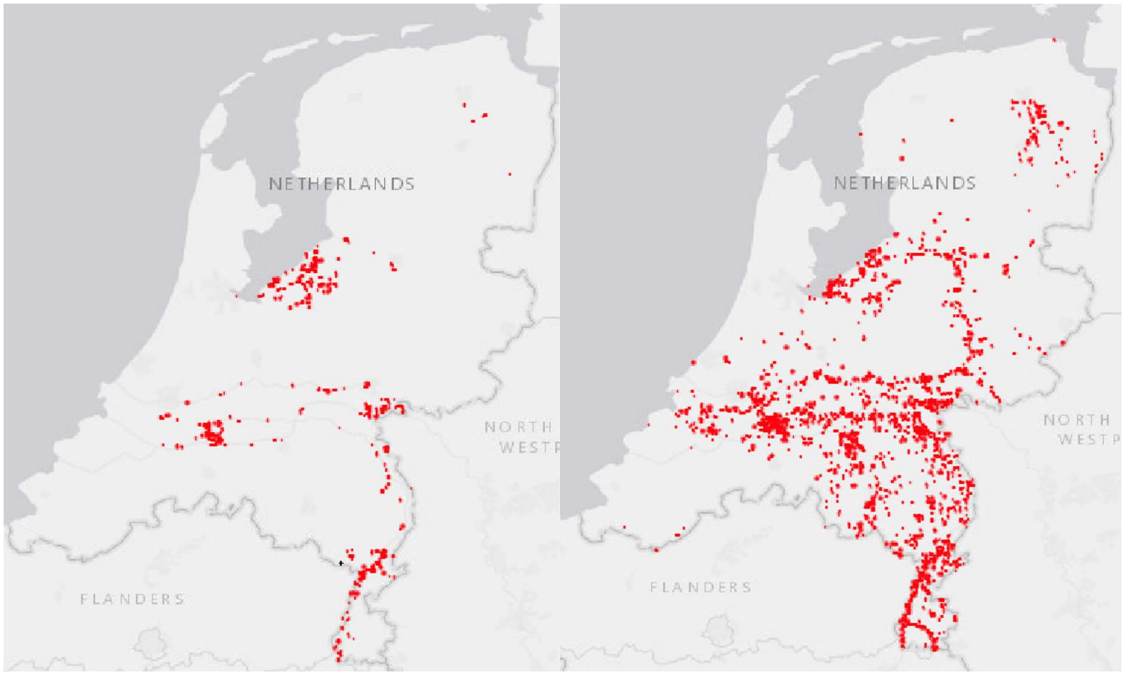
De bever, een van de dieren die leven in waterrijke gebieden en graven in en om dijken, is in 1988 geherintroduceerd in Nederland. De bever is een beschermde inheemse diersoort als bedoeld in artikel 3.5 van de Wet natuurbescherming, op basis van het feit dat de soort is opgenomen in bijlage IV van de Habitatrichtlijn. Daarom is het is verboden om deze dieren opzettelijk te verstoren. Het aantal bevers neemt sinds 1988 snel toe, en daarmee de zorg van de beheerder.

“Vanaf 1988 tot 2014 zijn 163 bevers op verschillende locaties in ons land uitgezet. Deze bevers komen uit het Elbegebied of zijn nakomelingen van bevers afkomstig uit het Elbegebied. Verder zijn vanaf 1991 enkele tientallen bevers van Oost-Europese en gemengde West-Europese herkomst via de Roer en de Maas Limburg binnengekomen. In 2008 is men in Drenthe en Groningen begonnen met een herintroductieproject. In Nederland zijn er nu vijf populaties, te weten in de Biesbosch, de Gelderse Poort, Flevoland, Limburg en Drenthe/Groningen. Ook zijn er bevervestigingen in het rivierengebied tussen Limburg en Biesbosch, Biesbosch en Gelderse Poort, en tussen Gelderse Poort en Flevoland. Het is waarschijnlijk dat er tussen de genoemde populaties al uitwisseling heeft plaatsgevonden. Daarmee begint de gewenste metapopulatie vorm te krijgen. Alleen de populatie in Drenthe/Groningen is nog geïsoleerd. Het is echter slechts een kwestie van tijd voordat aansluiting met de bevers vanuit Flevoland en met bevers uit Duitsland (Ems) een feit is” (CLO, 2025). “De Nederlandse beverpopulatie wordt geschat op ongeveer 5.000 tot 6.000 individuen, verspreid over vijf hoofdpopulaties” (IPLO, 2025). De groei van het aantal bevers verloopt exponentieel, zie Figuur 1.



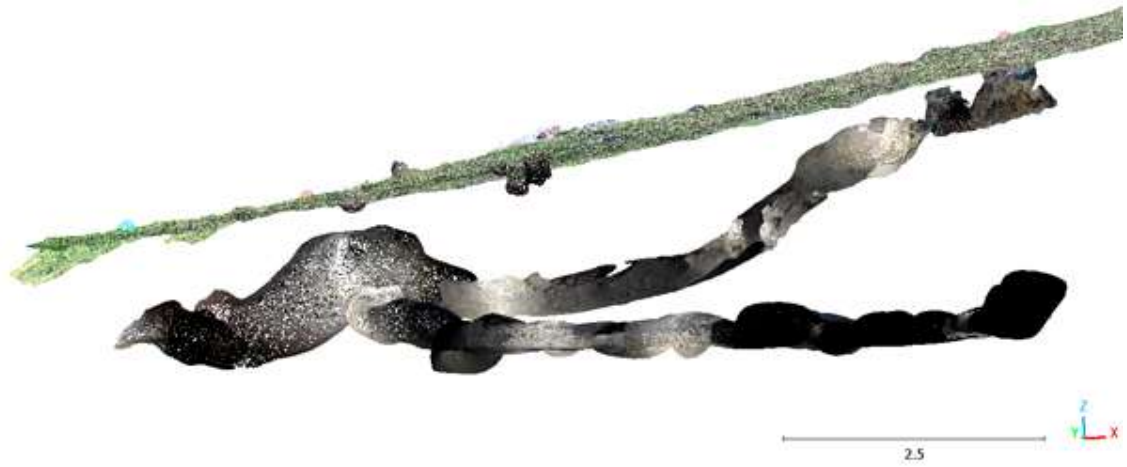
Figuur 1 Verloop van het aantal bevers in Nederland

En in Figuur 2 is de toename van het aantal waarnemingen te zien in 2010 en 2025. Daarin is ook duidelijk te zien dat de bever zich ondertussen in vrijwel het gehele watersysteem heeft verspreid.



Figuur 2 Beverwaarnemingen in 2010 (links) en 2025 (rechts). (bron: waarnemingen.nl)

De herintroductie van de bever, vanuit ecologisch oogpunt gewenst en een beschermde diersoort, vereist continue aandacht van de dijkbeheerder, omdat het dier graaft in dijken. De omvang van de graverij door bevers kan groot zijn: ze graven gangen met een diameter in de orde van 0.5 m en kamers die groot genoeg zijn voor een beverfamilie, tot wel menshoogte toe. Zie ook Figuur 3.



Figuur 3 Lidar-scan van een bever hol (bron:)

De inspectie en mitigatie van graafschade eisen veel van de beheerder, zowel voor wat betreft de capaciteit als de kosten. De ondergrondse en onderwater gelegen ingangen naar de holen zijn lastig op te sporen. Daarnaast is dit een arbeidsintensief proces. Een schatting is dat alleen al de inspectie voor alle watergangen in Nederland jaarlijkse meerdere miljoenen kost. En dan nog is het aannemelijk dat niet alle holen worden ontdekt en de schade hersteld. De schadekosten per herstelactie zijn groot. De totale omvang ervan groeit door de toenemende beverpopulatie. Preventieve maatregelen, zoals het aanbrengen van een gaas in het talud van de dijk, worden meer en meer ingezet, meestal alleen in het lagere deel van het talud, waar met regelmaat water tegenaan staat.

Bij hoogwater is graverij extra risicovol. Ook bevers die zich niet in de dijk hebben gevestigd, zullen bij hoogwater een plek zoeken, en aangezien dan alle andere logische posities onder water staan, is de dijk een laatst overgebleven vestigingsplaats. Graverij kan de stabiliteit van de dijk substantieel verminderen (van Hemert, 2006), en het risico op schade aan de dijk of zelfs overstromen neemt dan substantieel toe.

Het is daarom essentieel om graverij in dijken vroegtijdig te detecteren, zodat tijdig actie kan worden ondernomen. Hoe eerder de graverij wordt ontdekt, hoe minder de schade en hoe minder de kosten voor reparatie. De natuurwetgeving kent werkprotocollen, waarin verstoring van beveractiviteit bij vroegtijdige signalering wel toegestaan is. “Voor recente dassen- en beveractiviteit in waterkeringen waardoor in de nabije toekomst onveilige situaties ontstaan, is het mogelijk het gebruik van deze pijpen en/of holen te ontmoedigen en de locaties te ontmantelen” (UvW, 2025). De hypothese is dat gaande graverij (dus tijdens de graafactiviteit) kan worden gedetecteerd met behulp van een systeem van glasvezelkabels, en de daaraan verbonden apparatuur en software. In het vervolg van dit plan zullen we dit systeem aanduiden met ‘FOG’, de afkorting van Fiber Optics voor Graverij.

Rijkswaterstaat en Waterschap Vallei en Veluwe (WSVV) voelen de behoefte aan een dergelijk systeem, en willen ook andere waterkeringbeheerders enthousiasmeren om deel te nemen in het project om FOG te implementeren, we zullen het project in het vervolg benoemen als <NAAM>. Het gaat dan om de ontwikkeling, het testen en de uitrol. Dat is de aanleiding voor het opstellen van voorliggend plan van aanpak voor <NAAM>.

1.2 Probleembeschrijving

De ontwikkelingen op het gebied van Structural Health Monitoring (SHM) met glasvezelsensoren (Fiber Optic Sensors, FOS) zijn begonnen uit de noodzaak om strategische civiele infrastructuren te beheren, zoals bruggen, dammen en waterkeringen. Het ging daarbij om beweging, temperatuur of druk. Voor het detecteren van dierlijke graverij wordt vooral gedacht aan het detecteren via een trilling signaal of een geluidssignaal. Dat is een nieuwe toepassing voor waterkeringen.

Het meten van verschijnselen in dijken met glasvezel is überhaupt nog niet eerder op grote schaal in de Nederlandse waterkeringen toegepast, maar het is in het geheel nog niet toegepast om trillingen te detecteren. ProRail past het hier al wel voor toe in spoordijken. Het is niet zeker of het ook kan worden ingezet voor graverij in waterkeringen:

- Kun je uit een signaal herkennen of het wordt veroorzaakt door graverij?
- Is het praktisch toepasbaar: welke ruimtelijke resolutie van de kabels is nodig om voldoende gericht de locatie van de graverij te kunnen vaststellen? Is de datahoeveelheid te beheersen?
- Is het uitvoerbaar: kan het systeem worden geïnstalleerd/aangebracht? Hoe onderhouds-gevoelig is het systeem? Degraderen de kabels door de omgevingscondities?
- Is het betaalbaar: wegen de kosten van het systeem op tegen de baten?

Naast de technische haalbaarheid zijn er ook nog organisatorische vraagstukken. WSVV en RWS zijn niet de enige belanghebbenden bij FOG. Bevers verspreiden zich snel in Nederland en veel waterkeringbeheerders kunnen er belang bij hebben, om de risico's van graverij te beheersen. Alleen al voor de primaire waterkeringen gaat het om een grote lengte, en dus een forse omvang. Waterkeringsbeheerders zijn echter om goede redenen terughoudend met het accepteren van dijk-vreemde elementen in de dijk. Een glasvezelkabel is dat ook. Elke infrabeheerder is weliswaar op zoek naar nuttige innovaties, maar tegelijk terughoudend om op elk idee in te gaan, omdat ook veel ideeën stranden. Waterkeringbeheerders wegen de kosten en de verwachte baten goed af. In de onderhavige situatie zijn beide onzeker.

Wel is vrij zeker dat het gaat om een grote investering. Belangrijke randvoorwaarde van RWS en WSVV voor het welslagen van het project is dat andere waterschappen actief participeren (inzet, ervaring en financiering).

Voorliggend plan moet dienen als onderdeel van het proces tussen de waterkeringbeheerders om te komen tot een gezamenlijk project. De probleemstelling of hoofdvraag die met de uitvoering van voorliggend plan van aanpak wordt aangepakt is daarmee:

Hoe kunnen de Nederlandse waterkeringbeheerders een systeem van glasvezelkabels inzetten zodat ze tijdig worden voorzien van informatie over gaande graverij door bevers?

Deelvragen zijn dan:

- Kan een systeem van glasvezelkabels tijdig voorzien van informatie over gaande graverij door bevers?
- Hoe kan zo'n systeem eruitzien?
- Hoe kan het project om dit systeem te implementeren worden georganiseerd en gefaseerd?
- Welke middelen zijn daarvoor nodig?
- Welke risico's lopen de waterkeringbeheerders bij het uitvoeren van het project en welke baten worden erdoor gegenereerd?

1.3 Doel

Het doel van <NAAM> is om een systeem van glasvezelkabels en de bijbehorende apparatuur en software te (doen) ontwikkelen, die nodig is om de Nederlandse water(kering)beheerder tijdig te voorzien van informatie over gaande graverij door bevers, en het testen en implementeren ervan.

De impact van <NAAM> is dat de waterkering beheerders met die tijdige informatie ook tijdig passende maatregelen kunnen nemen, zodanig dat er vroegtijdig conform de gedragscodes (en dus met vergunning) kan worden gewerkt. Het aantal grotere reparaties wordt er mee vermindert, en er kan met minder capaciteit doeltreffender wordt geopereerd. De veiligheid van Nederland tegen overstromingen is daarmee beter geborgd.

1.4 De fasering van het project op hoofdlijnen

In hoofdlijn worden voor innovatieve (monitorings-)projecten meestal drie fasen onderscheiden:

1. Ontwikkelfase: Het concept wordt technisch en organisatorisch verkend. Hierbij worden basisconfiguraties uitgedacht en aannames getoetst.
2. Proof of Concept/Test- en Opschalingsfase: In deze fase worden pilots uitgevoerd om te leren in de praktijk en de techniek op te schalen naar meerdere locaties. In deze fase moeten andere potentiële partners (in dit geval vooral de waterschappen) overtuigd worden van de technische haalbaarheid en kosten-batenanalyse.
3. Realisatiefase: Dit betreft de structurele uitrol van de succesvol geteste oplossing en de inbedding ervan in de reguliere beheer- en onderhoudsprocessen van de waterkeringen.

Deze fasen worden normaliter nog opgedeeld in een aantal stappen, die per toepassing verschillen.

1.5 Leeswijzer

Voorliggend plan van aanpak bevat inhoudelijke, organisatorische en communicatieve aspecten van het ontwikkelen, ontwerpen, testen en uitrollen van een systeem om met

glasvezelkabel bevergraverij vroegtijdig te detecteren. Het schetst een voorziene uitwerking voor de korte termijn (1-2 jaar), de middellange termijn (2-5 jaar) en de lange termijn (> 5 jaar).

In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de technisch inhoudelijke stand van zaken. Hoofdstuk 3 schetst een beeld van de mogelijke configuratie van het systeem, zoals dat als resultaat van het project in het veld zou kunnen zijn aangebracht. Hoofdstuk 4 geeft de randvoorwaarden aan en de uitgangspunten voor het realiseren van het systeem. Hoofdstuk 5 geeft een aantal mogelijke organisatievormen en daarbij behorende overwegingen. Hoofdstuk 6 geeft een opzet van een praktische fasering van het project. In Hoofdstuk 7 wordt een overzicht gegeven van de middelen die nodig zijn voor de realisatie van het systeem. Hoofdstuk 8, tenslotte, geeft een beeld van de risico's en baten van het project.

2 Monitoren met behulp van glasvezeltechnieken

2.1 De ontwikkelingen in vogelvlucht

Traditionele monitoringmethoden ten behoeve van detectie van schade aan infrastructuur, zoals visuele inspectie, bleken in het verleden onvoldoende accurate informatie op te leveren, en conventionele sensoren (zoals Vibrating Wire extensometers, een rekmeting) leveren slechts lokale meetgegevens op. De conventionele methoden missen de nodige ruimtelijk-temporele informatie om lokale effecten, die wijzen op erosie en andere schadebeelden, vroegtijdig te detecteren. Hierdoor ontstond de behoefte aan continue, gedistribueerde en real-time monitoring over grote, lineaire infrastructuren. Glasvezelsensoren (FOS) voldeden aan deze eis, omdat ze immuun zijn voor elektromagnetische storingen, een hoge resolutie bieden over lange afstanden, en de kosten per meetpunt laag zijn.

Een overzicht van de ontwikkeling van de algemene toepassing van glasvezelsensoren is gegeven in Lin et al. (2025) (FOS). Radzicki et al. (2024) en Kang (2023) geven een goed overzicht van de ontwikkeling van de monitoringstechnieken in de civiele techniek, en met name in de hydraulische infrastructuur (dammen en waterkeringen). De ontwikkeling en de introductie van geavanceerde sensoren volgden een duidelijk chronologisch pad:

Temperatuurmeting als Methode (Jaren '50 - '80)

De toepassing van temperatuurmeting voor het onderzoeken van kwelprocessen in aarden dammen werd voor het eerst gedocumenteerd in de late jaren 1960, met een vroege publicatie in 1957 (Kappelmeyer, 1957). Vanaf de jaren 1980 werden deze methoden vaker gebruikt. In deze periode werd ook het gebruik van Distributed Temperature Sensors (DTS) om kwel te monitoren onderzocht. In de jaren 1990 werd de thermische methode verder ontwikkeld om te worden toegepast op aarden dammen.

Introductie van Glasvezelsensoren (FOS) in Civiele Techniek (Vanaf 1978)

Wat betreft de algemene toepassing van glasvezelsensoren (FOS) in de civiele techniek, was Mendez in 1978 een pionier in de toepassing van glasvezelsensoren voor het monitoren van betonconstructies. De FOS-technologie heeft sinds de jaren 1980 een substantiële ontwikkeling doorgemaakt. In de vroege jaren '90 werden optische vezels reeds geïntegreerd in zeer zware stalen strengankers om de integriteit van grote zwaartekrachtdammen in Duitsland te stabiliseren en te monitoren.

Overgang naar Lineaire FOS in Dammonitoring (Vanaf 2000)

In de eerste jaren van het nieuwe millennium (rond 2000) werden de eerste lineaire glasvezelsensoren geïmplementeerd voor het meten van natuurlijke temperatuur in dammen. Enkele jaren later (na 2005) begon men glasvezeloptica te gebruiken in combinatie met de thermo-actieve onderzoeksmethode (waarbij de sensorkabel wordt verwarmd) voor het monitoren van lekken in dammen en kanaaldijken. Vanaf 1998 tot

2023 werden in Zweden glasvezeloptica ingezet op 85 aarden dammen, voornamelijk bij nieuwbouw- of renovatieprojecten (Johansson, 2023). De massale uitbreiding van de ondergrondse glasvezelkabelinfrastructuur (inclusief het gebruik van Horizontal Directional Drilling, HDD) kwam op gang in reactie op de Telecommunications Act van 1996 in de VS. De U.S. Army Engineer District, St. Louis, keurde in 1998 dergelijke verzoeken goed, nadat ze aanvankelijk terughoudend waren.

Recente ontwikkelingen voor Smart Structures (Vanaf 2010)

Het concept van de 'smart levee' is recentelijk opgekomen als reactie op de toegenomen frequentie van overstromingen als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking. Dit concept is gebaseerd op het fuseren van gegevens uit verschillende sensortypen om de 'Structural Health' continu en op afstand te monitoren.

In Nederland experimenteert ProRail sinds 2024 met glasvezelkabel voor diverse doeleinden, waaronder het herkennen van spoorlopers en graverij door bevers en dassen.

2.2 Typen metingen met glasvezelkabel

In de geraadpleegde literatuur, zie Bijlage 1, komen verschillende vormen van glasvezelmonitoring voor, met verschillende doelen. Ze zijn *voorzien van een korte omschrijving* samengevat in Tabel 2.

Voor het doel van onderhavig project gaat het primair om het opvangen van graafgeluiden. De meest kansrijke techniek daarvoor lijkt Distributed Acoustic Sensing (DAS), waar ook ProRail al mee werkt. Via Distributed Strain Sensing (DSS) kan de rek worden gemeten en dat kan alleen worden opgevangen als de graverij de grond in de omgeving van de kabel verplaatst. Via Distributed Temperature Sensors (DTS) kan de temperatuurverandering worden gemeten, en die kan wel worden gemeten als er al een hol is (een zoogdier heeft net als de mens een hoge lichaamstemperatuur), maar veel minder goed als het dier nog niet in de dijk is.

Tabel 2 Typen metingen met glasvezelkabel in recente wetenschappelijke literatuur.

Type	Doel	Omschrijving
Gedistribueerde Metingen (D-FOS)	spannings- en temperatuurprofielen	De ontwikkeling van Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors (D-FOS) maakte het mogelijk om spannings- en temperatuurprofielen te meten over tientallen kilometers met een hoge gevoeligheid en ruimtelijke resolutie tot enkele centimeters. Dit is ideaal voor lineaire infrastructuren. DTS (Distributed Temperature Sensing), gebaseerd op Raman-verstrooiing, werd in reële experimenten gevalideerd om kwel te monitoren door de temperatuurverandering in dijken te meten.
Distributed Temperature Sensors (DTS)	monitoren van kwel	Dit systeem vergelijkt de relevante parameters van het spectrum van de uitgezonden laserpuls met het spectrum van het Raman-verstrooide licht om temperatuur te meten. Het wordt beschouwd als een waardevol instrument voor monitoring in de civiele techniek. DTS kan temperaturen meten over lange afstanden, soms tot wel tientallen kilometers, met een nauwkeurigheid van ongeveer 1 °C en een ruimtelijke resolutie van minder dan 1 meter.

Distributed Acoustic Sensing (DAS)	Geofysische en seismische onderzoeken, magma-intrusies in vulkanische gebieden, detectie van dierlijke graverij	Het voordeel van DAS is dat de graverij niet heel nabij de detectiekabel hoeft zijn. NB. 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.
Distributed Strain Sensing (DSS)	meten van vervorming	DSS (Distributed Strain Sensing) is een Distributed Fiber Optic (DFO) technologie die nauwkeurige rekprofielen met een hoge ruimtelijke resolutie over de gehele lengte van een structuur levert. Deze techniek is ideaal voor lineaire infrastructuren omdat het een continue meting van de rek of vervorming langs de kabel mogelijk maakt.
Gedistribueerde Druk- en Poriedruksensoren (DPS)	hydrostatische druk of poriewaterdruk	Distributed Pressure Sensor (DPS). Dit systeem gebruikt een helix-vormige sensorvezel gewikkeld rond een cilindrisch samendrukbaar element. Het meet hydrostatische druk of poriewaterdruk door de radiale krimp van dit element te registreren. Dit maakt monitoring van interne erosie in dijken mogelijk met een nauwkeurigheid van 15% en een resolutie van enkele centimeters.
Monitoring van Grote Vervorming (PFOS)	zeer grote rekken	Polymeric FOS (PFOS) werden ontwikkeld en geïntegreerd in slimme geomatten (anti-erosie wapeningen) om zeer grote rekken (tot 40% en meer) te meten, cruciaal voor het detecteren van lokale grondverplaatsing, oppervlaktevervorming of de activiteit van gravende dieren in waterkeringen.
Fibre Bragg Grating (FBG)	meten van deformatie	FBG (Fibre Bragg Grating) is een meerpuntssensortechniek (multi-point) in de glasvezelmonitoring. FBG's zijn gelokaliseerde sensoren, waarvan er tot ongeveer 500 unieke kerfjes op één kabel kunnen worden aangebracht. Hoewel ze kwetsbaarder en duurder zijn dan standaard glasvezelkabels, bieden ze een hoge nauwkeurigheid.
Thermo-Actieve Monitoring (MP-TAM)	in-situ kwelsnelheid	Om de beperkingen van passieve monitoring te omzeilen, is de Multi Point Thermal-Active Monitoring (MP-TAM) methode ontwikkeld. Deze maakt gebruik van afzonderlijke, thermisch-actieve sensoren met microverwarmingselementen die in de grond worden gehamerd. Dit maakt het mogelijk om in-situ kwelsnelheid (seepage velocity) te bepalen, een cruciale en ondubbelzinnige parameter voor dijkveiligheid.
Dynamische Monitoring (AT-BOTDA):	dynamische rekmetingen	De Adaptive Threshold Brillouin Optical Time Domain Analysis (AT-BOTDA) werd ontwikkeld om de meetsnelheid van Brillouin-sensoren te verbeteren, waardoor dynamische rekmetingen en vibratieanalyse mogelijk zijn. Dit wordt toegepast in sensing rods om erosiediepte (scour) te bepalen door de gradiënt van de dynamische rekoverdrachtsnelheid te analyseren.

2.3 toepassing van glasvezelkabel in dijken

2.3.1 Toepassingen in experimentele en praktijk opzet

In Nederland wordt glasvezel nog niet vaak regulier toegepast in dijken en dammen, zeker in vergelijking met andere landen in Europa, waar glasvezelmonitoring veelal regulier wordt toegepast in lekdetectie van (stuw)dammen. Zie een uitgebreid overzicht in Bijlage 2.

In experimentele setting, zoals IJkdijk (pipingexperiment, stabiliteitsexperimenten), LiveDijk (Willempolder bij Rivierenland, de Grecht bij Stichte Rijnlanden) en Flood Proof Holland zijn glasvezelmonitoringstechnieken een aantal keer toegepast (zie kader).

Experimentele toepassingen glasvezel in Nederland

Glasvezelkabels zijn in experimentele omgevingen, zoals de IJkdijkproeven en diverse LiveDijk projecten, beproefd voor de continue monitoring van faalmechanismen en gedragsanalyse van waterkeringen. Hierbij zijn deformatiemetingen uitgevoerd (rek, trilling), temperatuursmetingen en waterdrukmetingen (met druksensoren aangebracht op de kabel). Bij het dijkversterkings-project Kinderdijk – Schoonhovense Veer (KIS) werden glasvezelkabels gebruikt om verzakking van de dijk te monitoren op een dik veenpakket. Bij een veldexperiment naar het functioneren van verticaal zanddicht geotextiel in de Willemspolder werd glasvezel toegepast. Het Dijk Monitoring- en Conditioneringssysteem (DMC) gebruikt ook glasvezel voor temperatuursbepaling en drukbepaling met hierop aangebrachte sensoren. De techniek is toegepast in Colijnsplaat (Zeeland) en de Ommelanderzeedijk (nabij Delfzijl)

Glasvezelkabels worden ook in Nederland mondjesmaat meer toegepast in de praktijk voor de continue monitoring van dijken (bijvoorbeeld de Keen van Waterschap Hollandse Delta en Almere Duin van waterschap Zuiderzeeland) en andere waterkerende constructies zoals kademuren (bv. Havenbedrijf Rotterdam). De belangrijkste toepassingsgebieden in de praktijk zijn:

1. Detectie van lekkage en interne erosie (Piping)

- Fiber Optic Distributed Temperature Sensing (DTS) wordt al sinds 1953 gebruikt als een instrument voor de detectie van lekkages en interne erosie in (stuw)dammen.
- Temperatuurmetingen via glasvezelkabels worden gebruikt als indicator voor lekkage van water doordat preferente stroombanen worden bepaald door actieve verwarming van de kabel en omringende grondwater. De mate van afkoeling na opwarming geeft een mate van de stroomsnelheid van het grondwater. Dit kan inzicht geven in zones waar sterke kwel plaatsvindt.
- Vanwege alom aanwezige druk is waterdrukbepaling met alleen glasvezel wellicht onmogelijk tot zeer lastig. Door toepassing van aanvullende druksensoren kan de waterduk met puntmetingen worden verricht. Dit is in praktijk toegepast bij Colijnsplaat, de Ommelanderzeedijk en Almere Duin.

2. Structurele monitoring en vervorming

- De fibre optics technologie wordt toegepast op geotechnische constructies om vervormingen en rekken (strain) te meten. Dit omvat de monitoring van

damwanden en diepwanden tijdens ontgravingen, waarbij FBG/DTG extensometersystemen aan stalen wapening of buizen zijn bevestigd.

- Voor het meten en monitoren van spanningen in verankerde constructies zoals groutankers en monopiles van windturbines op zee wordt ook glasvezel gebruikt. Dit maakt langetermijn-monitoring van de krachten en sterktebepaling van deze constructies mogelijk.
- Aandachtspunt: glasvezelsensoren leveren data gedurende de gehele levenscyclus van een dijk, van dagelijks gebruik tot aan versterking. Van belang is echter om duidelijk voor aanvang van de monitoring de monitoringsdoelstelling te bepalen en te bepalen hoe om te gaan met in te winnen data. De omvang van ingewonnen data kan snel enorm worden.

2.3.2 Leerpunten samengevat

Op hoofdlijnen zijn de volgende leerpunten uit zowel experimentele als praktijktoepassing af te leiden.

Langetermijn monitoring als Integraal onderdeel van de Levenscyclus/zorgplicht

Monitoring in algemene zin ingezet als integraal onderdeel over de gehele levenscyclus van de waterkering, inclusief beoordeling, ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud, en calamiteitenbeheer zorgt voor een objectieve bijdrage aan de onderbouwing van de zorgplicht. Met name op het gebied van beverdetectie levert dit een belangrijke bijdrage.

Doelmatigheid en Onzekerheidsreductie

Monitoring is alleen zinvol wanneer het wordt ingezet om specifieke vragen over het gedrag van de dijk/waterkering te beantwoorden. Dit leidt tot het verkleinen van onzekerheden, wat ook geldt in geval van beverdetectie met fibre optics.

Essentieel voor doelmatigheid en onzekerheidsreductie is dat de fibre optics data juist kunnen worden geïnterpreteerd. Dit betekent dat de systemen voor data-interpretatie en -analyse geijkt zijn voor detectie van bevergraverijen. Is dat niet het geval, dan beïnvloedt dit het handelingsperspectief van de dijkbeheerder en daarmee de wijze van opvolging.

Organisatorische inbedding, expertise en 'dagelijks' gebruik

De aansluiting van monitoringssystemen op de dagelijkse beheer- en onderhoudsprocessen van waterschappen moet goed worden geborgd. Monitoring vereist dat de juiste expertise, kennis en ervaring aanwezig zijn om data te analyseren, interpreteren en op te volgen.

Financiën

De kosten voor de uitleesunits (interrogator) bedragen globaal €100.000 tot €150.000, waarbij één unit 3 tot 50 km kan bemeten. Er zijn ontwikkelingen in de markt die wijzen op goedkopere, dedicated uitleesunits. Echter zijn deze in ontwikkeling en naar verwachting nog niet volledig operationeel beschikbaar op korte termijn.

Overwogen moet worden in hoeverre de uitleesunits ook aanvullende resultaten inwinnen. Oftewel: welke resultaten worden aanvullend geleverd bij de detectie van bevergraverijen?

Begroot voor aanbesteding de total costs of ownership, dus ook beheer, onderhoud, dataverwerking en -analyse, etc. Dit is benodigd voor het bepalen van geschikte aanbestedingsvormen.

Data-infrastructuur

Bij langdurige monitoring kunnen grote datavolumes ontstaan. Dit vereist onderzoek naar real-time verwerking van geacquireerde data zoals ProRail aangaf toe te passen.

Data moet goed interpreteerbaar zijn en er moeten automatische meldingen bij alarmwaardes zijn, omdat de aandacht van de beheerder voor de data afneemt als er langdurig geen veranderingen zijn. Hierover is ervaring opgedaan bij Almere Duin.

Uitvoeringsaspecten

De locatie, nauwkeurigheid en koppeling van de glasvezel met de omliggende bodem zijn essentieel voor goed interpreteerbare resultaten. De beste manier om een kabel voor graverijdetectie in te graven en te verankeren moet specifiek worden onderzocht. Daarbij moet ook de diepteliggging worden betrokken, mede in verband met signaal-invloeden van buitenaf.

Tijdens het aanbrengen van kabels moet met kennis, kunde en vakmanschap gewerkt worden. Beschadiging kan eenvoudig optreden wat tot kostenverhoging leidt.

Zorg voor goede, water- en molestbestendige installatie van glasvezels en bijbehorende apparatuur in het veld. Zorg voor goede beveiliging. Om beschadigingen te voorkomen is het aanmelden van de kabels in KLIC belangrijk. Daarbij komt dat ook de dijkbeheerorganisatie en andere relevante personen/organisatieonderdelen moeten weten dat de kabel er ligt en waar deze ligt. Neem de ligging van de kabel en appratuur daarom op in de hiervoor bedoelde registers/GIS van de keringbeheerder.

Daarnaast is continue beschikbaarheid van elektriciteit van belang.

Tevens is het van groot belang dat er signalen worden gegeven bij afwijkende situaties zoals stroomuitval, data-uitval, storingen in electriciteitsvoorziening, vandalisme, beschadigingen aan de kabel en apparatuur, etc.

Multisensoriek, calibratie en data-interpretatie

Het is essentieel om een combinatie van meettechnieken te gebruiken tijdens een Proof of Concept fase. Geen enkel meetsysteem levert namelijk *het* antwoord op *de* vraag. Fibre optics, verschillende typen wel te verstaan, moeten daarom gevalideerd worden met bijvoorbeeld hellingmeetbuizen, zeer gevoelige bewegingssensoren, waterdruksensoren, temperatuursensoren, camera's, etc. De interpretatie en ijking van de metingen van fibre optics meetsystemen zijn cruciaal. Een goede nulmeting, zoals ook is verwoord in het Spoorboekje Implementatie Dijkmonitoring [STOWA, 2024], kan lang duren (vele maanden, jaren). Dit is echter essentieel om uit te voeren omdat dan ook bevergedrag kan worden onderscheiden van de reguliere, mogelijk seizoensafhankelijke, achtergrondruis van een dijk.

Na succesvolle kalibratie wordt het data-analysesysteem getraind om bij de beoogde signalen een waarschuwing af te geven; alarmwaarden moeten juist worden ingesteld. Een handelingsperspectief dient hieraan gekoppeld te worden. Een goed overzichtelijk en begrijpelijk dashboard waarin metingen op een begrijpelijke manier worden gepresenteerd is van belang.

2.4 De stand van zaken samengevat

Met glasvezel monitoring kunnen we een belangrijke overstap maken van traditionele, lokale meetmethoden naar continue, gedistribueerde en real-time monitoring. Waar visuele inspecties en conventionele sensoren vaak ruimtelijke informatie missen, biedt Fiber Optic Sensing (FOS) een hoge resolutie over lange afstanden. De technologie is de afgelopen decennia geëvolueerd van eenvoudige temperatuurmetingen naar toepassingen voor het monitoren van vervorming en trilling/geluid. In Nederland is al ervaring opgedaan in enkele praktijksituaties en experimentele settings zoals de IJkdijk en LiveDijk-projecten, waar technieken succesvol zijn toegepast en/of beproefd voor het monitoren van piping, stabiliteit en vervorming.

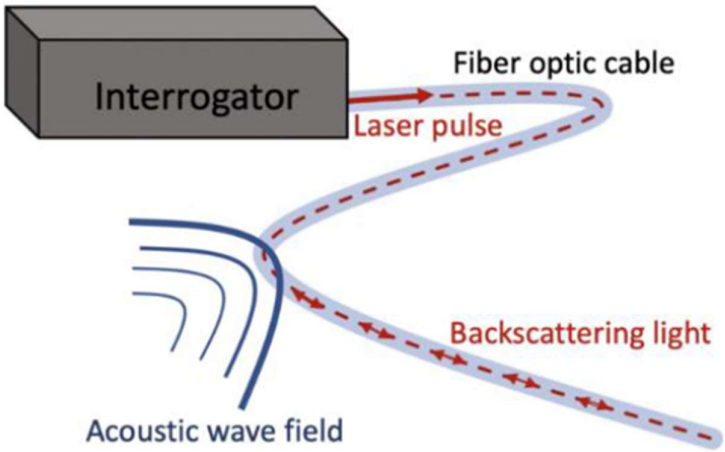
Voor het specifieke doel van detectie van gaande graafactiviteit door bevers wordt Distributed Acoustic Sensing (DAS) als de meest kansrijke techniek beschouwd om graafgeluiden op te vangen, een toepassing waar ProRail inmiddels praktijkervaring mee opdoet langs het spoor. Hoewel er leerpunten zijn zoals het beheer van grote datastromen, wordt de techniek inmiddels steeds beter, en er is voldoende aanleiding om ook voor waterkeringen de stap naar praktijktoepassing in te zetten.

De ervaringen met toepassingen tonen aan dat deze techniek de onzekerheid over dijkgedrag reduceert. De meerwaarde kan nog worden versterkt als data van verschillende sensortypen worden gecombineerd voor een integraal beeld van de dijkveiligheid ('smart levee'-concept). Door monitoring te integreren in de gehele levenscyclus van de waterkering en in te zetten op geautomatiseerde data-interpretatie, ontstaat een robuust instrument dat de zorgplicht van waterbeheerders effectief ondersteund.

3 Indicatieve configuratie

Een meetconfiguratie dient als het praktische ontwerp van een systeem voor een gesteld doel. In het onderhavige plan betreft het een systeem van glasvezelkabels, met als doel om de Nederlandse waterkeringbeheerders tijdig te voorzien van informatie over gaande graverij door bevers, zie paragraaf 1.3. In onderhavig plan wordt dat op hoofdlijnen geschetst, als referentie voor de aanpak en activiteiten in het vervolg van dit document.

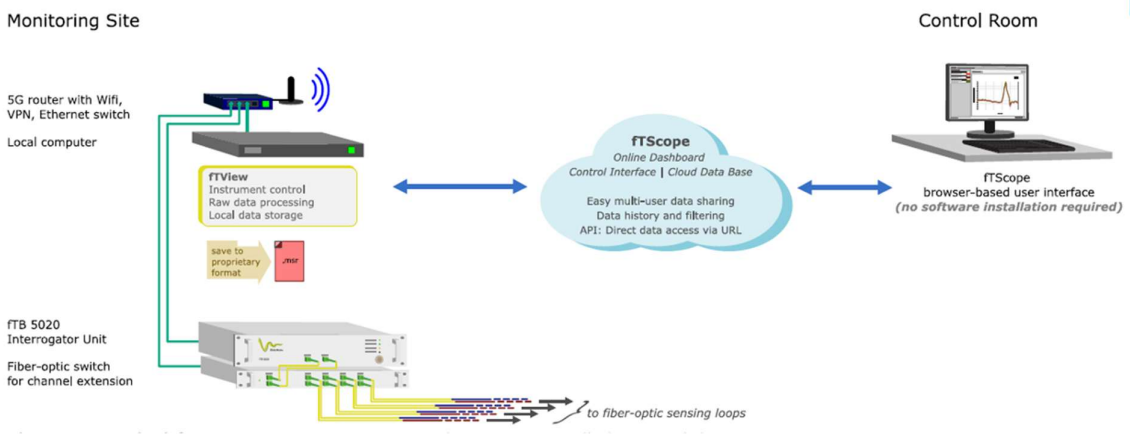
Op hoofdlijnen bestaat de configuratie uit de kabel zelf en een interrogator (uitleesunit), zie Figuur 4. De data die de interrogator uitleest moet vervolgens nog ontsloten worden. Daartoe wordt de interrogator aangesloten op een computersysteem en een opslagsysteem, zie Figuur 5, het linkerdeel. Rechts in deze figuur is ook nog een ontsluiting via internet aangegeven om via een user interface de data op afstand in een control room op te kunnen bekijken. De grote hoeveelheid data noopt dan wel tot een zorgvuldige filtering.



Figuur 4 hoofdcomponenten van de configuratie

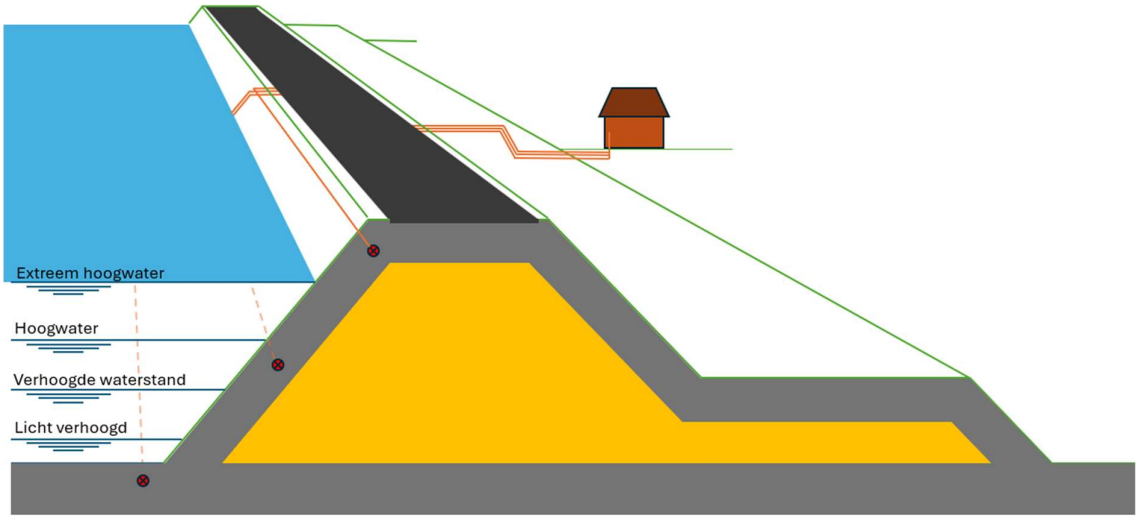
In het veld ziet de configuratie eruit zoals in Figuur 6. Hierin is in de dwarsdoorsnede een aantal kabels ingetekend (in rood) en een aantal mogelijke waterstanden waarbij beveractiviteit kan optreden. het aantal kabels is in dit stadium nog onzeker. Het hangt af van de afstand (radius) waarover een enkele kabel de graaf-activiteiten kan waarnemen.

NB. De schets bevat alleen de (ideale) situatie dat er na grootschalige uitrol alleen kabels in het buitentalud nodig zijn. Tijdens de ontwikkelfasen zijn er wellicht meer kabels nodig op andere locaties in de dwarsdoorsnede, zoals in de kern, of meetinstrumenten voor andere meetmethoden dan glasvezel.



Typical fTB 5020 DFOS system set-up (source: www.FibrisTerre.de)

Figuur 5 Voorbeeld van benodigde hardware en mogelijke data-ontsluiting.



Figuur 6 Voorbeeld van een mogelijke on-site lay-out, als het concept is ontwikkeld.

Een meer gedetailleerdere configuratie, die kan worden gebruikt voor bijvoorbeeld een testlocatie waarbij verschillende meetmethoden worden ingezet, zal t.z.t. tenminste ook moeten ingaan op:

- Aantal kabels: hoeveel meetpunten zijn er in de dwarsdoorsnede er in totaal nodig om de bever graaf activiteit te kunnen monitoren.
- Locaties in drie dimensies van andere meetinstrumenten ter validatie van de fibre optics metingen: De exacte ruimtelijke positie (x, y en z-coördinaten) van elk instrument is cruciaal voor de juiste data interpretatie.
- Te monitoren parameters: Er dient te worden gespecificeerd welke fysische grootheden, zoals geluid, waterspanning, temperatuur of rek, door de opstelling worden gemeten.

- Type sensoren of meettechniek: Er moet worden vastgelegd welk specifiek type instrument (zoals peilbuis, waterspanningsmeter of een specifiek type glasvezelkabel) wordt gebruikt.
- Installatiediepte en relevante bodemlaag: Sensoren moeten nauwkeurig in de juiste bodemlaag worden geplaatst om specifieke processen, zoals piping in een zandpakket, correct te kunnen waarnemen.
- Onderlinge afstanden en resolutie: De afstand tussen de meetpunten bepaalt de dichtheid van het netwerk en moet worden afgestemd op het fenomeen dat men wil detecteren.
- Visuele weergave via een schets of kaart: Een ontwerptekening of kaart is noodzakelijk om de ligging van de sensoren en hun onderlinge samenhang in het veld inzichtelijk te maken.
- Koppeling met de ondergrond: Vooral bij glasvezeltechnieken is het van belang te beschrijven hoe de kabel mechanisch is verbonden met de grond, bv. via een geogrid of directe inbedding.
- Nauwkeurigheid van de positionering: Het vastleggen van de toegestane marges.

4 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Analogie

Het opzetten van glasvezelmonitoring is als het aanleggen van een zenuwstelsel in de dijk. De kabels (zenuwen) werken alleen als ze goed verbonden zijn met het weefsel (de grond) en de impulsen doorgeven aan een brein (interrogator en data-analyse met slimme software/experts). Zonder een brein dat weet wat 'pijn' (schade/beveractiviteit) is, en daarop reageert met een passende reactie (handelingsperspectief), zijn de zenuwen nutteloze passieve draden in het lichaam.

Om een meetconfiguratie zoals geschetst in Hoofdstuk 3 in de praktijk te kunnen opzetten spelen er een groot aantal praktische randvoorwaarden. Voorliggend overzicht is samengesteld op basis van een overleg met beheerders (Bijlage 7), de leerpunten uit de inventarisatie van toepassingen (paragraaf 2.3.2) en ervaring van de auteurs. De inbreng tijdens het overleg met beheerders is uitgevraagd als randvoorwaarden (condities) en belemmeringen. De leerpunten uit de toepassingen zijn soms als condities en soms als aandachtspunten omschreven.

In het volgende is alle inbreng zo mogelijk geformuleerd in de vorm van randvoorwaarden en uitgangspunten. Randvoorwaarden spannen de ruimte op waarbinnen uitvoering van het plan mogelijk of toegestaan is. Ze liggen niet binnen de invloedssfeer van het project. Hoewel buiten de projectsfeer ook de randvoorwaarden wel aan te passen zijn, is hier de projectomgeving als uitgangspunt genomen voor het definiëren van de randvoorwaarden.

Uitgangspunten zijn sturende basiskeuzes (vertrekpunten), die onder omstandigheden ook kunnen worden bijgesteld. Invulling ervan ligt binnen de invloedssfeer van het project. Veel van de voorwaarden en belemmeringen uit overleg met beheerders (Bijlage 7) konden met deze definities worden verwoord in de vorm van uitgangspunten voor de projectuitvoering.

Randvoorwaarden en uitgangspunten zijn in onderstaande tabellen onderverdeeld in strategische, organisatorische, technische en operationele aspecten.

4.1 Strategische en organisatorische randvoorwaarden en uitgangspunten

Tabel 3 Strategische randvoorwaarden

Strategische randvoorwaarden	Toelichting
Er is voldoende capaciteit om de kwaliteit en operatie te borgen	Het gaat daarbij om: mensen, middelen zoals apparatuur en software, budget, etc. Het betreft in de startfase de ontwikkeling en aanleg, en daarna de capaciteit en kunde om het systeem operationeel te houden.

Tabel 4 Strategische uitgangspunten

Strategische uitgangspunten	Toelichting
De projectpartners omarmen een gezamenlijk monitoringsdoel	Monitoring is alleen zinvol als het een specifieke vraag beantwoordt; zonder duidelijke vraagstelling is instrumentatie overbodig
De focus ligt op de Total Cost of Ownership (TCO)	Bij de begroting moet niet alleen naar de investering (aanschaf van kabels en interrogators) worden gekeken, maar naar de kosten over de gehele periode, inclusief onderhoud, vervanging van interrogators, en data-analyse.
De monitoring maakt deel uit van een Lifecycle-benadering	In navolging van het vorige uitgangspunt (focus op TCO), wordt ook naar de baten gekeken. Monitoring biedt de meeste meerwaarde als het niet als een tijdelijk project wordt gezien, maar als een integraal onderdeel van de gehele levenscyclus van de dijk (ontwerp, beheer, onderhoud en versterking, calamiteiten), waarbij data uit de ene fase de volgende fasen ondersteunt.
Er is handelingsperspectief bij detectie van graverij	Als de graverij met een systeem, zoals in dit plan beoogd, weliswaar kan worden gedetecteerd, maar niet kan worden opgevolgd door een ter zake relevante actie, dan is zo'n systeem niet zinvol.
Er is een voldoende groot deel van de dijkbeheerders (waterschappen en Rijkswaterstaat) betrokken	Dat levert draagvlak voor de ontwikkeling, het kritisch bezien van de resultaten, het voldoende beproeven van het systeem, en mogelijkheden om ontwikkelingskosten te delen

Tabel 5 Organisatorische randvoorwaarden

Organisatorische randvoorwaarden	Toelichting
Er wordt een vergunning voor het werk in de eigen dijk afgegeven door de dijkbeheerder	Als er geen vergunning wordt afgegeven om de werkzaamheden aan en in de dijk uit te voeren, is het niet mogelijk om het systeem in te richten.

Tabel 6 Organisatorische uitgangspunten

Organisatorische uitgangspunten	Toelichting
Het systeem wordt ingericht in een relevant gebied	Het systeem wordt ingezet in een gebied waar bevers actief zijn.
De dijkbeheerder heeft het data-eigendom	De ruwe data en kerninformatie moeten altijd eigendom blijven van de dijkbeheerder om regie over de waterveiligheid te behouden

Vendor lock-in wordt voorkomen	Daarmee wordt het systeem niet afhankelijk gemaakt van de kennis en ervaring van een enkele toeleverancier
Er is voldoende interne expertise	De (project)organisatie moet beschikken over voldoende kennis om de enorme hoeveelheden data te kunnen interpreteren en om te zetten in handelingsperspectieven
ProRail wordt actief verbonden aan het project	ProRail is al enkele jaren bezig met monitoring aan spoordijken en heeft ter zake relevante ervaring

4.2 Technische randvoorwaarden en uitgangspunten

Tabel 7 Technische randvoorwaarden

Technische randvoorwaarden	Toelichting
Er wordt een multisensor-aanpak toegepast	Eén type meting is zelden voldoende; glasvezelmetingen moeten vaak worden geverifieerd met andere metingen zoals peilbuizen, waterspanningsmeters of zelfs foto's of (infrarood)films. Dat hoeft niet over de gehele lengte of de gehele projectduur (want anders is er geen voordeel van glasvezel monitoring), maar wel in de ontwikkelingsfase, en daarna bv. op enkele locaties.
De kabel en andere meetapparatuur worden nauwkeurig ingemeten	De exacte ruimtelijke locatie (X, Y, Z-coördinaten) van de sensoren moet met hoge precisie worden vastgelegd en beheerd in een GIS-systeem. Melding bij Klic moet plaatsvinden ter voorkoming van beschadigingen door menselijke graverijen.
Er wordt een grondige nulmeting uitgevoerd	Een betrouwbare referentiemeting (nulmeting) is noodzakelijk om afwijkingen later correct te kunnen duiden.
Er wordt een goede en blijvende mechanische koppeling met de grond gerealiseerd	Voor technieken zoals Distributed Acoustic Sensing (DAS) is een goede mechanische koppeling met de grond essentieel om trillingen (zoals graafgeluiden) correct door te geven aan de kabel
Er is betrouwbare energievoorziening aanwezig	Het systeem vereist een constante en betrouwbare stroomvoorziening in het veld (zeker als actieve meetmethoden worden ingezet waarbij de kabel wordt verwarmd)
Robuuste aansluiting op internet is beschikbaar	Anders kan de monitoring niet op afstand worden uitgevoerd
Ook met veel achtergrondruis, is interpretatie van de data voldoende betrouwbaar mogelijk.	Dit is van belang om onder alle omstandigheden, bij verkeer, bij hoogwater en storm, etc., de graafactiviteit van de bever te kunnen onderscheiden. Daarmee wordt gezorgd dat de informatie voldoende betrouwbaar is, ook in omstandigheden van veel interferentie vanuit de omgeving.
Er wordt gezorgd voor automatisering van data-analyse en alarmering bij gaande graverij	Gezien de enorme datavolumes (vooral bij akoestische metingen) zijn geautomatiseerde data-analyse en een overzichtelijk dashboard met automatische alarmering bij grenswaarden noodzakelijk. Die grenswaarden of signaleringswaarden moeten wel vooraf worden ingeregeld. Daarmee is de grote hoeveelheid data goed te filteren.
Er wordt gezorgd voor ter zake relevante data-validatieprocedures	Het gebruik van protocollen zoals FAT (Factory Acceptance Test), SAT (Site Acceptance Test) en GAT (Gebruiks Acceptatie Tests) is essentieel om de betrouwbaarheid van de opgeleverde sensordata te garanderen. FAT: een test of wordt voldaan aan alle gespecificeerde eisen en functionaliteiten, inclusief de data-integriteit

	SAT: de laatste controle op locatie om te garanderen dat geïnstalleerde systemen of apparatuur, inclusief de dataverwerking daarvan, correct functioneren in de echte, operationele omgeving, voldoen aan specificaties, en klaar zijn voor gebruik, waarbij ook aandacht is voor integratie, prestaties, veiligheid, en de kwaliteit van de data zelf GAT: test door gebruikers om te bepalen of het opgeleverde systeem voldoet aan de eisen die de gebruiker eraan stelt.

4.3 operationele randvoorwaarden en uitgangspunten

Tabel 8 Operationele randvoorwaarden aan het systeem

Operationele randvoorwaarden Systeem	Toelichting
De apparatuur staat in een beschermde en toegankelijke omgeving.	De apparatuur moet water- en molestbestendig (hufterproof) worden geïnstalleerd, en toegankelijk zijn voor lokale bediening, onderhoud, reparatie.
De kabels zijn voldoende diep aangelegd en aangemeld bij KLIC	Kabels moeten molestbestendig (bijvoorbeeld tegen knaagdieren of schapen) worden aangelegd, zodat ze voldoende beschermd te zijn tegen beschadiging bij onderhoudswerkzaamheden, en ze dienen te worden aangemeld bij het KLIC-register, om graafschade door latere werkzaamheden te voorkomen.
De kabel wordt beschermd/is bestand tegen breuk	De kabels kunnen onder spanning komen te staan of breken door grondvervormingen, of door werkzaamheden of door dierlijke activiteit. Daar moet bij het type kabel rekening mee worden gehouden.
Er is opslagcapaciteit voor de zeer grote hoeveelheden data	De data-omvang is zodanig dat de opslagcapaciteit moet worden geborgd.
Er wordt gezorgd voor ontsluiting van de data via een dashboard	De grote hoeveelheid dat maakt ondersteuning van de interpretatie via een dashboard noodzakelijk
De glasvezelkabel functioneert ongeacht seizoensafhankelijke toestanden zoals vocht en temperatuur.	Afhankelijk van het seizoen kan de toestand van de kering verschillen. Het betreft dan waterstanden in het dijklichaam, vochtgehaltes, temperatuur, etc. De glasvezelkabel moet in alle omstandigheden functioneren.
Het systeem en de functionaliteit ervan blijven gedurende de gehele levensduur van de dijk beschikbaar	Elk systeem heeft een eindige levensduur. De moet uiteraard voldoende lang zijn om niet telkens weer de apparatuur of kabel te vervangen. Maar vervanging of reparatie moet wel mogelijk zijn om de functionaliteit van het systeem gedurende de levensduur van de dijk te borgen (die is naar verwachting veel langer dan die van het systeem).

Tabel 9 Operationele randvoorwaarden voor de aanleg

Operationele randvoorwaarden Aanleg	Toelichting
De glasvezelkabel wordt zo aangelegd dat het de functionaliteit en het onderhoud aan bestaande systemen niet belemmerd.	Er liggen mogelijk al bestaande systemen in de lengterichting van de dijk (of dwars op de lengterichting). De functionaliteit en onderhoudbaarheid daarvan mag niet worden belemmerd door de aanleg van een nieuw systeem.
De aanleg van de glasvezelkabel wordt uitgevoerd zonder dat de functionele eigenschappen van de dijk worden beperkt.	De aanleg is hoe dan ook een ingreep waarbij de dijk (tijdelijk) wordt aangetast. Er moet voor worden gezorgd dat de dijk in korte tijd de ‘oude’ sterkte weer heeft opgedaan.

De aanleg van de glasvezelkabel wordt uitgevoerd zonder dat de aanpasbaarheid van de dijk worden beperkt.	De aanwezigheid van glasvezelkabel mag geen beperking vormen voor het verbeteren of aanpassen van de dijk gedurende de levensduur van de waterkering.
Specifiek voor de Proof of Concept fase (PoC):	
Er worden ter zake relevante locaties gekozen in de PoC-fase	Een systeemtest of ijklocatie behoeft niet noodzakelijkerwijze in de dijk, maar kan ook op de vooroever of elders. Daarbij moet ook worden betrokken: • dat het in de testfasen van belang kan zijn om de bever even z'n gang te laten gaan. En als er voor een dijklocatie wordt gekozen, dan is het van belang dat er expliciet wordt overwogen welk type dijk wordt getest: • Een 'gevoelige' dijk (dus niet volledig klei) met zandkern • Een minder 'gevoelige' dijk
De PoC-locaties waar de apparatuur is ondergebracht en langs de kabel zijn goed toegankelijk.	De site moet goed toegankelijk zijn. Bij voorkeur is er een berijdbare weg aanwezig.
De locatie is voldoende lang beschikbaar zodat de beoogde PoC-testdoelen kunnen worden behaald	Er kunnen tests nodig zijn om het systeem te testen (hardware, software), en tests om het graafgeluid te detecteren. Als daarvoor non-artificiële situatie wordt gekozen dan kan voor dat laatste wellicht een langere testduur nodig zijn.

Tabel 10 Operationele wensen

Operationele wensen	Toelichting
Waar mogelijk zonder beperking van de bestaande functie, wordt gebruik gemaakt van reeds aanwezige glasvezelkabels	Het is (in delen van het ontwikkelingsproces) praktisch om gebruik te maken van reeds bestaande, aanwezige glasvezel. Bestaande functionaliteit mag door multifunctioneel gebruik uiteraard niet worden beperkt.
Er wordt rekening gehouden met meerdere use cases	De use cases die worden onderscheiden zijn • beginnende graverij • begin van holvorming (bever is nog niet door de kleilaag heen) • doorgraven kleilaag (potentiële waterstroming vanuit buitenwater naar de kern) • Beverhol in de kern

5 Organisatie en Samenwerkingsvormen

5.1 Drie organisatievormen voor markt en overheid

De verkenning naar de inzet van *fibre optics* voor de detectie van bevergraverijen in dijken, bevindt zich op het snijvlak van een urgent publiek probleem (waterveiligheid) en een technologische innovatie. Het succes van dit project is in belangrijke mate afhankelijk van de wijze waarop de samenwerking tussen de overheid, kennisinstellingen en marktpartijen (de 'triple helix') wordt georganiseerd, want:

- De grootschalige uitrol van de investering in infrastructuur (kabels en *interrogators*) kan oplopen tot tientallen miljoenen euro's.
- Aangezien de functie (waterveiligheid en bescherming tegen graverij) primair publiek is, kan de overheid de verantwoordelijkheid en investeringen niet volledig bij de markt neerleggen.
- De kennis van en innovatiekracht van de markt is van nodig om waardevolle informatie uit het systeem te betrekken. Zonder zekerheid op voldoende omzet in de uitrolfase, zullen ondernemers hun kennis echter niet gratis inbrengen.

De bereidheid van private partijen om mee te investeren hangt sterk samen met de kans op een solide businesscase later. Een verstandige organisatievorm moet daarom risicodeling mogelijk maken en tegelijkertijd de markt voldoende zekerheid bieden op toekomstige opbrengsten. Er worden drie hoofdmodellen voor samenwerking tussen overheid en markt in ogenschouw genomen:

1. Publiek-Private Samenwerking (PPS): Hierbij delen overheid en marktrisico's en investeringen, waarbij de bereidheid van de markt om mee te financieren afhankelijk is van de kans op een solide businesscase aan de achterkant. Dit model komt vaak uit op een 50/50-verdeling in de beginfase van risicovolle ontwikkeling.
2. Overheid betaalt (als opdrachtgever): In dit model neemt de overheid de volledige regie en financiert zij de ontwikkeling en/of aanleg. Dit is het meest geschikte model voor de aansturing van *assets* zoals de fysieke infrastructuur. De overheid behoudt hierdoor de regie en kan standaarden opleggen om vendor lock-in te voorkomen.
3. Markt ontwikkelt en overheid koopt (als klant): In dit model investeert de markt en koopt de overheid vervolgens diensten af, mogelijk via een abonnementsvorm (*Data as a Service, DaaS*). Dit model is financieel lastig voor zeer kostbare infrastructuur, omdat de data extreem duur wordt om de investering terug te verdienen. Bovendien leidt dit snel tot monopolie en vendor lock-in, iets wat de overheid in haar kerntaak (waterveiligheid) wil vermijden.

5.2 Voor- en nadelen voor infrastructuur en datadiensten

Het onderstaande overzicht geeft voor infrastructuur (Tabel 11) en datadiensten (Tabel 12) de voor- en nadelen voor de drie organisatievormen. Waar de fase van belang is (zie paragraaf 1.4) is dat in de eerste kolom aangegeven.

Tabel 11 Voor- en nadelen organisatievormen voor projectonderdeel infrastructuur.

Hardware/Infrastructuur	Voordelen	Nadelen	Weging
Overheid betaalt (Opdrachtgever)	De overheid behoudt volledige regie en eigendom over de infrastructuur (de *asset*). Dit is cruciaal om vendor lock-in te voorkomen. De infrastrctuur wordt gestandaardiseerd voorgeschreven (zoals bij peilbuizen). De aanleg kan aangestuurd worden als *business as usual* en regulier worden aanbesteed. De ruwe data en kerninformatie blijven eigendom van de dijkbeheerder.	De aanleg van een nationaal glasvezelnetwerk vereist een forse investering van tientallen miljoenen euro's voor de overheid. De overheid is van nature risicomijdend, wat de snelheid van de algehele uitrol kan belemmeren.	Zeer geschikt voor realisatiefase (uitrol en inbedding). Dit model past bij de aanleg en beheer van de Hardware/Infrastructuur (standaard werk).
Publiek-Private Samenwerking (PPS)		Ten eerste is de aanleg van de kabels en *interrogators* geen innovatief werk en past het beter bij reguliere aanbesteding als *business as usual*. Ten tweede is de investering in een nationaal netwerk (tientallen miljoenen euro's) te fors om door de markt via datalevering terug te verdienen; dit zou de data "extreem duur" maken. Ten slotte leidt het tot een groot risico op vendor lock-in en een monopoliepositie, wat onwenselijk is omdat de overheid de regie en het eigendom over de kerntaak (waterveiligheid) wil behouden.	
Markt ontwikkelt en overheid koopt	Een voordeel is dat directe publieke investeringen worden vermeden	Het grootste nadeel is de forse investering (tientallen miljoenen), die de markt zou moeten terugverdienen. Dit maakt de datadiensten "extreem duur" via abonnementen. Daarnaast leidt dit tot monopolie en vendor lock-in, aangezien de overheid de enige klant is. De overheid verliest de regie over de *asset* en de waterveiligheid	Het model 'Markt ontwikkelt, overheid neemt af' is niet geschikt voor de fysieke infrastructuur. De aanleg van de infrastructuur is geen innovatief aspect en zou moeten worden aangestuurd als 'Overheid Betaalt' (*business as usual*) om regie en betaalbaarheid te garanderen

Tabel 12 Voor- en nadelen organisatievormen voor projectonderdeel datadiensten.

Datadiensten	Voordelen	Nadelen	Weging
Overheid betaalt (Opdrachtgever) Alle fasen	Door de infrastructuur los te koppelen, kan de overheid de markt uitdagen om te concurreren op innovatie in data-analyse.	De overheid moet voldoende interne kennis hebben om als professionele opdrachtgever de innovatieve diensten goed aan te besteden.	Dit model is geschikt voor de aansturing van innovatieve aanbestedingen (BSIK/Prijsvraag) voor diensten, mits de hardware al publiek bezit is.
Publiek-Private Samenwerking (PPS) Alleen de Ontwikkeling & PoC	De markt is bereid om kennis en geld in te brengen in de vroege, risicovolle fasen, mits er een duidelijke 'worst' (zekerheid op omzet in de uitrolfase) in het vooruitzicht is. Dit maakt risicodeling mogelijk (vaak 50/50 in de risicovolle beginfase). Een funnel-aanpak (selectieproces) of innovatieve aanbesteding geeft zekerheid aan vroege investeerders om kans te maken op de Realisatiefase.	Zonder een geborgde afname ('worst') zal de markt niet gratis kennis inbrengen of investeren ("daar trapt geen ondernemer in"). Er moet nauwkeurig toezicht zijn op het eigenaarschap van data om te voorkomen dat commerciële belangen kennisdeling belemmeren.	Essentieel voor Ontwikkelfase en Proof of Concept. Dit model past bij de innovatieve/risicovolle onderdelen: de data-analyse en het algoritme-ontwikkeling.
Markt ontwikkelt en overheid koopt Alleen de realisatiefase	Dit model stelt de overheid in staat om 'Data als een Dienst' in te kopen (abonnementen). De markt zorgt voor continue doorontwikkeling van de algoritmen en diensten.	De investering in de infrastructuur is veel te fors (tientallen miljoenen euro's) om via abonnementen terug te verdienen; dit zou de data extreem duur maken. Dit model leidt snel tot monopolie en *vendor lock-in*. De overheid wil de kerntaak waterveiligheid in eigen beheer houden.	Niet geschikt voor Hardware/Infrastructuur. Beperkt inzetbaar voor datadiensten in de realisatiefase, mits de overheid volledige regie houdt over de ruwe data.

5.3 Onderscheid tussen de infrastructuur en de datadiensten

Omdat het in voorliggend plan een activiteit in de keten van activiteiten voor hoogwaterbescherming betreft, is regie door de overheid van belang. Tevens moet vendor lock-in worden voorkomen. De meest passende organisatievorm kan verschillen per projectfase en voor de infrastructuur en de datadiensten. Daarom wordt voorgesteld om de fysieke infrastructuur en de datadiensten in dit project te onderscheiden.

De aanleg van de glasvezelkabel in de dijk en de aanschaf van de *interrogators* (de apparaten die het licht in de kabel sturen) is technisch gezien geen innovatief werk. Dit zijn uniforme *assets* die onder het model 'Overheid Betaalt' gerealiseerd moeten worden. Ze moeten worden behandeld als uniforme, publieke *assets*. Dit maakt de aanleg, die een forse investering van tientallen miljoenen euro's vereist, mogelijk via reguliere aanbestedingen ("*business as usual*"). Door de infrastructuur te standaardiseren (één type kabel en

koppelvlak), behoudt de overheid de controle over de basis, vergelijkbaar met peilbuizen. Ook is het essentieel om te garanderen dat de ruwe data eigendom wordt en blijft van de dijkbeheerder, en dat er een open data-architectuur wordt gehanteerd. Door de infrastructuur en data-architectuur te standaardiseren (gebaseerd op Europese standaarden), creëert de overheid een open platform waar verschillende private partijen hun eigen analyseapparatuur en software op kunnen aansluiten.

De datadiensten (analyse, algoritmen, patroonherkenning) vormen de echte innovatie. De innovatie zit in de datadiensten (de algoritmen die bevergraverij, scheuren of verzakkingen detecteren, en de analyses voor patroonherkenning). Dit is bij uitstek het domein waar private partijen snelheid en ontwikkeling kunnen tonen, mits zij de kans krijgen hier geld mee te verdienen. Door deze diensten los aan te besteden via bijvoorbeeld een 'funnel-aanpak' of innovatieve aanbesteding, kan de overheid de markt uitdagen tot snelle ontwikkeling en concurrentie. Omdat de basisinfrastructuur een open data-architectuur heeft, kunnen meerdere partijen hun *interrogator units* en diensten aansluiten, wat afhankelijkheid van één leverancier uitsluit en ruimte biedt voor onverwachte toekomstige toepassingen.

De scheiding van de infrastructuur en de diensten is de meest effectieve manier om vendor lock-in te voorkomen en de regie over de data bij de dijkbeheerder te garanderen.

Analogie

Het organiseren van dit dijkmonitoringsproject met glasvezelkabel is als het aanleggen van een nieuw, gestandaardiseerd spoornetwerk (de kabelinfrastructuur, betaald door de overheid als publiek bezit). Vervolgens worden verschillende, concurrerende treinmaatschappijen (de data-analysepartijen) uitgenodigd om hun slimste treinen (algoritmen en diensten) op dit spoor te laten rijden. De overheid garandeert zo de basis, terwijl de markt concurreert op snelheid, efficiëntie en extra functies (beverdetectie, scheurdetectie, etc.), waarbij de data-opbrengst bij de spoorbeheerder blijft.

5.4 Overige belangrijke aspecten voor een succesvolle organisatie vanuit de overheid

Voor een effectieve inrichting van de organisatievormen moeten de volgende aspecten geborgd zijn, in lijn met de genoemde 'stuurknoppen' in Bijlage 3:

- Eigenaarschap data en kennis: De ruwe data en kerninformatie moeten altijd eigendom zijn en blijven van de dijkbeheerder/waterschap/Rijkswaterstaat.
- Aansturing via fasen: Gebruikmaken van innovatieve aanbestedingsvormen (zoals de 'funnel-aanpak' of BSIK-model) om een selectie van partijen door de verschillende fases te loodsen en continuïteit te bieden.
- Regievoering: De overheid (waterschappen en Rijkswaterstaat) moet de regie voeren over de basisinfrastructuur en de innovatieve aanbesteding. De overheid is eigenaar van de gerealiseerde infrastructuur (fibre optics).

- Koppeling zorgplicht: Het project moet de betrouwbaarheid van het toezicht vergroten door continue monitoring van elke meter dijk, wat direct aansluit bij de zorgplicht van de dijkbeheerders.

5.5 Voorwaarden voor het uitdagen van de markt

Voor de markt moet er een duidelijke, redelijk zekere kans op omzet (de 'stip op de horizon') in de uitrolfase zijn om vroege investeringen te doen in de ontwikkelingsfase. Daarom moet de overheid de onzekerheid over de toekomstige afname wegnemen door de volgende voorwaarden te scheppen:

1. Hanteer een funnel-aanpak: De samenwerking in de Ontwikkeling- en Proof of Concept-fase moet via een innovatieve aanbesteding (zoals een BSIK-model of designwedstrijd) worden georganiseerd. Dit garandeert dat partijen die in de vroege fase mee-investeren (vaak 50/50 met de overheid) en hun kennis inbrengen, een reële en voorgesorteerde kans hebben om het werk in de Realisatiefase te verkrijgen.
2. Biedt omzetzekerheid: De overheid moet een duidelijke stip op de horizon zetten door te garanderen dat, als de ontwikkeling succesvol is, er in de realisatiefase een concrete afnamebereidheid is en voldoende omzet klaarligt voor investerende partijen. (NB. ‘voldoende omzet’ moet relatief gezien worden ten opzichte van de markt-investeringen)
3. Borg Open-Data-Architectuur: De overheid moet eisen dat er wordt toegewerkt naar een open datastructuur. Dit betekent dat de ruwe data bij de publieke partijen ligt en dat de kabel op een gestandaardiseerd koppelvlak wordt uitgelezen. Dit zorgt ervoor dat andere aanbieders of kennisinstellingen (zoals universiteiten) de data kunnen gebruiken voor nieuwe, nog onbekende toepassingen (bijvoorbeeld monitoring van seizoensbewegingen van de dijk of zelfs defensietoepassingen).
4. Vergoed risico: Hoe groter het risico voor de markt in de beginfase, hoe meer publiek geld de overheid moet inzetten. Indien de overheid geen zekerheid kan bieden op toekomstige afname (punt 2), moet zij de ontwikkelingskosten van de markt (nagenoeg) volledig betalen, omdat de private partij anders geen reden heeft om mee te werken.

6 Uitwerking fasering, organisatie en planning

6.1 Samenvatting specifieke uitgangspunten voor de planning

- De start van het project wordt gemarkeerd met voorliggend plan van aanpak: 1 januari 2026.
- Er worden daarna nog 3 maanden gereserveerd voor het maken van de daadwerkelijke start van het project, zodat er draagvalk bij de betrokken overheden kan worden verworven en kwartier kan worden gemaakt voor de startfase.
- Er zijn daarna geen beperkingen voor budget en capaciteit. NB zouden die er wel zijn dan levert dat vertraging op ten opzichte van de planning in dit document.
- Voor een Proof of Concept wordt uitgegaan van inrichten in 2027 en meten in 2028. Dat is ingegeven door de mogelijkheid om de locatie Paddenpol[1] te gebruiken.

6.2 Fasering en projectonderdelen[2]

De gebruikelijke fasering voor innovatieve projecten in een Ontwikkelingsfase, een Proof of Conceptfase en een Uitrolfase (zie paragraaf 1.4) kan op hoofdlijnen worden gevolgd. Er wordt voorgesteld om de Uitrolfase in 2 delen op te knippen: een voorbereiding en een uitvoeringsfase. Dat is vooral nodig omdat er ook in de voorbereiding naar de uitrol nog belangrijke keuzes te maken zijn over de meetconfiguratie, en belangrijk voorwaarden in te vullen zijn zoals vergunningverlening. Het project wordt daarmee in 4 fasen opgezet.

Fase 1:	Ontwikkeling hardware en op gang brengen datadiensten
Fase 2:	PoC hardware en datadiensten
Fase 3:	Voorbereiding uitrol: configuratie, logistiek en vergunningen
Fase 4:	Uitrol: installatie, inregelen, gebruik en verdere ontwikkeling datadiensten

Naast deze fasering worden er go-no go momenten voorzien om het project te kunnen beheersen. Go-no go momenten zijn er in de eerste plaats om een project te kunnen afbreken (vanuit project-directieniveau), maar het zijn ook richtmomenten om naartoe te werken (voor de projectorganisatie), en om bij ongewenste ontwikkeling bij te sturen. De

[1] De dijk bij Paddenpol (Wijhe) wordt verlegd in het kader van de dijkversterking Zwolle-Olst. Er is een beperkte tijd dat de dijk bij Paddenpol kan worden gebruikt voor veldexperimenten. De mogelijkheden hiertoe moeten nader worden bepaald in overleg met waterschap Drents Overijsselse Delta.

[2] Voorliggende opzet van de fasering is mede gebaseerd op de technische stand van zaken in Hoofdstuk 2 en op resultaten van de interviews met CONEXYS (Chris Karman, zie Bijlage 3), met ProRail (Cees Jan Mas en Joost van 't Schip, zie Bijlage 4), met Deltares (Pieter Doornenbal en Roeland Nieboer, zie Bijlage 5), en met TU Delft (Juan Pablo Aguilar-López, zie Bijlage 6).

volgende momenten worden voorzien, die gemarkeerd worden door het afronden of opstarten van een concrete actie:

Go-no go moment 1:	Keuze voor een locatie voor de Proof of Concept (PoC)
Go-no go moment 2:	Samenwerkingsovereenkomst PoC betrokken overheden (overgang Fase 1 - Fase 2)
Go-no go moment 3:	Principe keuze opschalen van Proof of Concept naar grotere dijklengten (pre Fase 3)
Go-no go moment 4:	Samenwerkingsovereenkomst Voorbereiding uitrol betrokken overheden (overgang Fase 2 - Fase 3)
Go-no go moment 5:	Start met de uitrol – opdoen ervaring met opschalen uitvoering en datadiensten (Fase 3)
Go-no go moment 6:	Samenwerkingsovereenkomst Uitrol betrokken overheden Daadwerkelijke doorstart van de uitrol (overgang Fase 3 - Fase 4)

Per fase worden er een drietal onderdelen onderscheiden, die een verschillend karakter hebben. In Hoofdstuk 5 is al aangegeven dat hardware en datadiensten beter kunnen worden gescheiden. Daarnaast is ook de samenwerking en het management van de organisatie een belangrijk onderdeel in een multi-party project zoals het onderhavige project beoogd te zijn. Hieronder worden ze toegelicht en verder onderverdeeld:

Onderdeel A: Samenwerking en organisatie. Dit onderdeel betreft vooral het betrekken van en de samenwerking tussen de betrokken overheden, waaronder het zorgen voor een gezamenlijke monitoringsdoelstelling. In dit onderdeel wordt voor elke fase een passende organisatievorm gekozen voor de te leveren diensten in het veld en met verkregen data. Het proces dat moet leiden tot een consortium in de andere onderdelen wordt begeleid. De doelstellingen en plannen van elke fase worden geconcretiseerd, en de benodigde besluiten op basis van de voortgang worden voorbereid. Het is feitelijk meer programmamanagement dan projectmanagement omdat er nog veel moet worden uitgezocht en de scope pas gedurende het project helderder wordt. In dit onderdeel worden daarmee onderscheiden:

- Organisatie en financiën
- Scope- en planontwikkeling
- Raming en MKBA
- Vergunningen
- Evaluatie en go-no-go momenten

Onderdeel B: Inrichting en installatie hardware. De waterkeringbeheerder zal de glasvezelkabel in eigendom moeten hebben omdat die wordt aangebracht in de waterkering. De interrogators zijn daaraan verbonden. In dit onderdeel wordt de markt aangestuurd door de overheid. In dit onderdeel wordt de

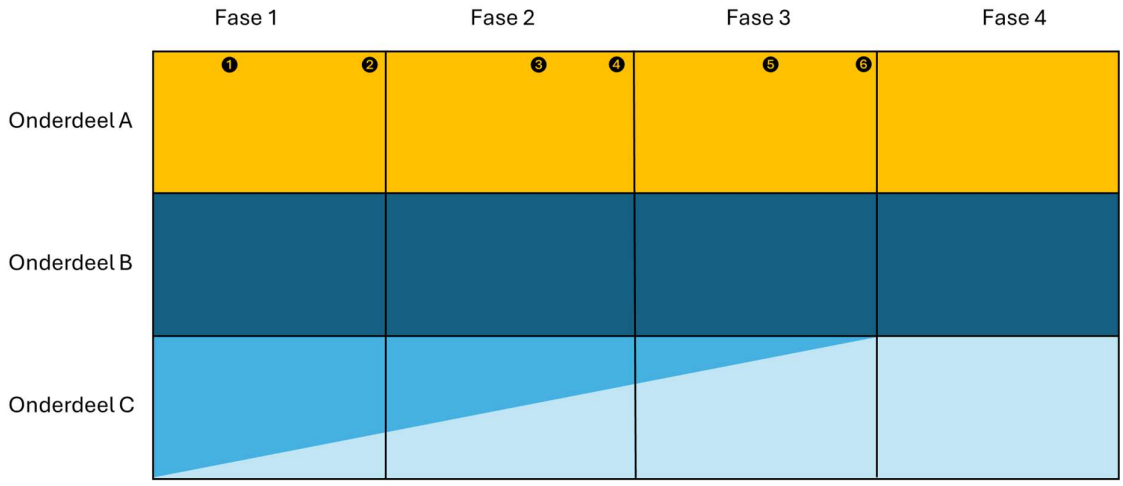
meetconfiguratie ontwikkeld en getest, alsmede de datastandaard en de logistiek die rond het gebruik nodig is. In dit onderdeel worden daarmee onderscheiden:

- Configuratie
- Lab en veld tests
- Datastandaard
- Logistiek en dataopslag

Onderdeel C: Datadiensten. Gegeven de beschikbaarheid van de hardware zullen datadiensten door de markt kunnen worden aangeboden, en door de overheid afgenomen. Dit onderdeel betreft daarmee vooral de activiteiten van de markt voor de ontwikkeling van de datadiensten, en het gebruik ervan. Het gaat om data-processing en de identificatie van graverij, en het verstrekken van tijdige informatie aan de waterkeringbeheerder. In dit onderdeel worden daarmee onderscheiden:

- Graverij-identificatie en signaalanalyse
- Lab en veld tests
- Data-processing en datavolume
- Gebruik

Mede gebaseerd op de bevindingen van Hoofdstuk 5 ziet het project er (sterk geschematiseerd) uit als geschetst in Figuur 7. Onderdeel A is het projectmanagement en dat moet door de overheid worden uitgevoerd, of ingehuurd (Oranje). Alle keuzemomenten liggen ook in dit onderdeel. Onderdeel B betreft de aanleg van de infrastructuur en de hardware. Dit leent zich niet voor een PPS constructie of een nog grotere marktverantwoordelijkheid (Donkerblauw). Onderdeel C betreft de datadiensten en die lenen zich wel voor een steeds grotere verantwoordelijkheid, waar de markt zelf ontwikkelingen doet en diensten aanbiedt. In het begin zal de overheid dat nog moeten stimuleren door risicodragend in een PPS vorm mee te doen (Middenblauw), maar op enig moment kan de markt de ontwikkelingen zelf dragen en de diensten in een concurrentievorm aanbieden (Lichtblauw).



Figuur 7 Geschematiseerde weergave van de fasering en organisatie van het project. Oranje: voornamelijk overheid; Donkerblauw: voornamelijk markt onder regie overheid; Middenblauw: PPS; Lichtblauw: Markt DaaS.

In het volgende worden achtereenvolgens voor alle fasen deze drie onderdelen behandeld. De eerste fase is verder uitgewerkt dan de navolgende fasen.

6.2.1 Fase 1: Ontwikkeling hardware en op gang brengen datadiensten

In Fase1 vinden de verkennende ontwikkelingen plaats die nodig zijn ter voorbereiding op de PoC.

In onderdeel A (Samenwerking en organisatie) moet er in deze fase vooral worden ingezet op het verkrijgen van draagvlak en bijdrage door waterschappen en het Rijk, op het creëren van de voorwaarden waarmee de datadiensten in gezamenlijkheid met de markt op gang te brengen.

Tabel 13 Activiteiten Samenwerking en organisatie in Fase 1

Fase 1 Activiteiten Samenwerking en organisatie	Omschrijving
Organisatie en financiën	Dit is het praktische deel van projectmanagement, wat tenminste omvat: • Verwerven en behouden draagvlak overheidspartners • Projectsecretariaat • Communicatie en informatievoorziening • Projectbeheersing: voorgangsrapportages / beheersmaatr. • Contractmanagement opdrachtverleningen aan de markt • Verkennen voorwaarden PPS constructies datadiensten en opzetten wenkend perspectief markt, zie paragraaf 5.5
Scope- en planontwikkeling	In een project waarvan de ontwikkelingscomponent nog hoog is moeten scope en plannen meer als een programma worden behandeld, en continu op de agenda blijven. Dit omvat tenminste: • Masterplan (voorliggend document, wordt bij voorkeur met regelmaat actueel gehouden / bijgewerkt) • Concretiseren van de monitoringsdoelstelling (tbv het verder detailleren van de configuratie, zie Tabel 14 hieronder) • Detailplannen voor uit te besteden activiteiten
Raming en MKBA	In een project waarvan de ontwikkelingscomponent nog hoog is moet de begroting meer als een programmabegroting worden behandeld. Voor de infrastructuur moet bij de gangbare ramingssystematiek worden aangesloten: • SSK ramingen infrastructuur tbv MKBA • Globale MKBA tbv beslismoment 3
Vergunningen	Voor de activiteiten in de waterkering moet (net als voor activiteiten door derden) vergunning worden verstrekt door de beheerder: • Voorbereiden aanvraag vergunningen • (indien relevant) toestemming landeigenaren • KLIC-melding • Nagaan milieu- en seizoensbeperkingen (rekening houden met het gesloten seizoen of broedseizoen) NB. Vergunningverlening en toestemming moet al worden voorbereid voor de PoC-locatie tbv go-no-go moment 1
Evaluatie en go-no-go momenten	De go-no-go momenten moeten worden voorbereid: • Opstellen beslisdocumenten

In Onderdeel B (Inrichting en installatie hardware) gaat het in deze fase vooral om het invullen van een aantal kennisleemten en praktische aspecten die voorwaardelijk zijn om in Fase 2 een Proof of Concept te kunnen uitvoeren.

Tabel 14 Activiteiten Inrichting en installatie hardware in Fase 1

Fase 1 Activiteiten Inrichting&installatie hardware	Omschrijving
Configuratie	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het invullen van kennisvragen ter voorbereiding op de PoC in fase 2: • Het inrichten van de configuratie voor de PoC zodat aan de monitoringsdoelstelling wordt voldaan • Het inrichten van de multisensor-aanpak voor de 1e projectfasen. Zie verder de lijst met aandachtspunten aan het einde van Hoofdstuk 3.
Lab en veld tests	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het invullen van praktische vragen rond kabelinstallatie en fysieke koppeling: • Het testen van de koppeling met de ondergrond (cruciaal voor nauwkeurigheid, vooral bij DAS) • Het kiezen van een diepte en positionering van aanleg (mbt invloed van buitenaf bij ondiepe kabels) • Het checken op schade aan dijklichaam (om het risico beter te kunnen inschatten en mitigeren van het ontstaan van holle ruimtes, scheurvorming, en van beïnvloeding van de freatische lijn door aanleg)
Datastandaard	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het invullen van de voorwaarden voor een eerlijk speelveld voor datadiensten: • Ontwikkelen van een Open Standaard Koppelvlak Dit voorkomt vendor lock-in en zorgt maakt aansluiting van meerdere aanbieders mogelijk.
Logistiek en dataopslag	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het verkennen van mogelijkheden voor de volgende fasen • De kosten van de interrogators zijn hoog. Er moet worden gekeken naar goedkopere dedicated units, lease mogelijkheden, en zelfs het betrekken van de interrogators als onderdeel van de datadiensten. • Een concreet voorstel voor de aanschaf/lease van de interrogator voor de PoC • Een concreet voorstel voor dataopslag voor de PoC • Voorstel voor de bescherming van de apparatuur voor de PoC (droge/afsluitbare plaatsing en bescherming tegen vandalisme)

In Onderdeel C (Datadiensten) gaat het in deze fase vooral om het invullen van een aantal kennisleemten en praktische aspecten die voorwaardelijk zijn om in Fase 2 een Proof of Concept te kunnen uitvoeren.

Tabel 15 Activiteiten datadiensten in Fase 1

Fase 1 Activiteiten Datadiensten	Omschrijving
Graverij-identificatie en signaalanalyse	Het gaat in deze fase vooral om het invullen van kennisvragen ter voorbereiding op de PoC in fase 2: • Graafgeluid Isoleren: Hoe kan het graafgeluid (dat een trilling of spectrum veroorzaakt) geïsoleerd worden van ander omgevingsgeluid (filteren) ? • Hoe kan specifieke een Bever geluid worden geïsoleerd? • Kan aan het graafgeluid worden bepaald in welke stadium het graven zich bevindt (maw: in welke 'use case' het zich bevindt).
Lab en veld tests	In deze fase worden een aantal lab en veld tests uitgevoerd ter voorbereiding op de PoC in Fase 2: • Omgevingsinvloeden: afwijkende meetwaarden moeten kunnen worden verklaard door relevante omgevingsinvloeden (weer, maaien, vandalisme) die in een logboek moeten worden bijgehouden. NB. Delfland heeft al een kabel liggen in een natte veendijk (pers. comm. R. Stellingwerff). • Het bepalen van de afstand van graafactiviteiten tot de kabel waaronder nog kan worden onderscheiden. Maw: Hoeveel kabels zijn er nodig in een doorsnede?
Data-processing en datavolume	Het gaat in deze fase vooral om het invullen van oplossingen die kunnen worden uitgetest tijdens de PoC in fase 2: • Het vinden van een oplossing voor de grote datavolumes DAS, door hoogfrequente trillingen en lange afstanden. Bv: real-time processing in combinatie met edge-computing (data zo dicht mogelijk bij de bron verwerken) om te voorkomen dat ruwe data (onnodig) bewaard hoeft te worden • Kritieke Tijdsintervallen: De vraag of meten op specifieke kritieke tijdsintervallen (bijvoorbeeld alleen bij 'use case' hoog water) volstaat om het datavolume te beheersen. Dit vereist het analyseren van demogelijkheden voor verschillende use cases. • Verwerkingsmethode: Het ontwikkelen van een verwerkingsmethode om effectief van ruwe data naar detectie te gaan.
Gebruik	Het gaat in deze fase vooral om het invullen van oplossingen die kunnen worden uitgetest tijdens de PoC in fase 2: • Alarm/Anomaliedetectie: Welke informatie moet uit de data gehaald worden om een alarm te genereren, dat er op een bepaalde positie langs de kabel een anomalie is gedetecteerd in de dijk? • Tijdige Analyse: Snelle analyses zijn nodig. Er moet een oplossing worden gezocht voor tijdrovende databewerking en dataverwerking. Dit moet geautomatiseerd worden om vertraging te voorkomen, vooral tijdens een calamiteit. NB. Voor deze analyses zijn referentiedata van essentieel belang. • Tijdig Ingrijpen: De metingen moeten inzicht verschaffen om tijdig te kunnen ingrijpen zodra men exact weet waar langs het spoor of de dijk de graverij heeft plaatsgevonden. • Vertaalslag naar Beheer voor alle 'use cases': Er is kennis nodig over hoe gegevens geïnterpreteerd moeten/kunnen worden en hoe daaraan beheerprocessen te koppelen

6.2.2 Proof of Concept hardware en datadiensten

De fase waarin de PoC wordt uitgevoerd is van groot belang, omdat het een kantelpunt kan zijn voor de keuze om glasvezel aan te leggen, en voor de werkwijze waarop de uitrol wordt aangepakt. Deze fase betreft het experiment zelf en alle organisatorische en datadiensten die nodig zijn om de keuzen voor het vervolg te kunnen maken.

In onderdeel A (Samenwerking en organisatie) moet er in deze fase vooral worden ingezet op de uitvoering van de PoC en het voorbereiden van de besluitvorming voor de volgende fase waarin de uitrol wordt voorbereid. Daartoe is het versterken van draagvlak en bijdrage door waterschappen en het Rijk nodig, en het tijdens de PoC uittesten van de voorwaarden en werkwijze waarmee de datadiensten in gezamenlijkheid met de markt op gang kunnen komen.

Tabel 16 Activiteiten Samenwerking en organisatie in Fase 2

Fase 2 Activiteiten Samenwerking en organisatie	Omschrijving
Organisatie en financiën	Dit is het praktische deel van projectmanagement, wat tenminste omvat: • Verwerven en behouden draagvlak overheidspartners • Projectsecretariaat • Communicatie en informatievoorziening • Projectbeheersing: voorgangsrapportages / beheersmaatr. • Contractmanagement opdrachtverleningen aan de markt • Invullen voorwaarden PPS constructies datadiensten
Scope- en planontwikkeling	In een project waarvan de ontwikkelingscomponent nog hoog is moeten scope en plannen meer als een programma worden behandeld, en continu op de agenda blijven. Dit omvat tenminste: • Masterplan (voorliggend document, wordt bij voorkeur met regelmaat actueel gehouden / bijgewerkt) • Detailplannen voor uit te besteden activiteiten
Raming en MKBA	Voor de infrastructuur moet bij de gangbare ramingssystematiek worden aangesloten: • SSK ramingen infrastructuur PoC
Vergunningen	Hier worden geen activiteiten verwacht
Evaluatie en go-no-go momenten	De go-no-go momenten moeten worden voorbereid: • Opstellen beslisdocumenten

In Onderdeel B (Inrichting en installatie hardware) gaat het in deze fase vooral om een Proof of Concept uit te voeren, en verbeteringen aan het meetconcept te vinden en te testen.

Tabel 17 Activiteiten Inrichting en installatie hardware in Fase 2

Fase 2 Activiteiten Inrichting&installatie hardware	Omschrijving
Configuratie	Hier worden geen activiteiten verwacht, configuratie is deel van Fase 1
Lab en veld tests	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het daadwerkelijk uitvoeren van de PoC, en het vinden van oplossingen voor de daarbij optredende praktische knelpunten: • Uitvoeren van de PoC • Oplossen knelpunten
Datastandaard	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het testen en bijstellen van het koppelvlak voor datadiensten: • Testen en bijstellen een Open Standaard Koppelvlak
Logistiek en dataopslag	Het gaat hierbij in deze fase vooral om het testen van de voorstellen uit Fase 1: • Aanschaf/lease en aansluiten/inregelen van de interrogator voor de PoC • Testen van de gekozen werkwijze van opslag van data • bescherming van de apparatuur voor de PoC (droge / afsluitbare plaatsing en bescherming tegen vandalisme)

In Onderdeel C (Datadiensten) gaat het in deze fase vooral om het inhoudelijk uittesten van de datadiensten in een Proof of Concept.

Tabel 18 Activiteiten datadiensten in Fase 2

Fase 1 Activiteiten Datadiensten	Omschrijving
Graverij-identificatie en signaalanalyse	Het gaat in deze fase vooral om verwerken van informatie van de PoC in fase 2, en het genereren van verbetering: • Graafgeluid Isoleren: Hoe kan het graafgeluid (dat een trilling of spectrum veroorzaakt) geïsoleerd worden van ander omgevingsgeluid (filteren)? • Hoe kan specifieke een Bever geluid worden geïsoleerd? • Kan aan het graafgeluid worden bepaald in welke stadium het graven zich bevindt (maw: in welke 'use case' het zich bevindt).
Lab en veld tests	In deze fase worden tests uitgevoerd als onderdeel van de PoC in Fase 2: • Omgevingsinvloeden: afwijkende meetwaarden moeten kunnen worden verklaard door relevante omgevingsinvloeden (weer, maaien, vandalisme) die in een logboek moeten worden bijgehouden • Het bepalen van de afstand van graafactiviteiten tot de kabel waaronder nog kan worden onderscheiden. Maw: Hoeveel kabels zijn er nodig in een doorsnede?
Data-processing en datavolume	Het gaat in deze fase vooral om het invullen van oplossingen voor problemen die zich voordoen tijdens de test in de PoC in fase 2: • Het vinden van een oplossing voor de grote datavolumes DAS, door hoogfrequente trillingen en lange afstanden. Bv: real-time processing in combinatie met edge computing (data zo dicht mogelijk bij de bron verwerken) om te voorkomen dat ruwe data bewaard hoeft te worden • Kritieke Tijdsintervallen: De vraag of meten op specifieke kritieke tijdsintervallen (bijvoorbeeld alleen bij 'use case'

	hoog water) volstaat om het datavolume te beheersen. Dit vereist het analyseren van demogelijkheden voor verschillende use cases. • Verwerkingsmethode: Het ontwikkelen van een verwerkingsmethode om effectief van ruwe data naar detectie te gaan.
Gebruik	Het gaat in deze fase vooral om het uittesten (van eerder gegenereerde oplossingen) tijdens de PoC in fase 2: • Alarm/Anomaliedetectie: Welke informatie moet uit de data gehaald worden om een alarm te genereren, dat er op een bepaalde positie langs de kabel een anomalie is gedetecteerd in de dijk? • Tijdige Analyse: Snelle analyses zijn nodig. Er moet een oplossing worden gezocht voor tijdrovende databewerking en dataverwerking. Dit moet geautomatiseerd worden om vertraging te voorkomen, vooral tijdens een calamiteit • Tijdig Ingrijpen: De metingen moeten inzicht verschaffen om tijdig te kunnen ingrijpen zodra men exact weet waar langs het spoor of de dijk de graverij heeft plaatsgevonden. • Vertaalslag naar Beheer voor alle 'use cases': Er is kennis nodig over hoe gegevens geïnterpreteerd moeten/kunnen worden en hoe daaraan beheerprocessen te koppelen

6.2.3 Voorbereiding uitrol: configuratie, logistiek en vergunning

Fase 3 omvat alle voorbereidingen voor een verdere uitrol, en de belangrijke keuze van de projectpartners om daadwerkelijk met de uitrol te starten. Dit is een belangrijke keuze omdat vanaf dat moment de benodigde budgetten fors zullen zijn. De inhoudelijke voorbereidingen hangen af van de bevindingen in Fase 2 (PoC) en worden hier niet verder ingevuld. Alleen onderdeel A wordt hier nader gespecificeerd. Voor de andere onderdelen worden voor elke activiteit werkzaamheden verwacht.

Tabel 19 Activiteiten Samenwerking en organisatie in Fase 3.

Fase 3 Activiteiten Samenwerking en organisatie	Omschrijving
Organisatie en financiën	Dit is het praktische deel van projectmanagement, wat tenminste omvat: • Verwerven en behouden draagvlak overheidspartners • Projectsecretariaat • Communicatie en informatievoorziening • Projectbeheersing: voorgangsrapportages / beheersmaatr. • Contractmanagement opdrachtverleningen aan de markt • Invullen voorwaarden PPS constructies datadiensten
Scope- en planontwikkeling	In een project waarvan de ontwikkelingscomponent nog hoog is moeten scope en plannen meer als een programma worden behandeld, en continu op de agenda blijven. Dit omvat tenminste: • Masterplan (voorliggend document, wordt bij voorkeur met regelmaat actueel gehouden / bijgewerkt) • Concretiseren van de monitoringsdoelstelling voor de uitrol (tbv het verder detailleren van de configuratie) • Detailplannen voor uit te besteden activiteiten
Raming en MKBA	Voor de infrastructuur moet bij de gangbare ramingssystematiek worden aangesloten: • SSK ramingen infrastructuur naar aanleiding van de resultaten van de PoC

	• MKBA naar aanleiding van de resultaten van de PoC en (eventueel) bijgestelde monitoringsdoelstellingen
Vergunningen	Voor de activiteiten in de waterkering moet (net als voor activiteiten door derden) vergunning worden verstrekt door de beheerder: • Voorbereiden aanvraag vergunningen • (indien relevant) toestemming landeigenaren • KLIC-melding • Nagaan milieu- en seizoen beperkingen (rekening houden met het gesloten seizoen of broedseizoen)
Evaluatie en go-no-go momenten	De go-no-go momenten moeten worden voorbereid: • Opstellen beslisdocumenten

6.2.4 Uitrol: installatie, inregelen, gebruik en verdere ontwikkeling datadiensten

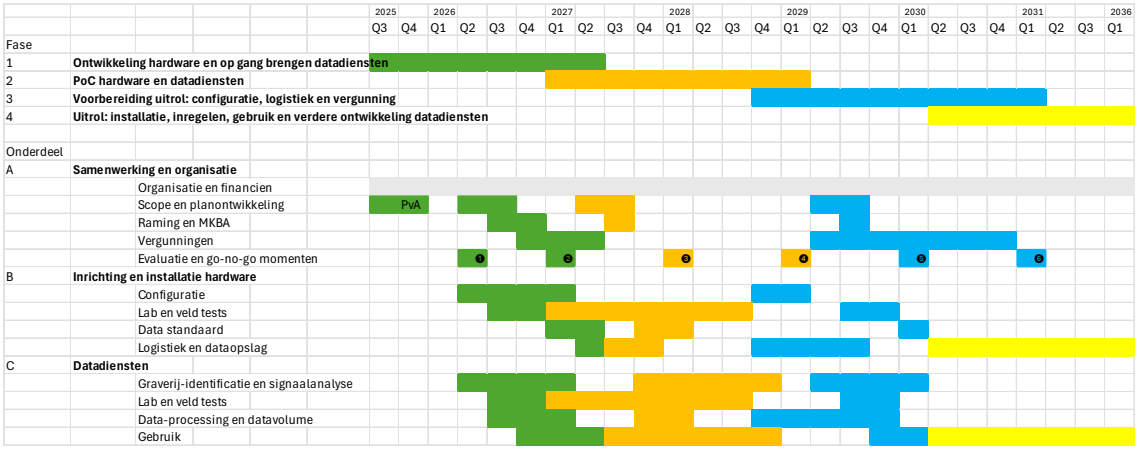
Dit is de laatste fase van het project, waarbij er steeds meer dijken worden voorzien van glasvezelkabel, en ervaringen kunnen worden gebruikt bij de aanleg voor de navolgende dijktrajecten. Alleen onderdeel A wordt hier nader gespecificeerd. Voor de andere onderdelen worden niet voor elke activiteit werkzaamheden verwacht.

Tabel 20 Activiteiten Samenwerking en organisatie in Fase 4.

Fase 4 Activiteiten Samenwerking en organisatie	Omschrijving
Organisatie en financiën	Dit is het praktische deel van projectmanagement, wat tenminste omvat: • Verwerven en behouden draagvlak overheidspartners • Projectsecretariaat • Communicatie en informatievoorziening • Projectbeheersing: voorgangsrapportages / beheersmaatr. • Contractmanagement opdrachtverleningen aan de markt • Invullen voorwaarden PPS constructies datadiensten
Scope- en planontwikkeling	Hier worden geen generieke activiteiten meer verwacht, allee de site specifieke: • Plan voorbereiding aanleg
Raming en MKBA	Voor de infrastructuur moet bij de gangbare ramingssystematiek worden aangesloten: • SSK ramingen infrastructuur specifieke sites
Vergunningen	Voor de activiteiten in de waterkering moet (net als voor activiteiten door derden) vergunning worden verstrekt door de beheerder: • Voorbereiden aanvraag vergunningen • (indien relevant) toestemming landeigenaren • KLIC-melding • Nagaan milieu- en seizoensbeperkingen (rekening houden met het gesloten seizoen of broedseizoen)
Evaluatie en go-no-go momenten	Hier worden geen activiteiten meer verwacht

6.3 Planning

Voor de activiteiten per fase is een globale inschatting gemaakt voor de inzet en onderlinge afhankelijkheid, verwerkt in een tijdschema per fase en per onderdeel, zie Figuur 8. Als tijdseenheid in het planningsschema is een kwartaal genomen. Een verdere detaillering is op dit moment nog niet mogelijk en ook niet zinvol. Bij een start van het vervolg in 2026 en een PoC in 2027 en 2028 wordt een periode van 10 jaar voorzien tot volledige uitrol.



Figuur 8 Planningsschema. NB De laatste kolom is niet meer per opeenvolgend kwartaal, daar is de voorlopige einddatum opgenomen.

7 Middelen

Voor het uitvoeren van het project zijn middelen nodig in de volgende categorieën:

- Capaciteit en expertise voor diverse rollen en verantwoordelijkheden (zowel intern de projectorganisatie als externe leveranciers en expertise), en afgeleid daarvan ook doorlooptijd
- Materialen voor de hardware (dataverwerkings apparatuur, overige fysieke middelen), software voor dataverwerking (zoals licenties, tools, overige IT (cloud)diensten), en data en informatie (datasets, documentatie)
- Faciliteiten zoals testlocaties voor het lab en veld werk
- Budget

Als in een van deze categorieën de middelen ontbreken of ontoereikend zijn, dan heeft dat invloed op het gehele project. Het budget is een randvoorwaardelijk aspect. Deze wordt hier globaal uitgewerkt op basis van kentallen. BTW wordt verondersteld onderdeel te zijn van deze kentallen.

7.1 Globale project begroting

Voor de globale projectbegroting wordt uitgegaan van de volgende kentallen (prijspeil 2025), waarin veelal een praktische onder- en bovengrens is gegeven:

- Van de 3700 km primaire waterkering in Nederland wordt uitgegaan dat slechts een deel gevoelig is voor bevergraverij bij hoogwater: 1000-2000km (ca. een kwart tot de helft)
- Glasvezelkabel inclusief aanbrengen: 1- 10 €/m (bron: Tyler et al., 2022)
- Aantal kabels in de dwarsdoorsnede: 2 á 3 (interviews Deltares/TUD)
- Interrogator: 1-2 ton/stuk (interview ProRail,info RWS)
- Bereik Interrogator 10-100 km (interviews ProRail/TUD)
- Overige kosten, bv voor behuizing interrogators: wordt verondersteld onderdeel te zijn van bovenstaande kosten. Tevens wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van bestaande gebouwen.
- Voorbereiding en ontwikkeling: 10% (globaal kental)
- Projectmanagement: 10% (globaal kental)

Met behulp van deze kentallen is er een range aan te geven van de kosten:

- Ondergrens: 5 M€ (gebaseerd op de ondergrenzen van de hierboven genoemde kentallen zijn de kosten (kabel+interrogators):1000 x 2 x (1 + 100000 x (2000/100)) x 1,1 x 1,1)
- Bovengrens: 145 M€ (gebaseerd op de bovengrenzen van de hierboven genoemde kentallen zijn de kosten (kabel+interrogators):2000 x 3 x (10 + 200000 x (2000/10)) x 1,1 x 1,1)

Het is niet realistisch dat over de gehele lengte meevalt en dat daarenboven over de gehele bever-gevoelige lengte de meest gunstige omstandigheden aanwezig zijn, dus de ondergrens is te laag. Anderzijds, in de bovengrensschatting zijn wel weer erg veel slagen

om de arm genomen, in een stadium dat er nog veel moet worden uitgezocht. De bovengrens zal dus in de loop van de eerste fase naar beneden kunnen worden bijgesteld. Een voorzichtig-realistische schatting voor het project lijkt daarom eerder 40-50 M€.

7.2 Globale begroting voor de Fasen 1, 2 en 3

Een inschatting voor de begroting van Fase 1 wordt gebaseerd op de activiteiten in paragraaf 6.2.1. Daarin staan voor de onderdelen B en C samen 22 bullets genoemd met uit te zoeken punten. Met een kostprijs van gemiddeld 50 k€ per onderzoek komt dit op orde 1 M€.

Een inschatting van de begroting van Fase 2 is wat minder triviaal. Het hangt van de uitgezochte aspecten in Fase 1 af, en van de (toegankelijkheid) van de PoC locatie. Er wordt rekening gehouden met een eerste proef in 2027 en een tweede in 2028. Parallel aan het veldwerk zal er ook nog verbetering nodig zijn op de onderzochte aspecten in Fase 1. Mede op basis van eerdere veldproeven is tijdens de maanden dat er veldwerk gedaan wordt de activiteit meer intens. Als kental voor de gemiddelde inzet per kwartaal wordt 2-3 ton aangehouden, waarbij het totaal voor deze fase op orde 2 M€.

Fase 3 kenmerkt zich vooral door de voorbereiding op de uitrol. Alle activiteiten zijn er op gericht om data en uitvoeringscapaciteit op te schalen. Er is in deze fase ook veel werk voor de overheid op het gebied van vergunningverlening. Gezien de totale projectomvang wordt voor deze fase een bedrag van orde 1 M€ geraamd. Daarmee komen de totale kosten van de voorbereiding op de uitrol op orde 4 M€, 10% van de geschatte projectomvang.

7.3 Globale begroting, uitgesplitst per jaar

In Tabel 21 is een overzicht gegeven van de geschatte kosten over de looptijd van het project.

Tabel 21 Overzicht van de geschatte projectkosten per jaar (in k€)

Fase	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	Tot.
1	500	500									1000
2		800	1000	200							2000
3			100	600	300						1000
4					3000	5000	7000	7000	7000	7000	36000
Totaal	500	1300	1100	800	3300	5000	7000	7000	7000	7000	40000

8 Risico's en baten

8.1 Risico's projectuitvoering

Bij het aanleggen van glasvezelkabels in waterkeringen treden diverse technische, fysieke en organisatorische risico's op. Hieronder volgt een beknopt overzicht:

Technische en constructieve risico's

- Aantasting van de dijk: Het aanbrengen van kabels via graven of boren brengt schade toe aan de kering, wat op korte of lange termijn kan leiden tot afschuivingen of scheurvorming.
- Ontstaan van kwelpaden: Ingeval er kabels onder de dijk door naar het achterland worden gevoerd: er bestaat een risico dat er langs de kabel "preferente stroombanen" ontstaan, waardoor water gemakkelijker door de dijk dringt en interne erosie (piping) kan veroorzaken.
- Verstoring van de bodemopbouw: Het graven van sleuven in de kruin of het talud roert de grond en beschadigt de grasmat, wat de sterkte tijdelijk vermindert.

Risico's door omgeving en kwetsbaarheid

- Mechanische beschadiging: Glasvezelkabels zijn kwetsbaar en kunnen worden beschadigd door werkmaterieel tijdens bouwactiviteiten of onbedoelde aanrijding.
- Schade door natuur en mens: Kabels kunnen worden aangetast door grazend vee (zoals schapen), gravende dieren of vandalisme in de openbare ruimte.
- Kwaliteit van de installatie: Een onjuiste ruimtelijke positionering (X, Y, Z-coördinaten), incorrecte inmeting van de locatie of een gebrekkige mechanische koppeling met de grond maakt de meetdata onbetrouwbaar of onbruikbaar.

Data en interpretatie risico's

- Databeheer en analyse: De enorme hoeveelheid data (tot 1 GB per minuut bij DAS) kan de ICT-infrastructuur en de analytische capaciteit van de organisatie overbelasten.
- Gebrek aan gebeurtenissen tijdens tests: Er bestaat een risico dat er tijdens een proefperiode geen bevergraverij optreedt, waardoor het systeem niet gevalideerd kan worden.
- Interferentie en ruis: Op multifunctionele dijken veroorzaken verkeer en recreatie veel 'ruis', wat het onderscheiden van specifieke beveractiviteit bemoeilijkt.

Organisatorische en financiële risico's

- Beheerlast van 'vreemde elementen': beheerders ervaren de kabel als een extra last voor de veiligheidsbeoordeling en het onderhoud op de lange termijn.

- De aanschaf van uitleesunits (interrogators) kan als kostbaar worden ervaren (€100.000 - €200.000 per stuk), wat een obstakel kan vormen voor brede uitrol.
- Vendor lock-in: Bij gebruik van gesloten, merkgebonden systemen loopt de beheerder het risico te afhankelijk te worden van één leverancier voor zowel hardware als data-analyse.
- Continuïteit van de stroomvoorziening: Het systeem is afhankelijk van een constante energiebron; uitval van stroom betekent direct verlies van monitoring.
- Onzekerheid over handelingsperspectief: een gedetecteerd signaal de beheerder nog geen concreet actieplan.

8.2 Baten projectuitvoering

De baten van het project zijn tweeledig:

- Voorkomen van schade aan de dijk (alle use cases)
- Voorkomen van schade en slachtoffers bij dijkdoorbraken (vooral tijdens hoogwater)

8.2.1 Schade aan de dijk

Op basis van de beschikbare overzichten van kosten ten gevolge van inspectie en schade door de bever in Tabel 23 in Bijlage 8, is een eenvoudige schatting gemaakt van de kosten per bever per jaar. Er is daarbij gecorrigeerd voor het aantal waterschappen dat geen gegevens heeft toegeleverd. Vrij veel waterschappen hebben 0 ingevuld in de tabel. Deze kan worden geinterpreteerd als ‘geen kosten’ of als ‘niet bekend / niet apart bijgehouden’. Beide interpretaties zijn hier gebruikt. De kosten in de tabel zijn daartoe vergroot op basis van het aantal waterschappen (van de 21) dat geen kosten heeft opgegeven. Door de deze kosten vervolgens te delen door het aantal geschatte bevers in het betreffende jaar, worden de kosten per bever per jaar verkregen, zie Tabel 22.

Tabel 22 Schatting van de kosten per bever per jaar.

Jaar	Geschat aantal bevers	Kosten opgave door aantal waterschappen	Kosten (Bijlage 8) (€)	Kosten per bever per jaar (obv 21 waterschappen)
2019	3000	9 – 15	536.000	249 - 415
2020	3400	9 – 20	874.915	270 - 599
2021	3800	10 – 20	2.225.631	615 - 1230
2022	4350	11 – 20	1.635.689	395 - 718
2023	4900	13 – 19	1.551.089	350 - 511
2024	5450	13 – 19	2.394.544	486 - 710
Gemiddeld				**393 - 697**

Om de baten te schatten worden deze kosten vertaald naar de contante waarde van de schade. Voor deze berekening worden een aantal uitgangspunten gebruikt, die alle aan de voorzichtige kant zijn:

- Gemiddeld verwachten we dus jaarlijkse kosten per bever tussen de 400 en 700 euro, afhankelijk van de interpretatie van hoe de kostenopgave van de waterschappen. Als we in ogenschouw nemen dat bij deze schatting de kosten van RWS en ProRail nog niet zijn opgenomen, zijn deze getallen nog aan de lage kant. Hier wordt uitgegaan van 550 euro per bever per jaar
- Het aantal bevers. Om het effect van de baten niet te overschatten wordt uitgegaan dan het aantal bevers niet sneller toeneemt dan nu (500 per jaar) en niet verder doorgroeit dan tot 10000 bevers.
- dat in 50% van de gevallen tijdig kan worden ingegrepen en schade wordt voorkomen. Dit is een voorzichtige schatting omdat het systeem er juist voor is bedoelt om tijdig te kunnen ingrijpen. Als dat uiteindelijk dan niet wordt op die manier zou kunnen worden benut, zijn er andere dan economische redenen om niet tot aanleg over te gaan.

Met deze uitgangspunten zullen de zodat de baten vrijwel zeker gunstiger uitvallen: als de exponentiele groei van het aantal bevers zou doorzetten, dan zullen de potentiele baten van het aanleggen van glasvezel fors positiever zijn. En als er in meer dan 50% van de gevallen met succes kan worden ingegrepen ook.

Met een levensduur van de infrastructuur van 30 jaar en rentepercentage van 2% volgt dan een contante waarde van de schade:

- zonder verdere maatregelen: 130 M€
- met glasvezelkabel: 65 M€

8.2.2 Voorkomen van schade en slachtoffers bij dijkdoorbraken

De kans op dijkdoorbraak is voor de primaire waterkeringen genormeerd en zeer klein, maar de schade bij dijkdoorbaak is zeer groot. De risico's (kans maal gevolg, ofwel de verwachtingswaarde van de schade) is in Nederland door CPB geschat op 290 M€/jaar

Beverholen vergroten de kans op doorbraak aanzienlijk (Van Hemert, 2006). Het voorkomen dat bevers zich in de dijken vestigen voorkomt dus ook deze grotere kans op doorbraak. Het verkleint daarmee dus het risico op dijkdoorbraak. In risico-analyses voor waterveiligheid wordt vermeden schade als een baat gezien, dus ook voor de uitvoering van dit project. Een voorzichtige schatting is dat de kans op dijkdoorbraak een factor 2-10 toeneemt door bever graverij [Van Hemert, 2006; Deltares 2025, is dat rapport er al?]. De verwachtingswaarde van de schade neemt dan met dezelfde factor toe: 300-2600 M€/jaar. De contante waarde daarvan is conform de gangbare economische rekenwijzen nog veel groter, in de orde van vele Miljarden. Berekend met de ondergrens van deze marge, en met 2% rente, en met opnieuw het uitgangspunt dat slechts een deel van de waterkeringen gevoelig is voor beverschades, zou dit op 5.000 M€ uitkomen.

Evenzo wordt het aantal slachtoffers per jaar beperkt. Dat wordt hier verder niet monetair gewaardeerd, maar is wel een positief effect van een systeem voor detectie van graverij.

8.2.3 Samenvatting baten

Baten van het systeem voor detectie graverij	Contante waarde in M€
Vermindering van schade	> 65
Vermindering van overstromingsrisicos (schade)	> 5000

Literatuurlijst

CLO, 2025 Compendium voor de leefomgeving, website bezocht op 11 oktober 2025. https://www.clo.nl/indicatoren/nl106109-bever-1988-2013#:~:text=Vijf%20populaties%20in%20Nederland,(Ems)%20een%20feit%20is.

IPLO, 2025 Informatiepunt Leefomgeving, website bezocht op 11 oktober 2025. https://iplo.nl/nieuws/perspectief/leren-leven-bever/#:~:text=In%20Nederland%20leven%20naar%20schatting,in%20dijken%20of%20onder%20spoorrails.

Bertulessi, M., Bignami, D.F., Boschini, I., Brunero, M., Ferrario, M., Menduni, G., Morosi, J., Paganone, E.J. and Zambrini, F. (2022). Monitoring Strategic Hydraulic Infrastructures by Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors, Water 2022. https://doi.org/10.3390/w14020188.

Bertulessi, M., Ceccato, F., Ioli, F., Barbieri, F., Pinto, L., Simonini, P. and Menduni, G. (2025). Field Testing of a Smart Geomat Based on Fiber Optic Sensors and Sensor Fusion for Levee Monitoring, Journal of Flood risk management, https://doi.org/10.1111/jfr3.70070

Chuchro, M., Franczyk, A., Bukowska-Belniak, B. and Leśniak, A. (2017). Reducing Flood Risk using Computer System for Monitoring River Embankments. Environmental Protection and Natural Resources, DOI 10.1515 /oszn-2017-0016.

Habel, R. and Krebber, K. (2011). Fiber-Optic Sensor Applications in Civil and Geotechnical Engineering, Photonic Sensors DOI: 10.1007/s13320-011-0011-x.

Kang, W. (2023). Understanding Seepage in Levees and Exploring the Applicability of Using an Optical-Fiber Distributed Temperature System and Smoothing Technique as a Monitoring Method, Sensors 2023, 23, 4780. https://doi.org/10.3390/s23104780.

Höttges, A., Rabaiottia, C., Facchini, M. (2024). A *ground-breaking* Distributed fiber-optic Pressure Sensor for geohydraulic applications, *Procedia Structural Integrity 64 (2024) 1613–1620,*

Rabaiottia, C., Höttges, A., Facchini, M., Bohren, I. (2023). FIBRADIKE, a novel distributed fiber optic monitoring system for dikes and earth dams, The 8th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum 2022, doi:10.1088/1755-1315/1195/1/012004.

Radzicki, K., Stoliński, M. (2024) . Seepage monitoring and leaks detection along an earth dam with a multi-sensor thermal-active system, Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2024) 83:362 https://doi.org/10.1007/s10064-024-03826-3

Lin, Y., Zheng, D., Ran, C. (2025). A new method for scour monitoring based on distributed fiber optic vibration sensing. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117448

Kappelmeyer O (1957). The Use of Near Surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths. Geophys Prospect. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1957.tb01431.x

Johansson S, Sjödahl P, Mondanos M, Stork A (2023). Distributed fibre optic sensing in Swedish dams and tailing storage facilities. Hydropower Dams 2:45–49. https://www.hydropower-dams. com/articles/distributed-fibre-optic-sensing-in-swedish-dams-and-tailing-storage-facilities/

Van Hemert (2006). Gevolgen van graverij door muskusratten en beverratten voor de veiligheid van waterkeringen. BCM, dossier : A2998.01.001, registratienummer : WG-SE20060948, oktober 2006.

UvW, 2025. Gedragscode Soortenbescherming voor de Unie van Waterschappen. Bestendig beheer en onderhoud, 18 maart 2025. Aangewezen in de Omgevingsregeling op 1 april 2025.

Shi, B., Wang, B., Zhang, C., Gu, K., Ruan, Y., Li, G., Wang, Q., Wei, G., Zhang, D., Zhu, H., Cheng, G., Chen, Y., (2022). Multi-physical distributed fiber optic observation in a 3211-m-deep scientific borehole at Jiajika lithium mine, western Sichuan, https://doi.org/10.1360/TB-2021-1380.

Zhang, X., Zhu, H., Jiang, X., Broere, W. (2024). Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review, https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.008.

Li, J., Biondi, E., Heimisson, E.R., Puel, S., Zhai, Q., Zhang, S., Hjörleifsdóttir, V., Wei, X., Bird, E., Klesh, A., Kamalov, V., Gunnarsson, T., Geirsson, H., Zhan, Z. (2025). Minute-scale dynamics of recurrent dike intrusions in Iceland with fiber-optic geodesy. https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu0225

Beck, Y.L., Khan, A.A., Cunat, P., Guidoux, C., Artières, O., Mars, J., Fry, J.J. (2010) Thermal monitoring of embankment dams by fiber optics, Proc. 8th ICOLD European Club Symposium, TU Graz, pp. 444-448

Courivaud, J.R., Reverchon, B., Beck, Y.L., Perriollat, J.L., Pinettes, P. (2012). Démarche d'EDF au regard de l'utilisation des fibres optiques pour la surveillance des ouvrages hydrauliques. Validation de cette technologie lors des essais néerlandais ijkdijk d'érosion interne. CFBR.

Aguilar-López, J.P., Nöter, N., Ingrosso, I. (2024), D3.1 – Review, design and specifications of Fiber optic-based monitoring systems for flood defences, Delft University of Technology

Tyler, S.W., Selker, J.S., Van de Giesen, N., Bogaard, T., Aguilar-López, J. (2022). Distributed fiber-optic hydrogeophysics. The Groundwater Project. doi.org/10.21083/978-1-77470-031-0.

STOWA (2024). Spoorboekje implementatie dijkmonitoring – Een praktische handleiding. W.S. Zomer (BZIM), R.G.M. Nuwenhoud (BZIM), I.C. van Klaarbergen (BZIM), M. van der Meer (Fugro), M. Veendorp (Arcadis). Rapport 2024-17, ISBN 978.94.6479.059.7 .

CBP (2025). Overstromingsrisico voor Nederlandse huishoudens: financiële omvang en verdeling, Anja Deelen, Joep Tijm, Arjan Trinks, Vincent Schippers, september 2025.

Bijlagen

Bijlage 1 Samenvatting van wetenschappelijke literatuur

Fiber-Optic Sensor Applications in Civil and Geotechnical Engineering, Habel et al. (2011)

De aanleiding voor de studie was de behoefte aan nauwkeurige informatie over de integriteit en draagkracht van grote betonpalen, aangezien conventionele sensoren aan de paalkop vaak onvoldoende informatie bieden. Het doel was de ontwikkeling van Fiber-Optic Acoustic Emission (AE) sensoren om de prestatieanalyse over de gehele paallengte te verbeteren. De sensoren zijn gebaseerd op EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer). Dit is een geavanceerde glasvezeltechnologie die wordt gebruikt om micro-vervormingen en akoestische signalen in ingebedde civieltechnische constructies, zoals betonpalen, met hoge resolutie te meten

De aanpak bestond uit het uitrusten van modelpalen (met en zonder gesimuleerd defect) met EFPI-sensoren en het uitvoeren van dynamische (*low-strain* en *high-strain*) en statische belastingstests. De analyse van trillingen (dynamische tests) richtte zich op de registratie van de AE-signalen die zich als golven voortplanten na een impact op de paalkop. De EFPI-sensoren, die dynamische signalen tot honderden kilohertz kunnen registreren, maten de voortplanting en reflectie van deze golven. Tijdens de *low-strain* tests lokaliseerden de ingebedde sensoren een gesimuleerd defect nauwkeuriger dan metingen aan de paalkop.

De conclusies bevestigen dat het EFPI-systeem geschikt is voor alle drie de testmethoden. Het levert meer precieze, locatie-specifieke informatie over het draaggedrag, waardoor het aantal aannames bij draagkrachtberekeningen sterk kan worden verminderd.

Reducing Flood Risk using Computer System for Monitoring River Embankments, Chuchro et al. (2017)

De aanleiding voor dit project was de wens om de verschijnselen te onderzoeken die in waterkeringen optreden onder invloed van externe factoren, zoals stijgende waterstanden tijdens overstromingen, met als doel het beperken van overstromingsrisico's.

Het doel was het ontwikkelen van het Informatie Systeem voor het Monitoren van Rivierdijken (ISMOP) en het presenteren van een uitgebreide methode voor het beoordelen van de dijkstabiliteit en het voorspellen van falen.

De aanpak bestond uit de bouw van een grootschalige experimentele aarden dijk (150m lang) in Czernichów, Polen, met een reservoir om overstromingen te simuleren. In de dijk werden meer dan 1300 sensoren geïnstalleerd, waaronder temperatuur-, poriedruk- en verplaatsingssensoren, en 1200 meter glasvezelkabels.

De analyse maakte gebruik van zowel numerieke modellering (met FLAC 2D, een continu-model voor de impact van belasting op in de dijk optredende verschijnselen) als data-gedreven algoritmen voor tijdreeksanalyse en anomaliedetectie. Resultaten van de sensoren werden vergeleken met modellen in een *model-driven* module.

De conclusies zijn dat deze methode, gebaseerd op continue monitoring en modelvergelijking, geschikt is voor de beoordeling van nieuwe en bestaande dijken. Methode en systeem stellen in staat om abnormaal gedrag of falen te schatten, wat preventieve maatregelen mogelijk maakt.

Monitoring Strategic Hydraulic Infrastructures by Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors, Bertulessi et al. (2022)

Het doel van deze studie was het beoordelen van de prestaties van Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors (D-FOS) voor Structural Health Monitoring (SHM) op een bestaande, historische waterleidingbrug in Valle d'Aosta, Italië. De aanleiding was de noodzaak om waterinfrastructuur met een complexe geometrie, gelegen in een ruwe omgeving, continu te monitoren.

De aanpak bestond uit de installatie van een hybride SHM-systeem met ongeveer 800 meter D-FOS-kabel en twaalf traditionele Vibrating Wire (VW) extensometers. De D-FOS-spanningskabel werd met een polyurethaanlijm strak op de betonnen elementen bevestigd. Voor de analyse werden de ruwe gegevens geïnterpoleerd op een uniek tijdsinterval en werden zowel de D-FOS- als de VW-rekgegevens gecorrigeerd voor temperatuureffecten.

De conclusies laten een goede algemene overeenkomst zien tussen de rekmeetreeksen van de D-FOS en de VW-sensoren (meeste correlatiecoëfficiënten waren > 0.80). D-FOS bleek een geschikte en economische oplossing te zijn voor SHM-systemen op complexe infrastructuren. Het geeft een nauwkeurig rekprofiel langs grote delen van de constructie.

Understanding Seepage in Levees and Exploring the Applicability of Using an Optical-Fiber Distributed Temperature System and Smoothing Technique as a Monitoring Method, Kang et al. (2023)

De aanleiding voor de studie was de toenemende frequentie van overstromingen door klimaatverandering. Kwel is een primaire faaloorzaak. Het doel was het experimenteel begrijpen van het kwelmechanisme in dijken, en de toepasbaarheid evalueren van de monitoringmethode met een optische-vezel gedistribueerd temperatuursysteem (DTS), gebaseerd op Raman-verstrooid licht.

De aanpak bestond uit het bouwen van twee real-scale dijken in een gecontroleerde betonnen box en het opwekken van kwel door gecontroleerde watertoevoer. DTS-kabels (passieve methode) en 14 druksensoren werden geïnstalleerd om respectievelijk temperatuur- en drukveranderingen te meten.

De analyse richtte zich op de ruwe DTS-data, die sterke fluctuaties en invloed van externe temperatuur vertoonden. Vijf smoothing-technieken werden onderzocht om trends te verduidelijken, waarbij de *moving-average* methode, toegepast op 3-uursintervallen, het meest geschikt bleek. Kwel leidde tot een temperatuurdaling door verzadiging.

De conclusies bevestigen dat het DTS-systeem, in combinatie met geschikte dataverwerking (zoals *moving-average* smoothing), een efficiënte monitoringmethode is voor het analyseren van kwelmechanismen en dijkstabiliteit, door ruimtelijke en temporele informatie te verschaffen.

FIBRADIKE, a novel distributed fiber optic monitoring system for dikes and earth dams, Rabbaiotti et al. (2023)

De aanleiding voor de studie is de toenemende dreiging van extreme overstromingen door klimaatverandering en de noodzaak om falen, veroorzaakt door interne erosie en kwel in dijken, vroegtijdig te detecteren. Het doel was de ontwikkeling van FIBRADIKE, een nieuw Distributed Fiber-Optic (DFO) monitoringsysteem, met als kern een nieuwe gedistribueerde poriedruksensor (DPS).

De aanpak omvatte de kalibratie van de DPS in hydrostatische drukcabines (tot 100 kPa) en de validatie in een gereduceerde schaalopstelling van een dijk in het laboratorium. Om de invloed van aarddruk te elimineren, werd de sensor in de dijk ingebed met poreuze stenen cilinders.

De analyse richtte zich op de metingen van de poriedruk die ontstond door kwel. De resultaten van de DPS toonden een goede overeenstemming met conventionele hydraulische meetmethoden.

Tijdens kalibratie in hydrostatische drukkamers demonstreerde de nieuwe sensor een meetnauwkeurigheid van 10 tot 15 cm waterkolom. De functionaliteit werd gevalideerd in een proefopstelling op schaal (*reduced-scale facility*). De volgende stappen omvatten de installatie in een proefdijk op ware grootte in Boretto, Italië, gevolgd door implementatie in een dijk aan de Rhône in Zwitserland.

De conclusies stellen dat het ontwikkelde DFO-systeem, inclusief de poriedruksensor, geschikt is voor geohydraulische toepassingen. Het biedt de potentie om poriedrukveranderingen nauwkeurig te monitoren, wat essentieel is voor de vroegtijdige detectie van dijkfalen.

Seepage monitoring and leaks detection along an earth dam with a multi-sensor thermal-active system, Radzicki et al. (2024)

De aanleiding voor de studie was de noodzaak om kwel en erosie in bestaande dijken te monitoren, aangezien traditionele lineaire glasvezelkabels beperkingen hebben qua installatierisico en hoge energiekosten voor actieve metingen. Het doel was de ontwikkeling en validatie van een nieuwe Multi Point Thermal-Active Monitoring-methode (MP-TAM), ter verbetering van de thermische analyse in bestaande constructies.

De aanpak bestond uit de installatie van 140 thermisch-actieve sensoren (uitgerust met micro-verwarmers) op 2,5 m diepte langs een 139 m lange sectie van de Kozlowa Gora dam, in 2014. De installatie gebeurde snel via hameren, waarbij de openingen met bentoniet werden afgedicht om erosiepaden te voorkomen.

De analyse gebruikte de actieve methode, waarbij de temperatuurstijging tijdens verwarming werd gemeten. De resultaten werden zowel kwalitatief (door verminderde opwarming in kwelzones) als kwantitatief geanalyseerd door de opwarmcurven te vergelijken met gekalibreerde data om de kwelsnelheid (*seepage velocity*) nauwkeurig te bepalen.

De conclusies bevestigen dat de methode effectief twee lekkagezones detecteerde, en een betrouwbare kwantitatieve analyse leverde. Het systeem is efficiënt, sneller en veiliger dan traditionele glasvezelkabels voor bestaande grondwerken.

A ground-breaking Distributed fiber-optic Pressure Sensor for geohydraulic applications, Höttges et al. (2024)

De aanleiding voor de studie was de noodzaak om Distributed Fiber Optic (DFO) technologie uit te breiden naar het meten van hydrostatische druk, een cruciale parameter voor geohydraulische toepassingen zoals het detecteren van poriewaterafwijkingen en interne erosie in dijken. Het doel was de ontwikkeling van een nieuwe Distributed Fiber-Optic Pressure Sensor (DPS). Het nieuwe element is een spiraalvormige vezel, en geïntegreerde temperatuurcompensatie.

De aanpak omvatte kalibratie van de sensor tot 50 kPa en twee testtoepassingen: de DPS werd getest in een waterkolom om verticale druk te meten, en ingebed in een dijk op laboratoriumschaal om poriedrukvariaties te monitoren tijdens verzadiging. De analyse vergeleek de DPS-metingen, die gecorrigeerd werden voor thermische effecten, met conventionele druk- en piëzometersensoren. Tijdens de dijksimulatie detecteerde de DPS de drukveranderingen tot aan het moment van onverwachte teenerosie.

De conclusies bevestigen de goede overeenkomst tussen de DPS en conventionele sensoren. De DPS biedt continue metingen van hydrostatische druk met hoge ruimtelijke resolutie over lange afstanden, wat de potentie heeft om geohydraulische monitoring sterk te verbeteren.

Field Testing of a Smart Geomat Based on Fiber Optic Sensors and Sensor Fusion for Levee Monitoring, Bertulessi et al. (2025)

De aanleiding voor de studie is de toenemende noodzaak tot real-time monitoring van rivierdijken vanwege klimaatverandering, en het risico op falen door erosie en verborgen defecten. Het doel was het beoordelen van een innovatieve ‘slimme bekleding’ (een geomat versterkt met Polymere Fiber Optic Sensors, PFOS), voor het detecteren van oppervlakte-deformatie en veranderingen in de oppervlakte-bodemeigenschappen zoals temperatuur en vochtgehalte.

De aanpak bestond uit de installatie van vier prototype-modules op een dijk nabij Modena, Italië (maart 2023), gevolgd door een jaar monitoring. Er werden ook gecontroleerde grondverplaatsingstesten uitgevoerd met begraven luchtkussens. De analyse maakte gebruik van multi-sensor datafusie (PCA en K-medoids clustering) en Machine Learning (Mahalanobis Squared Distance) om de respons op omgevingsfactoren te interpreteren en afwijkende omstandigheden te identificeren.

De conclusies laten zien dat de slimme bekleding een hoge gevoeligheid vertoonde voor omgevingsfactoren zoals temperatuur en waterpeil. Bovendien kon het systeem succesvol kleine, gelokaliseerde grondverplaatsingen (2 tot 6 cm) detecteren. Daarmee is aangetoond dat de slimme bekleding een hulpmiddel is dat de bescherming tegen overstromingen kan verbeteren.

A new method for scour monitoring based on distributed fiber optic vibration sensing, Lin et al. (2025)

De aanleiding voor de studie was de bedreiging die uitspoeling vormt voor de stabiliteit van rivierbeddingen en dijken. Traditionele methoden zijn kostbaar en beperkt. Het doel was de ontwikkeling van een nieuwe, kosteneffectieve methode voor erosiemonitoring met behulp van Distributed Fiber Optic Vibration Sensing.

De aanpak bestond uit de ontwikkeling van een speciale sensorstang (*sensing rod*) met geplakte optische vezels, gevalideerd in laboratoriummodellen onder zowel waterloze als dynamische watercondities. De meetmethode gebruikt Adaptive Threshold Brillouin Optical Time Domain Analysis (AT-BOTDA) om snelle, gedistribueerde dynamische rekmetingen uit te voeren.

De analyse van trillingen richtte zich op de trillingsrespons van de stang (opgewekt door tikken) en onderzocht de relatie tussen de ingebedde diepte en drie indicatoren: de natuurlijke frequentie, de dynamische rekoverdrachtsnelheid (*transmissibility*) en de gradiënt daarvan.

De conclusies bevestigen dat de gradiënt-gebaseerde methode het best presteert, omdat deze gelijktijdig veranderingen in het waterpeil en de erosiediepte kan waarnemen met een relatieve fout van minder dan 6%. De methode is een efficiënte oplossing voor monitoring van de dijkveiligheid.

Multi-physical distributed fiber optic observation in a 3211-m-deep scientific borehole at Jiajika lithium mine, western Sichuan, Shi et al (2022)

Het wetenschappelijke diepboorproject in de Jiajika lithium-mijn in West-Sichuan, China, is het diepste (3211,21 m) en hoogst gelegen glasvezel-observatiegat ter wereld op het Tibetaanse Plateau. De locatie, nabij de Xianshuihe-breuk, is cruciaal voor onderzoek naar de korstactiviteit en de stabiliteit van de geplande Sichuan-Tibet spoorlijn.

De studie bevestigt de haalbaarheid van Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) onder extreme omstandigheden van hoge druk en temperaturen tot 108°C. De speciaal

ontwikkelde, hittebestendige kabel integreert de 3D's: DTS, DSS en DAS. Voorlopige resultaten tonen de meerwaarde:

- DAS (Distributed Acoustic Sensing) detecteerde succesvol wrijvingstrillingen tijdens de boorput-terugvulling met zand, wat real-time de diepte en kwaliteit van de terugvulling vaststelde.
- DAS kon ook natuurlijke aardbevingen effectief onderscheiden van kunstmatige explosies (mijnwerk).

Met behulp van DTS kon de thermische geleidbaarheid van het gesteente in-situ worden gemeten, waarbij variaties werden waargenomen die wijzen op de aanwezigheid van spleetwater en pegmatietaders (formaties van stollingsgesteente met uitzonderlijk grote kristallen, die ontstaan in breuken of holtes van andere gesteenten).

Dit onderzoek bewijst de unieke voordelen van DFOS voor lange-afstand, continue en gedistribueerde multi-fysieke metingen in diepe boorgaten.

Minute-scale dynamics of recurrent dike intrusions in Iceland with fiber-optic geodesy, Li (2025)

Dit onderzoek introduceert glasvezelgeodesie (*fiber-optic geodesy*) als een methode om de dynamiek van dike intrusies nabij Grindavík, IJsland, op een minuut-schaal te volgen. Het doel was om magma-transportdynamiek af te beelden met een hoge spatio-temporele resolutie, wat met klassieke geodetische technieken zoals GNSS en InSAR, die vaak dagelijkse middeling vereisen, een uitdaging blijft.

De studie zette Low-Frequency Distributed Acoustic Sensing (LFDAS) in, waarbij een 100 km lange telecommunicatieglasvezelkabel werd omgezet in een dicht netwerk van ongeveer 10.000 rekmeters.

Gedurende de opnameperiode (20 november 2023 tot 14 november 2024) werden negen intrusieve gebeurtenissen geregistreerd. LFDAS legde duidelijke rek-snelheidssignalen vast, die tientallen minuten tot uren vóór de erupties verschenen.

De geodetische inversie van de LFDAS-gegevens onthulde gedetailleerde magma-intrusies. Voor alle eruptieve gebeurtenissen bereikte de afgeleide volumestroom van de dike (*dike volume rate*) systematisch een piek 15 tot 22 minuten vóór het begin van de eruptie. Dit repetitieve patroon suggereert een consistente geometrie van het magmasysteem.

De LFDAS-methode heeft het potentieel bewezen voor bijna real-time *imaging* van ondergrondse quasi-statische vervormingen. Het systeem is sinds februari 2024 succesvol gebruikt in een vroeg-waarschuwingssysteem om het IJslandse Meteorologische Bureau (IMO) te assisteren bij het uitgeven van waarschuwingen voor erupties, en om te bepalen wanneer geen waarschuwing nodig was. Dit biedt kritieke inzichten voor risicobeoordeling en voorspelling.

Thermal Monitoring of Embankment Dams by Fiber Optics, Beck et al. (2010)

Dit artikel behandelt de ontwikkeling en validatie van thermische monitoring met glasvezelkabels om lekkages en interne erosie in aarden dammen en dijken vroegtijdig op te sporen. Interne erosie is de belangrijkste oorzaak van falen van deze constructies.

Het basisprincipe is dat waterlekkage het natuurlijke temperatuurveld van de dijk verstoort door het fenomeen van convectie. Distributed Temperature Sensors (DTS), die gebruikmaken van optische Raman-vezels, stellen in staat om verdeelde temperatuurmetingen te verrichten over lange afstanden (tot 30 km) met een hoge ruimtelijke resolutie (elke meter).

Om lekkages te scheiden van verstorende externe factoren, heeft EDF (Électricité de France) fysisch-statistische en signaalverwerkingsmethoden ontwikkeld. Dit meervoudige systeem functioneert zowel als een 'early warning' systeem (automatische, dagelijkse analyse via *dissimilarity approach*) als een instrument voor langetermijn-monitoring (maandelijkse of jaarlijkse analyse).

De effectiviteit van de methodologie werd gevalideerd in de IJkdijk-test (een full-scale experiment). Hier konden lekkages die leidden tot *piping* geassocieerd met erosie al 4 tot 5 dagen vóór de uiteindelijke dijkbreuk worden gedetecteerd. Dit bewijst dat thermische monitoring met glasvezels een krachtig, nieuw en kosteneffectief hulpmiddel is voor de veiligheid van waterkerende constructies.

Démarche d'EDF au regard de l'utilisation des fibres optiques pour la surveillance des ouvrages hydrauliques. Validation de cette technologie lors des essais néerlandais ijkdijk d'érosion interne, Courivaud et al. (2012)

Dit artikel beschrijft het onderzoeksprogramma van EDF (Électricité de France) gedurende 11 jaar heeft uitgevoerd naar het gebruik van gedistribueerde temperatuur- en vervormingsmetingen met glasvezel, voor monitoring van waterbouwkundige constructies. De technologie is cruciaal, aangezien interne erosie/piping de primaire oorzaak is van falen van aarden dammen en dijken. Lekkage is hier de voorloper van. Conventionele, puntsgewijze meetmethoden kunnen de locatie van lekkages onvoldoende nauwkeurig vaststellen, en ook niet hoe snel de verzwakking van een dijk zich ontwikkelt.

Het principe voor detectie van lekkage, Distributed Temperature Sensing (DTS), maakt gebruik van de Raman-effecten in multimode glasvezels. Lekkages verstoren het natuurlijke temperatuurveld van de constructie doordat het stromende water warmte via convectie transporteert, wat daarmee afwijkt van de warmtetransport via conductie (warmtegeleiding) in de niet-lekkende massa.

De methode is gevalideerd tijdens de IJkdijk-erosieproeven in Nederland in 2009. Analyse van de ruwe temperatuurgegevens maakte het mogelijk om de lekkagezones reeds op de tweede dag van de zesdaagse proef te detecteren. Dit betekende een vroege waarschuwing, vier tot vijf dagen vóór de uiteindelijke dijkbreuk.

De technologie voor lekkagedetectie wordt nu als volwassen beschouwd en EDF is bezig met de geleidelijke uitrol ervan. Gedistribueerde vervormingsmetingen (met behulp van het Brillouin-effect) bevinden zich echter nog in de onderzoeksfase.

Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review, Zhang (2024)

Dit overzichtsartikel bespreekt de stand van zaken van Gedistribueerde Glasvezelsensoren (DFOS) voor de monitoring van ondergrondse infrastructuren, waaronder boortunnels, conventionele tunnels, afgezonken en *cut-and-cover* tunnels. DFOS is een superieur alternatief voor conventionele puntsensoren en geodetische metingen, omdat het de mogelijkheid biedt om rek- en temperatuurvariaties over lange afstanden te meten met een hoge ruimtelijke dichtheid.

De systemen zijn gebaseerd op de principes van Brillouin- en Rayleigh-verstrooiing. Brillouin-systemen zijn optimaal voor lange meetafstanden (tot 100 km), terwijl Rayleigh-gebaseerde systemen (zoals Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR) een veel hogere spatiale resolutie (in de orde van millimeters) bieden, maar over een kortere afstand (rond 100 m).

DFOS kan op twee manieren worden ingezet: (1) Gedistribueerde rekmetingen door de glasvezelkabel continu te hechten aan het oppervlak of in de bekleding in te bedden, of (2) Puntverplaatsingsmetingen (als extensometers) door de kabel op discrete punten te verankeren om de vervorming of voegopeningen te meten.

Cruciaal voor een succesvolle implementatie zijn de zorgvuldige selectie van de sensorvezel, het meetsysteem, het ontwerp van de sensorindeling, en het opzetten van robuuste veldinstrumentatie. DFOS biedt kritieke informatie voor het beoordelen van de structurele gezondheid en het plannen van voorspellend onderhoud van tunnels.

D3.1 – Review, design and specifications of Fiber optic-based monitoring systems for flood defences, Aguilar-López et al. (2024)

Het document beschrijft de conceptuele ontwikkeling van geavanceerde glasvezelsensorsystemen (FOS) voor de monitoring van waterkeringen en ‘movable barriers’ (of simpelweg: verplaatsbare kratten als tijdelijke waterkering). FOS biedt quasi-real-time monitoring over grote afstanden, wat essentieel is voor lange infrastructuur zoals dijken. De review analyseerde verschillende FOS-methoden, die zijn gebaseerd op de fysische interactie van licht (Rayleigh, Brillouin en Raman) met de glasvezel:

- Distributed Temperature Sensing (DTS) maakt gebruik van Raman-verstrooiing en wordt voornamelijk gebruikt voor het continu meten van temperatuur, wat cruciaal is voor de detectie van kwel en lekkages in dijken.
- Distributed Acoustic Sensing (DAS) is gebaseerd op Rayleigh-verstrooiing om dynamische rek, trillingen en akoestische gebeurtenissen te registreren, vaak toegepast

in de geofysica voor seismische evaluatie of detectie van soil liquefaction (zoals zettingsvloeiing).

- Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS), gebaseerd op Brillouin-verstrooiing, stelt het systeem in staat om gelijktijdig rek- en temperatuurprofielen over tientallen kilometers te meten.

Binnen het project is de Brillouin Optical Frequency Domain Analysis (BOFDA)-technologie gekozen. Deze techniek valt onder DTSS en werd geselecteerd vanwege de mogelijkheid om rek en temperatuur te scheiden en door de toepassing van frequentiedomein-acquisitie, wat leidt tot kostenefficiënte, gedigitaliseerde signaalverwerking en ruisfiltering.

De toepassing van FOS is afgestemd op de faalmechanismen: rekmetingen worden gebruikt om het kantelen en verschuiven van 'movable barriers' te monitoren, terwijl temperatuurmetingen op dijken worden gebruikt om indirect veranderingen in vochtgehalte en hellingstabiliteit te bepalen.

Distributed Fiber-Optic Hydrogeophysics, Tyler, S.W. (2022)

Het document "Distributed Fiber-Optic Hydrogeophysics" introduceert het snelgroeiende vakgebied van Gedistribueerde Glasvezelsensortechnologie (FOS) voor hydrogeologische en nabij-oppervlakte-processen. FOS maakt continue, hoge-resolutiemetingen (op sub-meter schaal) van parameters zoals temperatuur, rek en reksnelheid mogelijk over vezellengtes van tientallen kilometers. De drie belangrijkste meetprincipes zijn gebaseerd op de verstrooiing van licht:

- Raman-verstrooiing wordt gebruikt voor Distributed Temperature Sensing (DTS), essentieel voor het meten van temperatuurprofielen en het afleiden van grondwaterstroming en kwel.
- Brillouin-verstrooiing wordt gebruikt voor Distributed Strain Sensing (BDSS), dat longitudinale rek meet, maar duurder is vanwege de noodzaak voor gelijktijdige temperatuurcompensatie.
- Rayleigh-verstrooiing wordt gebruikt voor Distributed Acoustic Sensing (DAS) en is recentelijk sterk in opkomst in de aardwetenschappen. Rayleigh-verstrooiing is een elastisch proces (behoud van energie), wat resulteert in een veel sterker teruggekaatst signaal dan de inelastische processen van Raman en Brillouin, waarbij energieverlies en frequentieverschuivingen optreden.

DAS meet de snelheid van lengteverandering (reksnelheid) van de glasvezel door de faseverschuiving tussen opeenvolgende laserpulsen te analyseren. Dit maakt het systeem zeer gevoelig voor trillingen en akoestische gebeurtenissen over een breed frequentiebereik (van 0,1 Hz tot 10 kHz).

De DAS-techniek wordt breed toegepast in de seismologie voor zowel actieve als passieve metingen, waaronder de frequentiebereiken van aardbevingen, *hydrofracking*, en seismische refractie en reflectie. Bovendien wordt DAS ingezet om verticale rek in boorgaten te meten, veroorzaakt door grondwaterpompen en bodemdaling, met resoluties tot 0,1 nanostrain (dat betekend een relatieve vervormingsresolutie van 10^{-10}).

Het gebruik van ongebruikte telecomvezels (*dark fiber*) voor DAS biedt tegen lage kosten een continu monitoringsnetwerk voor het volgen van veranderingen in watervoorraad over grote gebieden, door seismisch omgevingsgeluid te registreren.

Bijlage 2: Toepassingen

Toepassingen Almere Duin (Waterschap Zuiderzeeland)

De ontwikkeling van de wijk Almere Duin door de gemeente Almere vereiste een speciale aandacht voor primaire waterkering ter plaatse. In het kader van deze ontwikkeling werd de primaire waterkering, de IJmeerdijk, ingepakt in een kunstmatig duinlandschap. De dijk werd ingepakt in een grote hoeveelheid zand.

Om ervoor te zorgen dat de dijk in deze situatie inspecteerbaar, beheerbaar en beoordeelbaar zou blijven, heeft waterschap Zuiderzeeland aan BZ Ingenieurs & Managers gevraagd een monitoringsstratregie te formuleren. De monitoring omvat zowel de fase voor bouwen, de bouwfase als de jaren daarna. Door langdurige metingen uit te voeren aan de IJmeerdijk, met de nadruk op de kernzone van de dijk, blijft het mogelijk de toestand van de dijk te kunnen bepalen. Hiermee wordt invulling gegeven aan het kunnen blijven uitvoeren van de bepalingen van de wettelijke zorgplicht. De monitoringstrategie is specifiek ontworpen om de stabiliteit van de dijk, deformaties, etc. te kunnen blijven bepalen. De uiteindelijk gerealiseerde meetconfiguratie omvatte 30 zakbaken om zettingen te meten, 8 peilbuizen voor grondwaterstanden, 8 waterspanningsmeters, en ook diverse fibre optics waren onderdeel van de opgestelde monitoringsplannen.

Er zijn zes tracés van drie glasvezelkabels geïnstalleerd. Deze kabels maken gebruik van het Brillouin-scattering-effect om vervormingen te meten en zijn voorzien van een gelmantel voor betrouwbare temperatuurdetectie. Enkele kabels zijn aan de taludzijde op het asfalt geplaatst. De metingen dienden om zowel de geometrie als het verloop van de waterspanningen (freatisch vlak) vast te stellen ten behoeve van de beoordeling van de dijk. De volgende technische en meetkundige leerpunten zijn opgedaan:

- Er is over het algemeen geen één techniek die hét antwoord oplevert op dé vraag over dijksterkte, -gedrag en veiligheid. Ook bij de IJmeerdijk bij Almere Duin zijn verschillende monitoringstechnieken toegepast die elkaar verifiëren.
- Zorg voor de mogelijkheden van goede kalibratie van de meet- en monitoringssystemen ook nadat de systemen in de dijk (in dit geval onder een duinlandschap) zijn geïnstalleerd. Het is immers lastig om bij problemen ‘even’ een sensor te vervangen.
- De uitlezing is van de metingen is bij Almere Duin geautomatiseerd. Dit is essentieel omdat het zonder real time automatisch verwerken van de data enorme hoeveelheden data batchgewijs moeten worden verwerkt. Er kunnen waarschuwingen worden verstuurd indien metingen duiden op bijzondere situaties (grote deformaties, snelle temperatuursveranderingen, etc.).
- Het aanbrengen van fibre optics tijdens bouwwerkzaamheden vergt ervaring, kennis, kunde en inzicht. Bij Almere duin is tijdens het werk van een grondverzetbedrijf de fibre optics meermalen beschadigd. Dit leidde tot vermijdbare vertraging en herstelkosten.

- Een belangrijk leerpunt in de toepassing van de glasvezel was het gebruik van een warmtemat ter kalibratie.

Toepassing De Keen, Strijen (Waterschap Hollandse Delta)

Waterschap Hollandse Delta heeft in (voorbereiding op) een dijkversterkingsproject fibre optic monitoring toegepast bij De Keen, Strijen. Het initieel opgesteld dijkversterkingsontwerp, gebaseerd op tot dan beschikbare data en informatie, resulteerde in een forse dijkverhoging. De vraag werd gesteld of aanvullende data en inzichten konden leiden tot een minder omvangrijk versterkingsontwerp. Het Waterschap besloot glasvezel toe te passen om continu inzicht te verkrijgen in het dijkgedrag.

De Monitoringsstrategie omvatte glasvezelkabels voor monitoring van rek en temperatuur, met metingen die elke 15 minuten werden uitgevoerd. Er werd een vak van circa 480 meter voorzien van fibre optic kabels. De kabels zijn horizontaal aangebracht op twee plekken in het dwarsprofiel: onder het hart van de bestaande kruin (op 30 cm diepte) en in de binnenteen van de bestaande kruin (op 50 cm diepte). Om nauwkeurige rekmetingen (*strain*) mogelijk te maken, zijn de horizontale glasvezelkabels gekoppeld aan een geogrid bij het inbrengen. Bovendien zijn op vijf locaties verticale glasvezelkabels als inclinometers ingebracht om (beginnende) afschuivingen en vervorming te identificeren tijdens de grootste ophoging.

De fibre optic monitoring werd tijdens de uitvoering gebruikt om te signaleren of vooraf bepaalde grenzen (alarmwaarden) werden overschreven. Hierdoor kon met name gedetecteerd worden of er niet met te zwaar materieel werd gewerkt. Na de uitvoering werd de monitoring gecontinueerd om zettingen te kunnen bepalen. De monitoring maakt het mogelijk om het gedrag van de dijk op de lange termijn te kunnen bepalen. De kabels blijven volgens planning nog 10 jaar na het ophogen liggen voor monitoring. Belangrijke leerpunten zijn samengevat:

- Let bij het contracteren van de meting op de gehele cost of ownership (ivm aanbestedingsgrenzen) en niet alleen het aanbrengen maar ook onderhoud en updates;
- Zorg dat de integrator van stroom voorzien is en beveiligd staat;
- Zorg voor een goede koppeling aan de ondergrond (bij ons zandbed+geotextiel);
- Zorg ervoor dat de ligging van de kabel goed is ingemeten en is aangemeld voor KLIC;
- De rest van de organisatie moet ook weten dat de kabel er ligt en waar die ligt;
- De interpretatie van de *strain*-metingen bleek lastig. Bij het gebruik van DSTS kijk wordt de relatieve rek bepaald en is niet met zekerheid te zeggen in welke richting de rek plaatsvindt. Er wordt, onder andere door Deltares, gewerkt aan de ontwikkeling van een x,y,z-variant.
- Zorg dat je een dashbord hebt waarin je de data kan weergeven en analyseren.

Leerpunten LiveDijk Willemspolder

De proef in de Willemspolder richtte zich op het monitoren van de effectiviteit van verticaal zanddicht geotextiel (VZG) tegen piping. Hier werd de actieve meetmethode met verwarmbare glasvezelkabels toegepast. De metingen toonden aan dat de methode effectief is om waterdoorstroming (kwel) door de geotextielbarrière te detecteren, aangezien de verwarmbare kabel afkoelde waar water bleef stromen. Om bruikbare resultaten te verkrijgen moet de verwarmde glasvezelkabel in de juiste zandlaag op de juiste diepte worden geïnstalleerd.

Hoewel de meting werkte, bleek de uitvoering in de praktijk af te wijken van het oorspronkelijke plan: het geotextiel werd over een kortere lengte en minder diep aangelegd dan gepland vanwege uitvoeringsmoeilijkheden.

Leerpunten LiveDijk Grechtdijk

Op de Grechtdijk werd een GeoDetect-systeem (glasvezelkabel) gebruikt voor continue temperatuurmeting onder de kruin en aan de binnenteen van de boezemkade. De temperatuurmetingen met de glasvezelkabel gaven over het algemeen een betrouwbaar beeld van het thermische gedrag van de dijk. Er werden grote temperatuurverschillen waargenomen in de kruin van de dijk, wat mogelijk duidt op scheurvorming. Een belangrijk leerpunt was dat de metingen zoveel data opleverden dat de interpretatie ervan bewerkelijk en niet eenvoudig was.

Hoewel duidelijke verschillen in de temperatuursmetingen werden gezien, was de oorzaak (zoals scheurvorming) onduidelijk. Dit onderstreept de aanbeveling dat in een praktijk en zeker in de Proof of Concept-fase van glasvezelmonitoring voor beverdetectie ondersteund moet worden met andere metingen/monitoring om de fibre optics metingen te kunnen duiden. En dat de meting geautomatiseerd en actief gevolgd moet worden, waarbij bij opvallende metingen direct veldwaarnemingen uitgevoerd moeten worden ter verificatie en om aanvullend inzicht te krijgen.

Het graven van sleuven om de kabel in de kruin en teen te plaatsen, roert de grond en beschadigt de grasmat, waardoor de sterkte van de dijk tijdelijk wordt aangetast. Hoewel dit de meest voor de hand liggende installatiewijze is, moet de schade beperkt worden door zorgvuldige verdichting en herstel.

Monitoring met fibre optics: Een selectie van projecten

De primaire toepassing in deze sector is het detecteren van lekkage en interne erosie (piping) door middel van temperatuurmetingen (Distributed Temperature Sensing, DTS).

Project / Locatie	Land / Regio	Toepassing / Doel	Relevante Technologie
IJkdijk Test	Nederland	Veldproef (full-scale) om het fenomeen *piping* te bestuderen en nieuwe sensortechnologieën te testen. De kabels zijn ingebouwd tijdens de constructie.	Fibre Optics (temperatuur)
EDF Industriële Site	Noord-Frankrijk	Langetermijnmonitoring van lekkages die seizoensgebonden veranderen over een groot deel van de dijk.	1 km glasvezelkabel, begraven op de kruising van het talud en de afwateringskanaal.

Kinderdijk – Schoonhovense Veer (KIS)	Nederland	Monitoren van verzakking van een dijkversterkingsproject over een dik veenpakket	Glasvezelkabels
LiveDijk Grecht	Nederland	Continue monitoring van temperatuur en meting van deformatie van een boezemkade. Potentieel om scheurvorming op te sporen	GeoDetect-systeem (glasvezelkabel)
LiveDijk Willemspolder	Nederland	Controleren van de effectiviteit van verticaal zanddicht geotextiel (VZG) tegen *piping*	Verwarmbare glasvezelkabels (actieve methode)
Dijkversterking Keen	Strijen, Nederland	Monitoren van zettingen en stabiliteit tijdens en na het ophoogproces om tot een optimaler ontwerp te komen	Horizontale glasvezelkabels (strain/rekmetingen) gekoppeld aan een geogrid
HPP Brežice	Sava rivier, Slovenië	Detectie van kwel langs een dijk, met grootschalige monitoring.	30 km *DiTemp Self-Heating cable* (actieve DTS).
iLevees	New Orleans, VS	Vroegtijdige alarmering en preventie van falen (instabiliteit en kwel) over trajecten van meerdere kilometers.	Distributed Fiber Optic Sensing (DTS en Distributed Strain Sensing).
Winscar Reservoir Dam	Groot-Brittannië	Monitoring van een PVC-membraan voor lekkage.	Glasvezelkabels.
Midlands Dam	Mauritius	Monitoring van de randvoeg (*Perimeter Joint*) op een betongevelde steenfundatie dam (*Concrete-Faced Rockfill Dam*).	Glasvezelkabels.
Merowe Dam Site	Soedan	Monitoring van de voegafdichting (*Joint Monitoring*) op een betongevelde steenfundatie dam.	Glasvezelkabels geïnstalleerd na de asfaltzandlaag.
Adige River Test Site	Italië	Pilotproject voor DTS in een Italiaanse dijk, waar veel zandafzettingen (*sandboils*) voorkomen tijdens overstromingen.	330 m DTS/DFOS aan de teen van de landzijde.

Fibre optics wordt ook toegepast voor de monitoring van de structurele integriteit en vervorming in andere complexe civiele werken.

Project / Locatie	Land / Regio	Toepassing / Doel	Relevante Technologie
GEN/RER Ottignies	België	Langetermijnmonitoring van de belastingsverdeling in jet grout nagels die spoorwegtaluds stabiliseren.	FBG/DTG extensometersysteem, gefixeerd met grout.
BAM – Test Pit Oosterweel Link	Antwerpen, België	Monitoring van damwanden (30 m lang) en stempels (*struts*) tijdens uitgravingen.	FBG/DTG op stalen elementen en gedistribueerde *Brillouin scattering*.
Monopile Fundering Windturbines	Noordzee (Parkwind)	Monitoring van rek/spanningen in de grootverbinding tussen de monopile en het tussenstuk.	FBG/DTG sensoren geïntegreerd in wapeningsstaven.
KIJK Klimaatdijk	Streefkerk, Nederland	Langetermijnmonitoring van vervormingen in grondankers (36 m lange voorgespannen staalkabels).	FBG-sensoren (19 stuks per kabel).

Slagvastheid op A15	Rotterdam, Nederland	Monitoring van verkeer, weeg-in-beweging (*weigh-in-motion*) en slijtage van het wegdek.	Strain Measurement (rekmetingen).
Statische Belastingstest (SLT) MV palen	Tweede Maasvlakte, Rotterdam, Nederland	Meten van deformatie bij statische belastingstests op diepe palen (> 45 m lang).	FBG-arrays bevestigd aan de paal vóór installatie.
Groutankers	Amsterdam, Nederland	Monitoring van vervorming/rek.	Strain Measurement.
Doesburg Brug	Nederland	Monitoring van bruggen, specifiek de spanningsniveaus (*strain*) in het brugdek.	Multiplexed FBG (Fiber Bragg Grating) sensoren.
Vessel Monitoring	Maritiem	Monitoring van schepen en motoren, inclusief trillingen, druk, temperatuur en rek op de scheepsromp.	FBG-technologie in een hybride meetsysteem.

Overige overwogen toepassingen

Er zijn voor diverse cases fibre optics overwogen:

- als toepassing van aardbevingschadedetectie. Echter is om financiële redenen uiteindelijk gekozen voor horizontaal geplaatste hellingmeetbuizen om vervormingen te meten.
- Daarnaast zijn fibre optics als mogelijke techniek geopperd om preferente stroombanen te detecteren in een mogelijk uit te voeren geavanceerde toets voor piping. NB. Dit bleek echter indertijd niet nodig omdat met eerdere en minder ingrijpende onderzoeken de beoordeling op piping kon worden aangescherpt.
- Fibre optics worden in stuwdammen toegepast om preferente stroombanen te detecteren en zo mogelijke gevoelige of zwakkere te identificeren.

Bijlage 3: Interview CONEXYS

In het kader van de verkenning naar organisatie- en samenwerkingsvormen voor dijkmonitoring met glasvezelkabels ten behoeve van de detectie van bevergraverijen, gingen Frank den Heijer, Wouter Zomer en Chris Karman (CONEXYS) met elkaar in gesprek. Waterschap Vallei en Veluwe en Rijkswaterstaat hebben samen het initiatief genomen om te onderzoeken of fibre optics inzetbaar is om beveractiviteit in dijken vroegtijdig te signaleren. Het gesprek draait om de vraag: *hoe organiseer je dit soort innovatie tussen overheid, kennisinstellingen en marktpartijen op een verstandige manier?*

Achtergrond van Chris Karman

In 2016 vertrok hij bij Alterra (WUR) en startte hij voor zichzelf om zich volledig te richten op het helpen bouwen en vormgeven van complexe samenwerkingsverbanden:

“Ik help partijen – consortia, clusters – waarin overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen samen optrekken. Altijd een beetje die triple helix. Vaak in de blauwe omgeving: water, maritiem, soms groen en agro, en af en toe heel andere domeinen zoals hightech maakindustrie.”

Een van de trajecten waar hij met zichtbaar plezier op terugkijkt, is DigiShape, waar hij Wouter leerde kennen. Vanuit een vrij blanco start – “we begonnen met een A4’tje: *dit willen we graag*” – is daar een meer volwassen samenwerkingsverband uit ontstaan tussen onder andere Rijkswaterstaat, Deltares en Van Oord.

Daarnaast is Chris programmamanager Human Capital voor Nederland Maritiem Land, werkt hij voor Keukenhof aan innovaties en verduurzaming in de bloembollensector en is hij betrokken bij campusontwikkeling rondom nieuwe eiwitproductie. De rode draad:

“Het kernwoord is altijd samenwerking – en heel vaak ook innovatie.”

Wouter sluit aan door te benadrukken dat de basis die Chris bij DigiShape heeft gelegd nu wordt doorontwikkeld in andere samenwerkingsvormen en projecten. Die ervaring is precies de reden dat we Chris hebben gevraagd voor dit interview.

De casus: bevers als dijkrisico en de vraag naar glasvezel

Frank licht vervolgens de aanleiding voor dit project toe. Waterschap Vallei en Veluwe benaderde hem met de vraag of glasvezeltechnologie een rol kan spelen bij de detectie van bevergraverijen ten behoeve van de bescherming tegen overstromen. Het probleem is inmiddels landelijk:

“Bevers houden zich niet aan waterschapsgrenzen. Er zijn nu duizenden bevers, en je ziet dat de populatie zich langs waterlopen uitbreidt. Bij hoogwater zoeken ze een droge plek en dan blijven alleen de hogere delen van de dijken over. Daar gaan ze graven.”

In dijken met een zandkern en een afsluitende kleilaag kan een beverhol zorgen voor een soort “vollopende badkuip”: de zandkern raakt verzadigd en de stabiliteit van de dijk kan snel teruglopen. Bevers zijn bovendien beschermd; je kunt ze niet zomaar wegvangen of doden. Frank:

“De gedachte is: als je er vroeg bij bent, voordat ze een groot hol hebben gemaakt, is er nog ruimte om ze weg te sturen of te verplaatsen. Maar dan moet je wel weten *wanneer* ze hun eerste poot in de dijk zetten.”

Het huidige dijkleger heeft tijdens hoogwater zijn handen vol aan inspecties op allerlei aspecten; continu en met hoge ruimtelijke resolutie speuren naar beginnende graverij is dan praktisch niet haalbaar. Dat bracht de vraag naar boven of glasvezel (fibre optics) een rol kan spelen.

Er is al ervaring elders, onder meer bij ProRail, waar één buiskabel met tientallen glasvezelkabels langs het spoor ligt. Die wordt gebruikt voor communicatie én voor monitoring. Via Distributed Acoustic Sensing (DAS) en gerichte data-analyse kunnen daar treinpassages, verzakkingen, spoorlopers en zelfs graafactiviteiten worden herkend.

“Als zo’n beest in de dijk aan het graven is, geeft dat natuurlijk ook trillingen. In principe moet je die kunnen meten. Het is geen luchtfietserij: de techniek werkt, maar hij is nog nooit in dijken toegepast.”

Frank schetst voorbeelden van proeven: glasvezel op de dijk (zoals bij Flood Proof Holland aan de A13 bij Delft), kabels net ingegraven in zand en klei. Zand geleidt trillingen relatief goed; klei gedraagt zich meer als pudding, waardoor signalen minder scherp zijn. De techniek is dus gevoelig voor lokale omstandigheden en vraagt om een doordachte configuratie.

Van idee naar plan van aanpak: de rol van organisatie- en samenwerkingsvormen

De opdracht van Vallei en Veluwe groeide al snel uit boven het niveau van één waterschap. Rijkswaterstaat haakte aan als mede-opdrachtgever; beide partijen betalen ieder de helft van het plan van aanpak. Tegelijkertijd is duidelijk dat dit een potentiële landelijke innovatie is, met forse investeringen als het ooit wordt uitgerold:

“We hebben al wat sommetjes gemaakt: als je langs alle primaire waterkeringen een glasvezelinfrastructuur wilt aanleggen met interrogators, praat je al snel over tientallen miljoenen. De kabels zelf zijn niet het probleem, de interrogators en de data-infrastructuur wél.”

De vraag aan Chris is daarmee niet alleen: *is er een businesscase?*, maar vooral ook: *welke samenwerkingsvormen passen bij de verschillende fasen – van idee tot landelijke uitrol?*

Fasen in de ontwikkeling: van idee tot uitrol

Chris brengt structuur aan door het proces in drie fasen te knippen:

1. Ontwikkelfase – het concept technisch en organisatorisch verkennen, basisconfiguraties uitdenken, aannames toetsen.

2. Proof of Concept/Test- en opschalingsfase –pilots, leren in de praktijk, opschalen naar meerdere locaties.
3. Realisatiefase – structurele uitrol en inbedding in beheer- en onderhoudsprocessen.

De essentie: de bereidheid van marktpartijen om mee te investeren hangt sterk samen met wat er aan de “achterkant” lonkt:

“Hoe groter de kans op een solide businesscase later – bijvoorbeeld kilometers kabel leveren en diensten verkopen – hoe groter de bereidheid om aan de voorkant mee te investeren.”

Tegelijkertijd is de functie hier primair publiek: het gaat om waterveiligheid en bescherming tegen bevergraverij. Dat maakt dat de overheid niet alles bij de markt kan neerleggen.

Kabel versus data: scheiding van infrastructuur en diensten

Een belangrijk inzicht dat tijdens het gesprek ontstaat, is het onderscheid tussen:

- de fysieke infrastructuur (de glasvezelkabels in de dijken en de interrogators);
- de datadiensten (analyse, algoritmen, dashboards, alarmering).

Wouter verwoordt het als volgt:

“Je kunt de aanleg van de kabel zien als een uniform stuk infrastructuur, dat je gewoon aanbesteden als asset. Daar kan iedere data-analysepartij later op aansluiten. Dat is vergelijkbaar met peilbuizen: iedereen kent het formaat en de diepte, maar verschillende partijen kunnen er hun eigen sensoren in hangen.”

Chris ziet hierin een manier om vendor lock-in te voorkomen. Door de infrastructuur te standaardiseren en in publieke handen te houden, behoudt de overheid regie over de basis. Vervolgens kun je de markt uitdagen om slimme datadiensten te ontwikkelen – niet alleen voor bevers, maar ook voor scheuren, verzakkingen en andere faalmechanismen.

“De echte innovatie zit in de data-analyse, in de slimme algoritmen die patronen herkennen. Dat is bij uitstek een domein waar private partijen iets aan kunnen verdienen, mits de datastructuur open genoeg is.”

Businesscase, risico, en de “worst” voor de markt

Een terugkerend thema is de verhouding tussen publieke investering en private risico’s. Chris schetst het scherp:

“Hoe groter het risico voor de markt, hoe meer publiek geld je aan de voorkant moet inzetten. Als je wilt dat aanbieders meedenken en mee-investeren, moet er een duidelijke ‘worst’ in het vooruitzicht zijn: een redelijk zekere kans op omzet in de uitrolfase.”

Dat leidt tot de gedachte van een soort funnel-aanpak of innovatieve aanbesteding:

- In de eerste fase doen meerdere partijen mee met ideeën en concepten.
- Een selectie daarvan krijgt (deels) financiering om Proof of Concepts te ontwikkelen.

- Uit die groep wordt uiteindelijk een of een paar partijen gekozen om diensten op de infrastructuur te leveren in de uitrolfase – voor een bepaalde periode, met duidelijke afspraken.

Cruciaal is dat deze partijen niet het gevoel hebben dat ze “gratis” hun kennis inbrengen om vervolgens bij de uitrol alsnog in dezelfde marktcompetitie te belanden als iedereen:

“Het is alsof je bij de bakker vraagt of je het brood even mag proeven, en zegt: als het lekker is, kom ik morgen misschien terug. Daar trapt geen ondernemer in.”

Tegelijkertijd moet de overheid voorkomen dat één partij zich volledig vastzet als monopolist. Open data-architectuur, standaardisatie van interfaces en een helder onderscheid tussen infrastructuur en diensten zijn daarvoor belangrijke randvoorwaarden.

Leren van grondwatermonitoring en ProRail

Wouter trekt een parallel met grondwatermonitoring. Waterschappen kunnen daar kiezen tussen:

- zelf apparatuur kopen en beheren, of
- “grondwaterdata als dienst” inkopen: de markt installeert de sensoren, levert data aan in de database van het waterschap.

De discussie laat zien dat een soortgelijk model voor fibre optics denkbaar is, maar dat de investeringen in infrastructuur en interrogators veel groter zijn dan bij peilbuizen. Dat maakt dat de data per definitie “duur” wordt, ongeacht wie de kabel betaalt. Juist daarom is een eerlijke verdeling van risico en opbrengsten cruciaal.

De ervaringen van ProRail bieden ook lessen. ProRail heeft al glasvezel langs het spoor liggen voor communicatie en gebruikt die nu ook voor monitoring. De extra functie is dus secundair en relatief goedkoop in te passen. ProRail doet bovendien veel analyse in eigen huis en heeft decennialange ervaring met het monitoren van infrastructuur. Voor waterschappen is dat niveau van interne capaciteit minder vanzelfsprekend.

Rol van STOWA, Rijkswaterstaat en andere waterschappen

Naast de relatie tussen overheid en markt, speelt ook de samenwerking tussen overheden onderling. Het beverprobleem is immers landelijk, terwijl het initiatief nu bij één waterschap en Rijkswaterstaat ligt. Binnen het programma PIW van STOWA en Rijkswaterstaat wordt ook gekeken naar de effecten van dierlijke graverijen op dijksterkte.

Chris schetst dat waterschappen pas echt breed aanhaken als ze:

1. zien dat de techniek werkt (technische haalbaarheid),
2. een beeld hebben van de kosten ten opzichte van de huidige praktijk (dijkleger, inspecties),
3. het kunnen koppelen aan hun zorgplicht voor waterveiligheid.

Wouter ziet een rol voor een combinatie van “koplopers” en sectorale organisaties:

“Ik zou drie of vier waterschappen zoeken die bereid zijn mee te trekken, en die samen met STOWA en Rijkswaterstaat aan tafel zetten. STOWA heeft ervaring met toegepast onderzoek en kan resultaten sectorbreed verspreiden.”

Ook PIANOo, het expertisecentrum voor aanbestedingen, wordt genoemd als interessante partij om voorbeelden en kaders voor innovatieve aanbesteding op te halen.

Zorgplicht, betrouwbaarheid en personele krapte

In de tweede helft van het gesprek komt de bestuurlijke kant nadrukkelijker in beeld. Frank wijst erop dat bevergraverij inmiddels door steeds meer afdelingen waterveiligheid als serieus probleem wordt gezien. Tegelijkertijd is het traditionele dijkleger onder druk: het wordt moeilijker om voldoende mensen te vinden die bij nacht en ontij dijken inspecteren.

Hier ziet Chris een duidelijke aansluiting:

“Zorgplicht is iets wat bestuurders zeker raakt. Als je met glasvezel elke meter dijk continu in de gaten kunt houden, vergroot je de betrouwbaarheid van je toezicht. Dat moet je wel afzetten tegen de kosten, maar het raakt direct aan hun verantwoordelijkheid.”

Frank vult aan dat er ook een internationale dimensie zit:

“Als straks overal in Europa glasvezel in dijken ligt en bij ons niet, en er gaat iets mis bij hoogwater, dan is de vraag onvermijdelijk: had je dat niet kunnen weten? Dat is ook een argument richting andere overheden.”

Openheid, vendor lock-in en toekomstige toepassingen

Aan het einde van het gesprek komt het thema vendor lock-in nog eens expliciet terug. Hoe voorkom je dat je als sector te afhankelijk wordt van één leverancier, terwijl je tegelijk de markt wilt uitdagen om te innoveren?

De belangrijkste lijnen die worden geschetst:

- Open standaard voor infrastructuur: één type kabel en koppelvlak waar meerdere aanbieders hun interrogators en diensten op kunnen aansluiten.
- Open data-architectuur: de ruwe data en kerninformatie blijven bij de publieke partijen; leveranciers bieden daarbovenop diensten aan, maar “bezitten” niet de data. Data is/wordt eigendom van de dijkbeheerder/waterschap/Rijkswaterstaat.
- Meerdere functies: positioneer fibre optics niet alleen voor beverdetectie, maar als breder instrument voor dijkmonitoring (verzakkingen, scheuren, seizoensgedrag, mogelijk zelfs andere toepassingen buiten waterveiligheid).

Chris geeft een sprekend voorbeeld uit een andere sector:

“Defensie kijkt naar trillingen in subsea-kabels om duikboten te detecteren. Dat is een toepassing die je aan de voorkant nooit had bedacht. Hoe opener je datastructuur, hoe groter de kans dat anderen nieuwe, waardevolle diensten ontwikkelen.”

Je zou het gehele traject op de markt kunnen brengen als één project waarvoor partijen zich via een Europese aanbesteding kunnen kwalificeren. Vervolgens worden de verschillende fasen (ontwikkeling, PoC, realisatie) doorlopen. Partijen dingen binnen de aanbesteding mee naar de uiteindelijke realisatiefase. Dat kan bestaan uit meerdere percelen, onderverdeeld in realisatie en dataleverantie.

Afronding: richting een plan van aanpak

Aan het eind van het gesprek concluderen Frank en Wouter dat het gesprek met Chris veel duidelijkheid heeft gegeven over de logica van verschillende samenwerkingsvormen. In hun plan van aanpak willen ze geen blauwdruk voorschrijven, maar een palet aan opties schetsen, met bijbehorende “stuurknoppen” voor de opdrachtgever:

- scheiding tussen infrastructuur en data-diensten;
- fasering (ontwikkel/PvA → proof of concept → uitrol) met mogelijk verschillende rollen voor markt en overheid per fase;
- ruimte voor innovatieve aanbesteding en een funnel-achtige aanpak;
- aandacht voor open standaarden en het voorkomen van vendor lock-in;
- koppeling met zorgplicht, kosten-baten en personele krapte bij dijkinspecties.

Frank stelt voor om, zodra er een eerste compacte tekst ligt, die aan Chris voor te leggen voor een snelle review en laatste tips, mits zijn agenda het toelaat. Chris stemt daarmee in (niet teveel tijdsdruk op een reactie ajb…).

Daarmee wordt het interview afgesloten: een verkennend, maar inhoudelijk rijk gesprek dat een stevige basis biedt voor het verdere uitwerken van het plan van aanpak voor fibre optics in dijkmonitoring voor beverdetectie.

Bijlage 4: Interview ProRail

Op 1 december 2025 vond een digitaal overleg plaats tussen vertegenwoordigers van ProRail en het team van Rijkswaterstaat, Waterschap Vallei en Veluwe en Waterinfraworks en BZ Ingenieurs & Managers dat het project uitvoert over de toepassing van fibre optics voor onder meer beverdetectie in dijken.

Aanwezig waren onder anderen Cees-Jan Mas en Joost van ’t Schip namens ProRail, en Frank den Heijer, Reindert Stellingwerff en Wouter Zomer namens het dijken- en beverproject. Het doel van het gesprek was om te leren van de ervaringen van ProRail met DAS langs het spoor en om te verkennen hoe die kennis kan worden benut voor dijkmonitoring en detectie van graafschade door bevers.

Na een korte voorstelronde schetst Cees-Jan Mas de context bij ProRail. Langs vrijwel alle spoortrajecten ligt een glasvezelkabel in de grond, op circa 60 cm diepte en 1 meter uit de spoorstaaf. ProRail gebruikt deze vezel voor verschillende use cases: detectie van spoorlopers, wieldefecten, degradatie van rails en ondergrond, bepaling van kritische treinsnelheid (geofysische toepassing), trillingshinder, en verkenning van dierlijke activiteit zoals dassen en bevers. Vooral de toepassing kritische treinsnelheid is inmiddels doorontwikkeld tot een beheerd product.

Joost van ’t Schip licht de datakant toe. De interrogator levert grote hoeveelheden data – ongeveer 1 gigabyte per minuut – in de vorm van duizenden virtuele sensorkanalen. Deze data worden eerst voorbewerkt met filters en signaalanalyse (onder andere high-pass filtering en short term Fouriertransformaties). Afhankelijk van de use case zet ProRail vervolgens algoritmen in, variërend van change point-detectie tot neurale netwerken voor het herkennen van spoorlopers. Voor geofysische toepassingen werkt ProRail intensief samen met Deltares.

Op de vraag naar de stand van zaken rond bevers geeft Joost aan dat dit onderwerp het afgelopen jaar tegenviel. De kernproblemen zijn het beperkte aantal situaties waarin de beveractiviteit tegelijkertijd met DAS-metingen en onafhankelijke validatie (zoals wildcamera’s) beschikbaar was, en de grote variatie in ruis en omgeving. Voor holle ruimtes zijn de resultaten veelbelovender: een proef met een zelf gegraven hol, in samenwerking met Deltares en TU Delft, liet duidelijke reflecties zien in zowel geofoons als DAS-data.

Er ontstaat een gesprek over de overdraagbaarheid van de spoorervaring naar dijken. De gesprekspartners bespreken het bereik van de glasvezel in verschillende grondsoorten. Waar Deltares bij natte klei sprak over een beperkt bereik van 1–2 meter, geven de ProRail-ervaringen in spoorbanen (veelal zand) aan dat personen tot circa 10 meter en in eerdere proeven zelfs tot 20 meter van de kabel nog zichtbaar zijn. Treinen zijn op veel grotere afstand waarneembaar. De conclusie is dat grondsoort, vochtgehalte en type bron sterk bepalend zijn voor de bruikbaarheid van het signaal.

Ook de technische infrastructuur komt aan bod. ProRail werkt met een glasvezel in een HDPE-buis met meerdere singlemode vezels. Er wordt een nieuwe generatie interrogator getest, waarmee tot vier vezels tegelijk kunnen worden uitgelezen over een totale kabellengte van 250 km. Dat is vanuit businesscase-oogpunt aantrekkelijk, omdat zo meer trajecten met één apparaat kan worden gemonitord.

Op het gebied van data en IT maakt ProRail onderscheid tussen onderzoeks- en productiegebruik. Voor sommige toepassingen, zoals spoorloperdetectie, draait al bijna real-time signaalherkenning, waarbij meldingen binnen een minuut bij een landelijke meldkamer terechtkomen. De ruwe data worden in toenemende mate ter plekke verwerkt, waarbij alleen relevante events worden opgeslagen of doorgestuurd, om opslag- en beheerkosten te beperken.

Aan de kant van Rijkswaterstaat en de waterschappen wordt toegelicht dat het huidige project nog in de fase van planvorming en conceptontwikkeling verkeert. Het uiteindelijke doel kan zijn om op termijn kabels in dijken langs zoete en brakke wateren te realiseren, maar dat vergt een meerjarig traject met proeflocaties, technisch en juridisch uitzoekwerk en het meenemen van zoveel mogelijk van de circa twintig waterkeringbeherende waterschappen. STOWA speelt daarbij een coördinerende rol.

In de afronding benadrukken beide partijen het belang van samenwerking en het voorkomen van dubbel werk. ProRail biedt aan om conceptversies van het plan van aanpak mee te lezen en vanuit hun ervaringen feedback te geven. Alle aanwezigen spreken uit dat ze elkaar de komende jaren graag blijven opzoeken om kennis, data en inzichten te delen, zodat de ontwikkeling van fibre optics voor dijkmonitoring kan versnellen.

Bijlage 5: Interview Deltares

In het kader van de verkenning naar de inzet van dijkmonitoring met glasvezelkabels ten behoeve van de detectie van bevergraverijen, gingen Pieter Doornenbal, Roeland Nieboer (beiden Deltares), Wouter Zomer (BZ Ingenieurs & Managers) en Frank den Heijer (Waterinfraworks) met elkaar in gesprek.

Tijdens het overleg lichtte Frank toe dat Rijkswaterstaat en Waterschap Vallei en Veluwe hebben gevraagd een doordacht plan van aanpak op te stellen voor het inzetten van glasvezeltechnologie (fiber optics) om bevergraverij in waterkeringen te detecteren. Het gaat nadrukkelijk om een traject dat moet uitmonden in praktijktoepassing in dijken, maar waarvoor eerst een ontwikkelpad, een proof-of-conceptfase en uiteindelijk een route naar uitrol nodig zijn. Het op te stellen plan van aanpak moet óók helpen om draagvlak te creëren bij andere waterschappen.

De kernvraag is: hoe kun je zo vroeg mogelijk detecteren dat bevers aan een dijk beginnen te graven? Idealiter al bij de “eerste poot in de dijk”. Dat heeft niet alleen een technisch, maar ook een juridisch motief: zodra een bever een hol heeft, zijn de mogelijkheden om in te grijpen sterk beperkt, behalve bij acuut onveilige situaties. De druk neemt toe doordat het aantal bevers snel groeit en dijken bij hoogwater een aantrekkelijke, droge plek vormen.

Achtergrond en expertise

Pieter vertelde dat hij bij TNO begonnen is met glasvezelmetingen, aanvankelijk gericht op temperatuurmetingen, later uitgebreid met rek en akoestiek. Hij werkt veel in projecten waar veldproeven een belangrijke rol spelen; glasvezel vindt hij interessant omdat je over lange afstanden vrijwel continu kunt meten. Toepassingen lopen uiteen van dijkveiligheid tot metingen in offshore.

Roeland gaf aan dat hij als geofysicus vooral uit de seismiek komt (onder andere bij Fugro) en nu bij Deltares veel werkt aan akoestische sensing op glasvezel (Distributed Acoustic Sensing, DAS). Hij schrijft simulatiesoftware (GEOSIM), doet modellering en data-analyse, en heeft al simulaties gemaakt voor het detecteren van graverij langs spoorwegen. Die lijn is nu doorgetrokken richting dijken.

Wouter vertelde dat hij al zo’n vijftwintig jaar met dijkmonitoring bezig is, onder meer vanuit Stichting IJkdijk, en nu als adviseur en projectleider vanuit BZ Ingenieurs & Managers en betrokken is bij monitoringsvraagstukken en monitoring bij waterschappen.

Frank werkt al meer dan dertig jaar aan waterveiligheid, risico analyses en assetmanagement. Hij heeft een betrekking bij de HAN University of Applied Sciences en heeft een onderneming Waterinfraworks. Het opstellen van een plan van aanpak om met glasvezel bevergraverij te detecteren is een opdracht van RWS en WS Vallei en Veluwe aan Waterinfraworks.

Glasvezeltechnieken en toepassingsrichtingen

Pieter liet in zijn presentatie verschillende glasvezeltechnieken zien (DAS voor trillingen, DTS voor temperatuur, DMS/rekmetingen, vochtmetingen via verwarmingspulsen, etc.), elk met hun eigen resolutie in tijd en ruimte. Juist vanwege de combinatie lange afstand – hoge meetdichtheid zijn deze technieken interessant voor lineaire objecten als dijken, spoorbanen en leidingen.

Hij schetste drie scenario's voor toepassing in dijken:

1. Gebruik van bestaande glasvezel. Bijvoorbeeld glasvezel van telecomaanbieders (zoals KPN) die in of nabij dijken ligt. Door de tracés van dergelijke kabels te koppelen aan dijkgegevens zou je herkennen waar al bruikbare glasvezel aanwezig is. Die kabels zouden dan met DAS als "luisterlint" kunnen dienen.
2. Meeliften bij dijkversterking. Als dijken toch worden versterkt of verlegd, is dat een logisch moment om glasvezel in te bouwen, specifiek geconfigureerd voor waterveiligheidsvraagstukken: akoestiek (DAS), waterdruk, temperatuur/vocht.
3. Dedicated setups in nieuwe dijken of proeflocaties. Hier kun je een optimaal pakket aan kabels en meetprincipes toepassen, volledig toegesneden op onderzoeksvragen zoals graverij, golfoploop, erosie, vochtgehalte in de toplaag, etc.

Voorbeelden uit lopende projecten zijn onder andere golfoploopmetingen met glasvezel in het lab en op dijken, en vochtmonitoring in de toplaag via warmte-pulsen (in samenwerking met o.a. Lidwine Burgers). Daarnaast zijn projecten bij Zuiderzeeland en Hollandse Delta uitgevoerd.

Meetprincipe voor graverij: DAS als logisch uitgangspunt

Op de vraag welk meetprincipe zij het meest kansrijk achten voor het detecteren van beginnende bevergraverij, gaven Pieter en Roeland aan dat voor glasvezel DAS/akoestische sensing de meest logische kandidaat is. Het gaat immers om relatief kleine, lokale trillingen (lopen, krabben, graven), en je hebt een techniek nodig die:

- voortdurend kan meten,
- over lange afstanden werkt,
- en niet berust op handmatige inspectie en handmatige dataverwerking.

Andere glasvezelprincipes, zoals rekmetingen of puur waterdrukmetingen, zijn minder geschikt voor de allereerste activiteit (een pootafdruk of het eerste graafwerk), omdat je daar extreem dicht en fijnmazig zou moeten meten en de effecten klein zijn. Wouter geeft aan dat drukmetingen een belangrijke rol hebben als "tweede lijn", bijvoorbeeld zodra water via een hol de zandkern van de dijk instroomt.

Daarmee ontstond in het gesprek een belangrijk onderscheid in "use cases":

1. Eerste poot / beginnende graverij in de kleilaag. Ideaal, maar technisch het meest uitdagend: de signalen zijn klein en hoogfrequent en doven snel uit in de bodem.
2. Begin van holvorming in de kleilaag. De activiteit wordt groter, maar blijft nog lokaal en hoogfrequent.

3. Doorgraven van de kleilaag, water stroomt bij hoge waterstanden de zandkern in. Dit is al een veel ernstiger stadium; hier zouden afwijkingen in waterdruk in de kern met glasvezeldrukmetingen mogelijk goed zichtbaar kunnen worden.
4. Een ontwikkeld hol in de kern (familie in de dijk). Dan is de veiligheid al significant aangetast, maar detectie (bijvoorbeeld via druk- of verzadigingsveranderingen) is nog steeds beter dan niets.

Wouter benadrukte dat, gezien de urgentie (aantal bevers, groei, hoogwatersituaties), het verstandig is niet alleen op de “ideale” detectie van de eerste poot te mikken, maar ook realistische “fallbacks” in te bouwen, zoals drukmetingen in de kern: liever later detecteren dan helemaal niet. Onderscheid wordt daarmee gemaakt in een eerste test/proof of concept fase en hierop volgende uitrol naar brede praktijktoepassing.

Ruimtelijke resolutie en kabelconfiguratie

Aan de hand van ervaringen bij ProRail legde Roeland uit dat de gevoeligheid van DAS sterk afneemt met de afstand tot de kabel, zeker voor de hoge frequenties die bij kleine bronnen horen. Spoorlopers die op circa één meter van de kabel lopen zijn goed zichtbaar; op tien meter afstand is het signaal praktisch weg.

Voor bevers betekent dit dat de glasvezel relatief dicht bij het verwachte graverijgebied moet liggen. Omdat bevers hun hol normaal gesproken onder de waterlijn beginnen, zou je bij dijken vooral aan de buitenzijde en nabij de teen/waterlijn willen meten. Mogelijk zijn meerdere kabels of meerdere vezelkernen aan de buitenzijde nodig om voldoende dekking te krijgen.

Belangrijke factoren:

- Bodemtype. Hardere materialen (zand, steen) geleiden hoge frequenties beter dan zachte, gedempte materialen als veen. Klei gedraagt zich voor akoestiek beter dan bijvoorbeeld veen; grondradar heeft daar juist last van, maar dat speelt hier niet.
- Koppeling kabel–grond. Voor akoestiek is een goede mechanische koppeling cruciaal. Een kabel die los in een lege buis ligt, meet veel minder dan een kabel die goed is ingebed in de omringende grond. Vocht helpt vaak bij een goede koppeling. In los, droog veen bijvoorbeeld kan de koppeling juist slechter zijn.
- Situatie: hoogwater, normale omstandigheden, droogte. Of de kabel in verzadigde of onverzadigde grond ligt, verandert de akoestische eigenschappen, maar sluit metingen naar beveractiviteit niet per definitie uit. Het vraagt wel om kalibratie en begrip van de lokale omstandigheden.

Dit alles betekent dat de optimale kabelconfiguratie per dijksegment kan verschillen en dat vooraf modellering en scenarioanalyses nuttig zijn: hoe hard is de bodem, waar is graverij het meest waarschijnlijk, welke resolutie is nodig, hoeveel kabels zijn dan nodig? Kalibratie van de metingen waarbij ‘bevergeluid’ wordt ongescheiden en gelocaliseerd is nodig.

Duurzaamheid en robuustheid van kabels

Op de vraag of kabels de “hele levensduur van de dijk” mee kunnen gaan, gaven Pieter en Roeland aan dat glasvezelkabels in de praktijk zeer robuust zijn. Voorbeelden uit andere toepassingen (ProRail, diepe putten, zware mechanische belasting) laten zien dat kabels tientallen jaren mee kunnen gaan, mits goed ontworpen en aangelegd. Er zijn varianten met staal of kevlar als trekversterking; materiaalkeuze (bijvoorbeeld roestvast staal in plaats van “gewoon” staal) kan corrosierisico’s beperken. In algemene zin verwachten zij geen fundamentele belemmering op dit punt; het is vooral een ontwerp- en specificatievraag.

Dataverwerking, omgevingsgeluid en machine learning

Een belangrijk deel van het gesprek ging over dataverwerking. DAS produceert enorme hoeveelheden data; niemand gaat daar handmatig naar zitten kijken. Er is dus behoefte aan:

- automatische detectie van relevante gebeurtenissen, waardoor…
- …filtering van omgevingsgeluid/-trillingen essentieel zijn…
- …en identificatie van patronen die typisch zijn voor beveractiviteit kunnen worden onderscheiden.

Roeland schetste drie invalshoeken:

1. Directe akoestische detectie van dieren. Bij ProRail is een duidelijk loopgeluid geregistreerd dat vermoedelijk van een das kwam. Aan de hand van camerabeelden is geconcludeerd dat er zeer waarschijnlijk een das langs de baan liep. Het signaal was duidelijk zichtbaar in DAS-data als een serie stappen binnen een bepaald frequentiegebied. Dit laat zien dat kleine dieren onder gunstige omstandigheden wel degelijk zichtbaar zijn.
2. Detectie van graven zelf. Graven levert zeer lokale, hoogfrequente trillingen op. In simulaties is dit goed zichtbaar, maar in het veld wordt het lastiger door het snelle uitdoven in de bodem en door de aanwezigheid van veel andere ruisbronnen.
3. Indirecte detectie via interferometrie. Niet alleen het directe graafgeluid is interessant, maar ook hoe een hol de voortplanting van ander omgevingsgeluid (treinen, verkeer, golven tegen de dijk, landbouwvoertuigen) verstoort. Door natuurlijke ruis en kunstmatige bronnen te gebruiken, kun je met interferometrische technieken veranderingen in de ondergrond detecteren. Daarmee kun je wellicht niet “het hol” exact reconstrueren, maar wel zeggen: “rond kilometer 64,1 gebeurt iets afwijkends, ga daar kijken”.

Voor al deze invalshoeken is een goed begrip van omgevingsgeluiden cruciaal: wat doen golven tegen een dijk, wat doet scheepvaart, verkeer, landbouw, wandelaars, honden, helikopters? Veel daarvan is nog niet systematisch in DAS-data in dijken bestudeerd. Meetsystemen moeten gekalibreerd worden.

Roeland gaf aan dat er binnen Deltares al met verschillende vormen van data-analyse en machine learning wordt gewerkt. Voor de specifieke casus “bevergraverij” is het essentieel om eerst een goede, gelabelde dataset op te bouwen: situaties waarin met grote zekerheid bekend is wat er gebeurt (bijvoorbeeld via camera’s, microfoons of directe observatie), zodat algoritmen kunnen leren typische patronen te herkennen.

Referentiedijken en achtergrondgeluid

In het verlengde daarvan haakte Wouter aan bij het concept van referentiedijken. Hij werkt vanuit STOWA en Rijkswaterstaat aan een traject om referentiedijken verder uit te werken en pleitte ervoor om daarbij niet alleen traditionele monitoring te doen, maar ook “akoestische referentiedijken”: locaties waar langdurig wordt “geluisterd” naar alle achtergrondgeluiden in en rond een dijk, inclusief menselijke en dierlijke activiteit.

Een concreet voorbeeld dat hij noemde is een dijk nabij zijn kantoor, waar een duidelijk beverpad (“beverglijbaan”) in de vegetatie zichtbaar is en waar regelmatig verse beversporen zijn. Vanaf satellietbeelden is het pad goed te zien. Dit is een kansrijke plek om met relatief eenvoudige middelen (microfoon, eventueel een stuk glasvezelkabel en een wildcamera) loop- en eventueel graafgeluid van bevers vast te leggen.

Ook dierentuinen met bevers werden genoemd als mogelijke locaties om bevergeluid te verzamelen in een relatief gecontroleerde setting. Daarbij werd wel opgemerkt dat voor de bruikbaarheid van zulke data niet alleen het dier, maar ook de kabelconfiguratie (die moet lijken op de situatie in een dijk) van belang is.

Proof of concept in het veld – locatie Paddepol

In het gesprek kwam een mogelijke proof-of-conceptlocatie uitgebreid aan bod: de dijk bij Paddepol, nabij Wijhe aan de IJssel. Deze dijk wordt in de komende jaren verlegd; een bestaand deel van de dijk zal dan op termijn worden ontgraven.

- Het gaat om een goed bereikbare, representatieve primaire kering.
- Deltares monitort daar nu al bodemvocht en grondwater.
- Volgens de huidige planning is het noordelijke deel in 2027 (maart–augustus) als testlocatie beschikbaar, en het zuidelijke deel in 2028 (april–augustus), vlak voordat het ontgraven wordt.
- Tijdens de recente veldverkenning in het kader van project B0NSAI is al een lijst met mogelijke experimenten opgesteld (erosie, stabiliteit, geofysica, etc.), met internationale partners.

Frank en Wouter zien deze locatie als kansrijk voor een proof of concept rond dierlijke holen, waarbij je bijvoorbeeld:

- kunstmatige holen in de dijk kunt maken,
- het gedrag onder belasting kunt volgen,
- en verschillende meetmethoden (glasvezel DAS, waterdruk/vocht, ERT, etc.) parallel kunt inzetten.

Pieter en Roeland gaven aan dat zo’n “fieldlab”-achtige setting, waarin veel mag en er experimenteerruimte is (inclusief het maken van gaten in de kleilaag), erg waardevol is. Het biedt de mogelijkheid om een realistische dijkopbouw te combineren met gecontroleerde experimenten en langdurige akoestische monitoring.

Simulatie en fasering van het ontwikkelpad

Deltares hanteert een GEOSIM-aanpak waarbij steeds dezelfde stappen worden doorlopen:

1. Heldere probleemdefinitie en use cases. Bijvoorbeeld: eerste poot in de dijk, doorbraak kleilaag, hol in kern.
2. Simulaties (forward modelling). Akoestische simulaties van graverij, loopgeluid, interferentie door holen, en de respons van de glasvezel. Dit geeft een eerste inschatting van haalbaarheid, ruimtelijke resolutie en benodigde kabelconfiguratie.
3. Kleine opstellingen / “lab in het veld”. Waar je specifieke scenario’s kunt uitproberen (lopen, graven, wagenpassages, golfbelasting), liefst met aanvullende sensoren (microfoons, camera’s) voor validering.
4. Veldproeven op representatieve dijken. Zoals nu is gedaan bij ProRail en in de toekomst bij dijklocaties als Paddepol of referentiedijken. Hier draait het ook om omgevingsgeluiden en operationele inbedding.
5. Opschaling richting praktijk / uitrol. Pas als er voldoende vertrouwen is in de detectiekansen, de foutkansen en de beheerbaarheid van data en systemen, komt een grootschaliger uitrol in beeld.

Frank gaf aan dat het plan van aanpak dat hij en Wouter schrijven, in essentie zo’n type routekaart moet schetsen: van huidige kennis en lopende projecten (zoals bij ProRail en Deltares) via ontwikkelstappen, proofs of concept en veldproeven naar een realistisch perspectief op toepassing langs de duizenden kilometers dijk in Nederland. Daarbij is het van belang om duidelijk te zijn over wat al kan, wat nog onzeker is, welke ontwikkellijnen kortere en welke langere doorlooptijden hebben, en waar “quick wins” mogelijk zijn.

Rollen, afstemming en rapportage

Tot slot kwamen ook procesmatige zaken aan bod:

- Roeland wees erop dat Deltares al jaren met dit thema bezig is, onder andere via het werk van Frans van den Berg. Hij is recent als geofysicus aangehaakt om de akoestische kant en simulaties verder te brengen.
- Pieter noemde dat er ook ideeën bij Rijkswaterstaat zijn ingediend rond innovatieve dijkmonitoring, waarin glasvezel voor bodemvocht, waterdruk en graverij gecombineerd zouden kunnen worden. Niet alle voorstellen zijn gehonoreerd, maar het biedt aangrijpingspunten voor toekomstige samenwerking.
- Frank en Wouter benadrukten dat zij in opdracht van WSVV en Rijkswaterstaat handelen en in hun plan van aanpak een ontwikkelpad schetsen. Het streven is daarbij om de verschillende lijnen (van Deltares, ProRail, waterschappen, Rijkswaterstaat, TKI’s) zoveel mogelijk te verbinden.
- Pieter gaf expliciet aan graag conceptteksten te willen zien waarin letterlijk uit dit gesprek wordt geput, voordat die breder worden gebruikt, zodat hij kan checken of zijn bijdragen correct en evenwichtig zijn weergegeven. Frank en Wouter gaven aan dat zij dat vanzelfsprekend vinden: de genotuleerde versie gaat eerst langs de deelnemers, en in vervolgproducten zal duidelijk worden verwezen naar deze bijdrage van Deltares.

- Frank vraagt of Deltares een bibliotheek heeft van belangrijke rapporten en publicaties over dit onderwerp. Als daar een overzicht van is, zou hij het erg op prijs stellen dat te krijgen.

Aan het einde van het overleg concludeerden de deelnemers dat:

- glasvezel, en met name DAS, een veelbelovende maar nog niet uitontwikkelde techniek is voor het detecteren van bevergraverij;
- er waarschijnlijk een combinatie nodig is van akoestische detectie en andere parameters (zoals waterdruk) voor verschillende “stadia” van graverij;
- omgevingsgeluiden en hun interferentie met holen beter begrepen en gemeten moeten worden (referentiedijken, beverlocaties, eventueel dierentuinen);
- simulaties, fieldlabs en proof-of-conceptlocaties zoals Paddepol logische volgende stappen vormen;
- en dat een gezamenlijke routekaart met fasering, use cases, technische opties en mogelijke financieringslijnen (direct contractonderzoek, TKI, etc.) nodig is om stappen te maken richting praktijktoepassing.

Bijlage 6: Interview TU Delft

Verslag overleg met Juan Pablo Aguilar-López, 1 december 2025

Samenvatting

Tijdens het gesprek tussen Wouter Zomer (BZIM), Frank den Heijer (Waterinfraworks) en Juan Pablo Aguilar-López (TUDelft) wordt uitgebreid ingegaan op de mogelijkheden en beperkingen van fibre optics voor het monitoren van dijken en specifiek voor het vroegtijdig opsporen van beveractiviteit. De aanleiding is dat waterbeheerders in Nederland zoeken naar een plan om glasvezeltechnieken de komende tien jaar in dijken te kunnen toepassen, onder andere vanwege de sterke toename van beverpopulaties en de risico's van bevergraverij.

Technische mogelijkheden van glasvezel in dijken

Juan legt uit dat glasvezeltechniek in essentie drie fysische grootheden kan meten:

1. Temperatuur,
2. Strain (rek),
3. Akoestiek (een afgeleide van strain).

Door deze metingen te combineren kunnen uiteenlopende processen worden gevolgd, zoals:

- veranderingen in vochtgehalte,
- detectie van scheuren,
- vorming van holtes,
- piping en micro-erosie,
- lekkages of preferente stromingspaden,
- en mogelijk ook het ontstaan van bevergangen.

Wouter vraagt naar de mogelijkheden van drukmetingen met fibre optics. Juan legt uit dat dit niet mogelijk (tot extreem lastig) is vanwege de alom aanwezig druk rondom de kabels. Wouter concludeert dat Volker Wessels daarom waterdruksensoren toepast die aan hun glasvezels zijn bevestigd; je krijgt dan een puntmeting waar waterdruk wordt gemeten.

Detectie van bevergangen

Volgens Juan kan temperatuur helpen omdat een bevergang het thermisch evenwicht in de dijk verstoort: een holte koelt of warmt anders op en de bever zelf heeft een lichaamstemperatuur van circa 37°C.

Akoestiek kan helpen doordat geluidsgolven anders voortplanten in een dijk wanneer zich een beginnende holte vormt. Maar daarbij zijn grote uitdagingen:

- sterke demping van geluidssignalen in grond;
- de noodzaak om precies op het juiste moment te meten als je het daadwerkelijke graven wilt horen;
- enorme datavolumes (tientallen gigabytes per twintig minuten);
- noodzaak van signaalfiltering door veel omgevingsruis en reflecties;
- variatie in bevergedrag en burrow-grootte.

Temperatuurmetingen via actieve opwarming van de kabel (en analyse van de afkoelcurve) worden ook besproken als mogelijk waardevol, zoals ontwikkeld in eerdere studies in Duitsland, Frankrijk en aan de TU Delft.

Kabelinstallatie en beïnvloeding van de dijk

- Een belangrijk praktisch punt is dat kabels in bestaande dijken lastig aan te brengen zijn:
- Graafwerk voor kabels creëert zelf verzwakkingen, zoals preferente stroombanen of micro-erosie.
- Ondiepe installatie is veiliger voor de dijk, maar geeft slechtere koppeling tussen kabel en bodem.
- Dieren kunnen kabels beschadigen (Juan noemt meerdere voorbeelden, o.a. door schapen).
- De vraag hoeveel kabels (lijnen) en welke afstand tussen de kabels nodig zijn hangt sterk af van het type detectie en de grootte van het te detecteren fenomeen.

Interrogators en kosten

Interrogators, de meetapparaten die lichtpulsen sturen en uitlezen, zijn relatief duur:

- Een akoestische interrogator kost ongeveer €200.000 en bestrijkt slechts 1–10 km kabel.
- Nieuwe ontwikkelingen in kabeltechnologie (minder lichtverlies) vergroten het bereik, maar het echte knelpunt is de data-analyse en rekenkracht.

ProRail kan bijvoorbeeld makkelijk geluid detecteren omdat een passerende trein een zeer sterke, continue energiebron is op een homogeen medium (rails). Dat maakt hun situatie niet vergelijkbaar met dijken van heterogeen grondmateriaal.

Dataprocessing en interpretatie

Juan benadrukt dat het interpreteren van signalen uiteindelijk de grootste uitdaging is:

- Akoestische data is omvangrijk, ruisgevoelig en bestaat uit veel frequenties die door elkaar lopen.
- Je moet weten waar de kabel ligt en waar referentiepunten in de dijk zitten (“cable mapping”).
- Actieve monitoring (bijv. slaan met een hamer) geeft duidelijkere signalen, maar is niet praktisch voor continue bewaking.
- Er is filtering nodig om relevante signalen te onderscheiden van achtergrondgeluid en vaste omgevingstrillingen.

Software bestaat wel, maar het slim selecteren van relevante datasegmenten en het real-time verwerken voor lange trajecten is complex.

Huidige en toekomstige onderzoeken

Juan vertelt dat hij meerdere jaren ervaring heeft met glasvezel in dijken en momenteel projecten uitvoert gericht op:

- vochtmonitoring,
- detectie van scheuren,
- experimenten met piping,
- en binnenkort ook bevergangen bij Flood Proof Holland.

Hij zal daar verschillende soorten kabels testen (single mode, multi mode, aangepaste combinatiekabels) in een proefkade met een zandkern en kleibekleding. Hij verwacht binnen één tot anderhalf jaar resultaten voor detectie van burrows en wil een PhD-traject op dit onderwerp opzetten.

Samenwerking en toekomstvisie

Wouter en Frank schetsen dat de komende jaren in Nederland veel ontwikkeling nodig is voordat fibre optics breed toepasbaar is in dijkmonitoring. Juan staat open voor samenwerking en het betrekken van zijn onderzoeksgroep bij toekomstige projecten.

Bijlage 7: Verslag bijeenkomst waterkeringbeheerders

"Verkennen voorwaarden en belemmeringen glasvezel ter detectie graverij"
18 december 2025

1 Opening en vaststellen agenda

Frank den Heijer zit het overleg voor en opent het overleg. De deelnemers starten het overleg met een korte introductie. Daarna meldt Frank dat één deelnemer, Dennis Koster (HDSR), wegens ziekte afwezig is. Wouter Zomer geeft aan dat hij de automatische transcriptie in MS Teams heeft gestart en dat deze achteraf nog wordt nagekeken, omdat AI niet foutloos is.

Kennismakingsronde

Frank den Heijer, Waterinfraworks (maar ook Hogeschool Arnhem en Nijmegen) is al ruim 30 jaar werkzaam in het veld van waterkeren. Hij stelt op verzoek van Rijkswaterstaat en Waterschap Vallei en Veluwe een plan van aanpak op voor glasvezelmonitoring in dijken, met nadruk op detectie van bevergraverij. Wouter Zomer is als onderaannemer van Waterinfraworks bij het project betrokken en heeft veel ervaring met dijkmonitoring.

De overige deelnemers stellen zich kort voor:

- Joost Borgers (Waterschap Vallei en Veluwe, monitoring en dijken)
- Reindert Stellingwerff (Rijkswaterstaat, dijken, bevers en gerelateerde thema's)
- Hans Knotter (betrokken bij dijken en bevers; interesse vanuit een instabiliteitsvraagstuk bij de Merwedebrug)
- Rien Koeling (Waterschap Vallei en Veluwe, keringbeheer IJsseldijk)
- Tom de Gast (Waterschap; geotechniek en ervaring met glasvezelmonitoring)
- Ruben Roelofs (HDSR, adviseur keringen en bevers)
- Wijnand Evers (Waterschap De Dommel, dijkbeheer)
- Peter Boone (Waterschap Vallei en Veluwe, beheer met focus op grasbekledingen en beverproblematiek)
- Peter van Dijk (Waterschap Drents Overijsselse Delta, specialist waterkeringen)
- Hanneke Kloosterboer (beleidsadviseur waterveiligheid; daarnaast één dag per week regisseur bij STOWA)
- Marijke Visser (Waterschap Scheldestromen; sluit later aan)
- Oscar van Dam (sluit later aan)

Doel van het overleg en agenda

Frank schetst het doel van de bijeenkomst: gezamenlijk verkennen welke praktische voorwaarden en belemmeringen er zijn als glasvezelmonitoring in waterkeringen wordt toegepast, specifiek om gaande bevergraverij te detecteren. De opbouw van het overleg is:

13:00	Opening en vaststellen agenda	Frank
13:10	Aanleiding en doel	Joost/Reindert
13:15	Glasvezelmonitoring voor dijken	Frank
13:25	Mentimetersessie	Incl. discussie o.l.v. Frank
13:55	Voorwaarden en belemmeringen	Discussie o.l.v. Frank

14:25	Wrap up	Wouter
14:30	Afronding	Joost/Reindert

2 Aanleiding en doel

Joost licht toe dat de beverpopulatie en daarmee de druk op waterkeringen en kritieke infrastructuur toeneemt. Hij benoemt een recente kadebreuk langs het Apeldoornskanaal als voorbeeld van de impact van ondermijning. Inspecteren is bovendien kostbaar en arbeidsintensief, zeker op locaties met obstakels (zoals bomen) of over grotere lengtes. Joost benadrukt dat de sector in de toekomst mogelijk onvoldoende mensen beschikbaar heeft om uitsluitend met traditionele inspecties het benodigde veiligheidsniveau te borgen. Daarom is er behoefte aan slimmere vormen van monitoring.

Reindert presenteert de centrale vraag: of waterkeringbeheerders een systeem kunnen inzetten om gaande graverij door bevers te detecteren. Het gaat nadrukkelijk om vroegtijdige “early warning”, dus detectie op het moment dat graverij plaatsvindt, niet pas wanneer een hol al langere tijd aanwezig is. Het beoogde doel is dat beheerorganisaties tijdig kunnen ingrijpen: bij laag- of middelhoge waterstanden om vestiging te voorkomen en bij hoogwater om snel te weten waar actuele graverij plaatsvindt.

Reindert schetst dat ProRail al ervaring heeft met glasvezelmetingen, onder meer voor trillingen door treinen en detectie van spoorlopers. Dat onderstreept volgens hem de potentie om ook specifieke activiteiten op of nabij een kabel te lokaliseren. Hij geeft aan dat het project meerdere fasen kent: plan van aanpak (eind 2025/begin 2026), ontwikkeling, proof of concept, implementatie en opschaling. Het traject zal volgens hem meerdere jaren inzet vragen.

Vragen over projectorganisatie en aanpak

Ruben vraagt hoe de projectorganisatie en financiering zijn ingericht. Reindert antwoordt dat het initiatief nu ligt bij Joost, Reindert, Frank en Wouter, maar dat vervolgfasen juist vragen om bredere sectorparticipatie: meerdere waterschappen, kennisinstellingen en financieringsbronnen. In het plan van aanpak zal ook een financiële paragraaf worden uitgewerkt.

Joost vult aan dat de voortgang afhankelijk blijft van de feedback uit de sector. Als duidelijk wordt dat bevergraverij in keringen nauwelijks voorkomt of niet relevant is, kan dat invloed hebben op de vervolgstappen, al helemaal wanneer zou blijken dat gaande graverij met glasvezel niet wordt gedetecteerd.

Tom vraagt welk type systeem wordt voorzien: akoestische sensing of een andere techniek. Frank geeft aan dat de gedachte nu vooral uitgaat naar Distributed Acoustic Sensing (DAS), maar dat in een proof-of-conceptfase ook alternatieve technieken (pore pressure metingen) naast elkaar getest dan wel toegepast kunnen worden.

Peter Boone vraagt of de term “vestiging” niet scherper kan: vestiging kan ook betekenen dat een burcht bewoond is, terwijl het project zich richt op gaande graverij. Reindert erkent dat de formulering nog aangescherpt moet worden. Peter vraagt ook of ProRail ervaring heeft

met het detecteren van graverij; dat onderwerp wordt later in de bijeenkomst verder besproken.

3 Korte inleiding glasvezelmonitoring

Frank geeft een beknopte toelichting op het principe. Een glasvezelkabel registreert veranderingen in het teruggekaatste licht, waarmee verschillende grootheden meetbaar kunnen zijn (zoals temperatuur, rek en geluid/trilling). Voor het detecteren van graafactiviteit is vooral akoestische sensing relevant. Frank benadrukt dat een systeem meer omvat dan een kabel: er is apparatuur (interrogator), ICT, veilige huisvesting, stroom en vaak een vorm van connectiviteit nodig. In een proof-of-conceptfase kunnen aanvullende sensoren worden ingezet (bijvoorbeeld camera's en waterstandsmetingen) om signalen te valideren en kennis op te bouwen.

Wijnand vraagt hoeveel kabels nodig zijn en hoe groot het "luisterbereik" is. Frank geeft aan dat ervaringen bij ProRail suggereren dat een kabel in droge omstandigheden over grotere afstand kan "luisteren", maar dat in natte, kleiige omstandigheden het bereik mogelijk kleiner is. Dat is precies een kernvraag voor de eerste ontwikkelfase: zo min mogelijk kabels, maar wel voldoende dekking.

Tom brengt een belangrijke uitdaging in: dijken zijn veelal multifunctioneel (wegen, fietspaden, activiteiten eromheen). Dat geeft veel "ruis" in signalen; het onderscheid tussen beveractiviteit en andere bronnen vraagt om goede filtering en interpretatie.

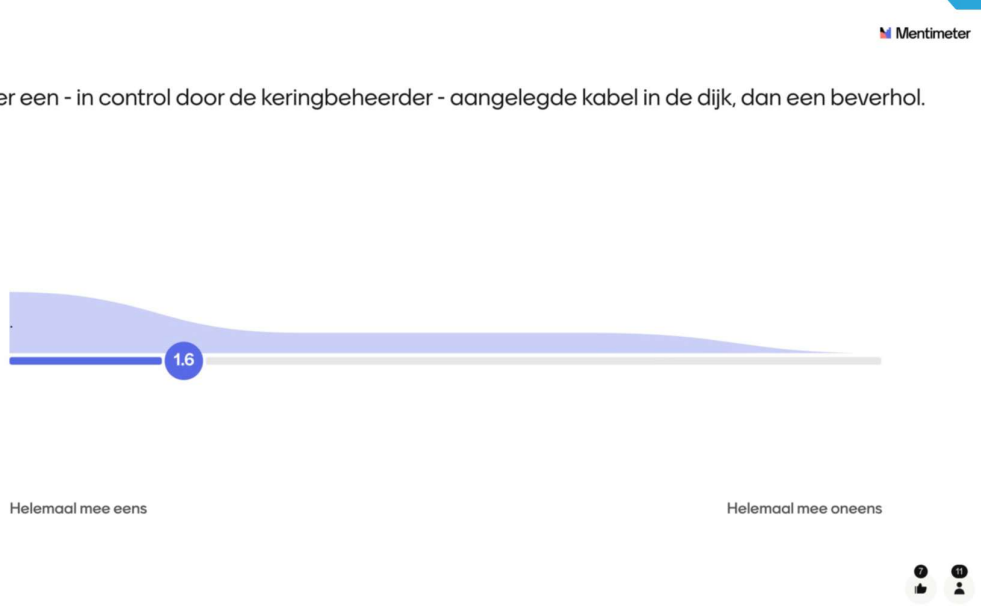
Oscar vraagt hoe te testen als er tijdens de proefperiode geen bevergraverij optreedt. Frank antwoordt dat passieve monitoring dan tekortschiet en dat actieve simulatie of andere testmethoden nodig kunnen zijn. Oscar benadrukt dat dit aan de voorkant goed doordacht moet worden.

Wijnand vraagt of er ook andere gravers (zoals mollen) en andere signalen te onderscheiden zijn. Frank geeft aan dat ProRail in sommige gevallen graafgerelateerde signalen heeft gezien in de data en dat camera's dan belangrijk kunnen zijn om te duiden wat het signaal veroorzaakt. Het onderscheiden van oorzaken is een expliciet onderdeel van de vroege projectfase.

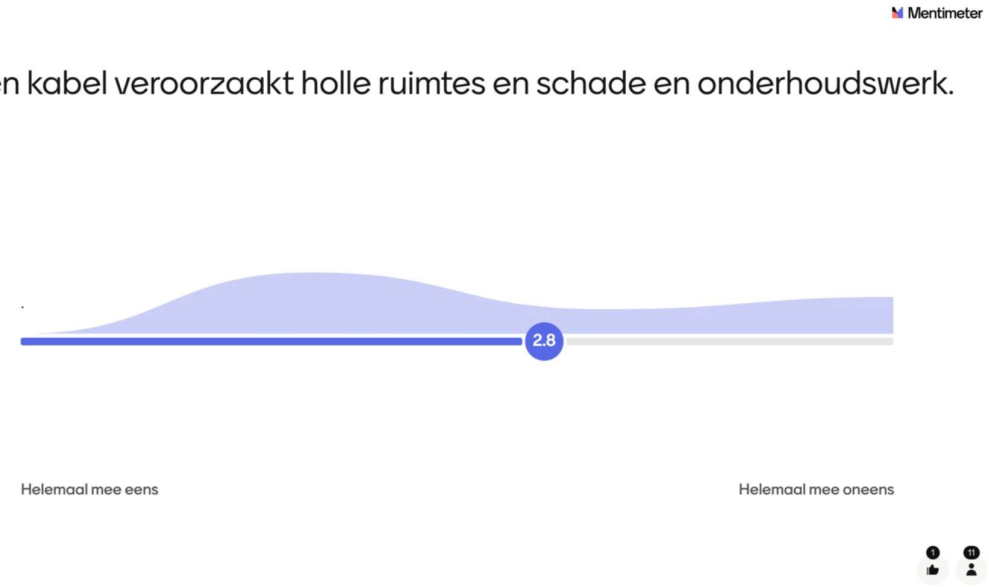
4 Mentimeter: stellingen en discussie

De groep bespreekt vijf stellingen.

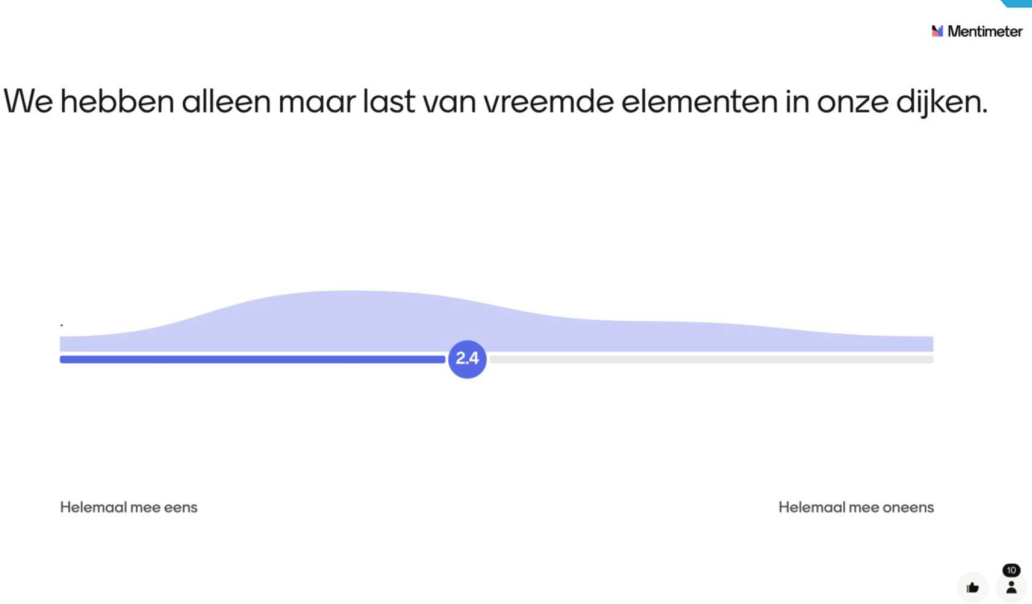
a. "Liever een in control door de beheerder aangelegde kabel in de dijk dan een beverhol." De meeste deelnemers zijn het eens, maar er is nuance. Peter van Dijk geeft aan dat bevergraverij niet overal een probleem hoeft te zijn en dat een kabel op zichzelf nog geen handelingsperspectief biedt. Hanneke geeft aan dat haar houding afhangt van de bewezen betrouwbaarheid en van de mate waarin maatregelen al zijn getroffen. Reindert en Joost bespreken dat detectie niet automatisch betekent dat constructieve maatregelen overbodig zijn, zeker niet bij hoogwater. Tom benadrukt dat "100% garantie" geen realistische norm is in waterkeringbeheer; risicogestuurd werken is gangbaarder. Wijnand ziet een combinatie als kansrijk: preventieve bescherming in bepaalde fasen en glasvezel als aanvulling bij situaties waarin volledige bescherming niet overal haalbaar is. Ruben ziet meerwaarde als aanvulling op beverpatrouilles, met name in de warme fase.



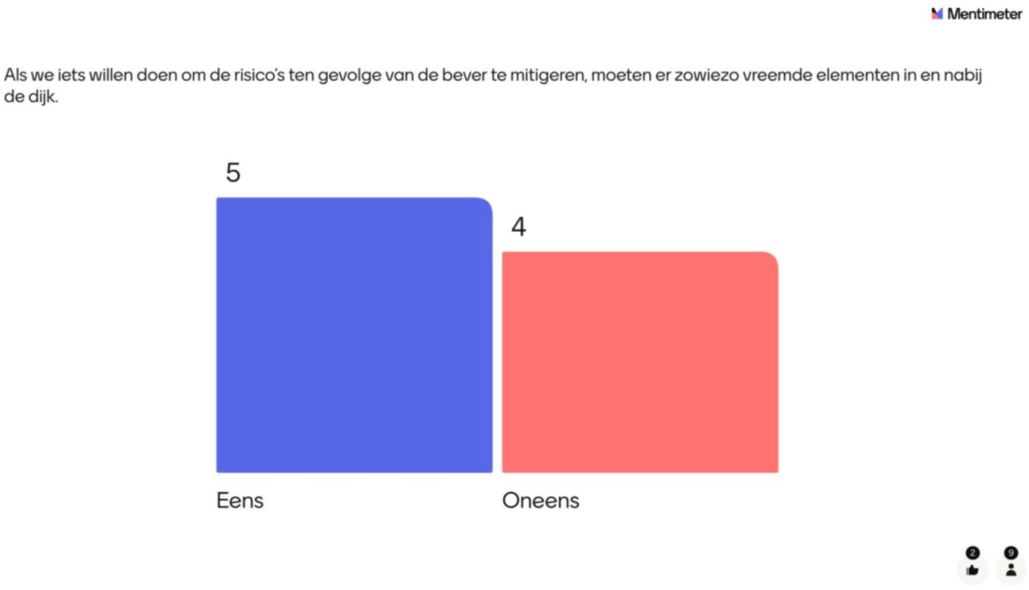
b. “Een kabel veroorzaakt holle ruimtes en schade en onderhoudswerk.” De meningen zijn verdeeld. Tom en anderen wijzen erop dat kabels dun zijn (en bij goede aanleg beperkt ingrijpen). Tegelijk geven Peter van Dijk en Peter Boone aan dat een aangebracht systeem over decennia onderhoud vergt en dat risico’s en vervangbaarheid onderdeel zijn van de afweging. De stelling wordt als te breed ervaren (aanleg versus beheer over de levensduur), maar levert wel relevante aandachtspunten op.



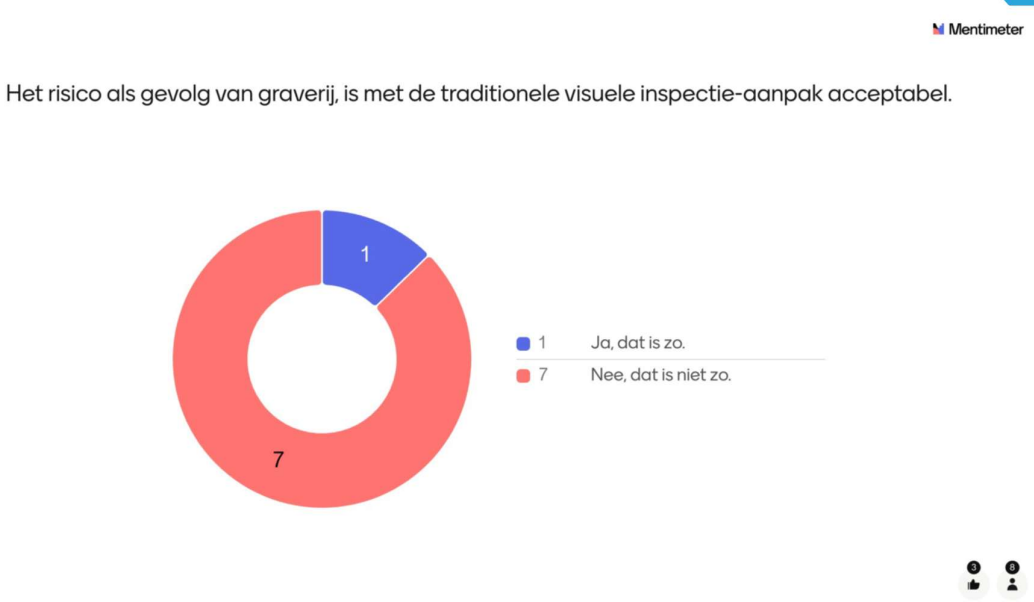
c. “We hebben alleen maar last van vreemde elementen in onze dijken.” Peter van Dijk stemt in vanuit de interpretatie dat “vreemd” gelijkstaat aan “onbekend”: zolang iets onbekend is, geeft het beheerlast omdat veiligheid beoordeeld moet worden. Oscar is het daar juist mee oneens: dijken bevatten al veel elementen en dat is vaak functioneel; “vreemd” betekent niet automatisch “problematisch”.



d. “Als we iets willen doen om de risico’s ten gevolge van de bever te mitigeren, moeten er zowiezo vreemde elementen in en nabij de dijk.” Reindert is het eens en noemt dat vrijwel elke maatregel (monitoring, constructief, preventief) een extra element toevoegt. Wijnand is het oneens en brengt populatiebeheer als alternatief in: ook dat is mitigatie, maar zonder extra objecten in de dijk.



e. “Het risico als gevolg van graverij is met de traditionele visuele inspectieaanpak acceptabel.” De deelnemers geven aan dat dit sterk locatieafhankelijk is. Marijke stelt dat het bij haar waterschap acceptabel is, omdat bevers niet in de dijk worden waargenomen en de situatie (ondiepe kwelsloten, inspectie en muskusrattenbestrijding) relatief goed beheersbaar is. Tom de Gast geeft aan niet te stemmen omdat risico een combinatie is van kans en gevolg, en hij daarvoor te weinig informatie heeft. Tom voegt toe dat visuele inspecties ook waarde hebben omdat sporen van aanwezigheid worden gezien; sensortechniek zal dit niet volledig vervangen. Peter Boone merkt op dat glasvezel mogelijk wel kabelbreuk kan detecteren als er doorheen geknaagd wordt, maar dat dit dan direct het systeem zelf raakt.



5 Inventarisatie: praktische voorwaarden en belemmeringen

Na de stellingen inventariseert de groep voorwaarden waaronder glasvezelmonitoring praktisch uitvoerbaar is. Genoemde voorwaarden zijn onder meer:

- Internet is beschikbaar
- Beschermde omgeving apparatuur: hufterproof/molestproof/etc.
- Electriciteit
- Klic
- Bevergebied
- Voldoende diep (tegen beschadiging onderhoudswerkzaamheden)
- Referenties voor detectie/filtering
- Interferentie uit de omgeving: hoe en wat?
- Waarom proef in de dijk? Waarom niet elders? Vooroever? Oftewel: ijklocaties zoeken.
- Vergunning eigen werk/verordening aansluiten
- Overweging welk type dijk: gevoelige dijk (dus niet volledig klei, met zandkern)
- Weg aanwezig? Of niet?
- Locatie moet goed toegankelijk zijn
- Handelingsperspectief bij detectie van graverij
- Locatie moet enige tijd gunnen om de bever even z'n gang te laten gaan
- Ontsluiting data: dashboard vooraf inregelen met signalerings-/alarmeringswaarden
- Mensen, middelen, €, etc.
- Actief aanhaken ProRail
- Marijke: de berg data is goed te filteren.
- Maak gebruik van reeds bestaande, aanwezige glasvezel

Tom benoemt expliciet de noodzaak om de data-ontsluiting, analyse en dashboards vooraf goed te regelen, vanwege grote datastromen. Marijke brengt praktijkervaring in: bij hun toepassing ontvangt het uitvoerende bedrijf alle ruwe data en krijgt de beheerder vooral rapportages en meldingen op afgesproken alarmdrempels. Daarmee hoeft de beheerorganisatie niet zelf alle ruwe data te verwerken, mits alarm- en signaleringswaarden helder zijn vastgelegd.

Reindert vraagt of interferentie kan optreden door andere bronnen of infrastructuur. De groep stelt dat dit nader onderzocht moet worden, maar dat ProRail ervaring heeft in omgevingen met veel kabels en trillingen. Tom merkt op dat achtergrondtrillingen mogelijk ook benut kunnen worden, bijvoorbeeld door veranderingen in trillingspatronen te relateren aan stijfheidsveranderingen.

Wijnand stelt voor om in een vroege fase eerst te testen op locaties met structureel veel graafactiviteit, bijvoorbeeld in vooroevers, zodat data sneller beschikbaar is en niet gewacht hoeft te worden op specifieke hoogwatersituaties.

Hanneke wijst op het belang van voldoende mensen en expertise, mede omdat interrogators kostbaar zijn en interpretatie specialistische kennis vraagt. Ook adviseert zij om ProRail actief aan te haken vanwege hun ervaring.

Vervolgens benoemt de groep belemmeringen die de toepassing kunnen hinderen:

- Gevoelig voor breuk
- Dijken vullen met glasvezel, door bestaande systemen?
- Kosten
- Datahoeveelheid
- Data-interpretatie (in drukke omgeving, achtergrondruis)
- Betrouwbaarheid informatie
- Aantal fte voor elkaar krijgen, capaciteit, kunde, etc.
- Verschillen in toestand kering (seizoensafhankelijk, vocht, temperatuur, etc.)
- Aanleg: wat haal je overhoop?
- Wanneer is de dijk weer op sterkte?
- Is de dijk aanpasbaar aan de aanwezigheid van glasvezelkabel?
- Systeem einde levensduur? Voldoende lang?

6 Wrap up

Wordt overgeslagen omwille van de tijd.

7 Afronding en vervolg

Ruben vraagt hoe de terugkoppeling plaatsvindt. Frank geeft aan dat de presentatie met de ingevulde inventarisaties gedeeld zal worden, bij voorkeur inclusief de Mentimeterresultaten. Joost benadrukt dat het traject uit “veel kleine stapjes” bestaat en dat de uitkomsten van het plan van aanpak en sectorfeedback bepalend zijn: als blijkt dat het niet haalbaar of niet zinvol is, moet dat eerlijk worden geconcludeerd. Tegelijk verwacht hij dat een volledige uitrol richting tien jaar kan gaan, mede door de openstaande vragen rondom data, techniek, organisatie en beheer.

Reindert vraagt de deelnemers om ook binnen hun eigen netwerk rond te kijken naar mogelijke partijen en ambassadeurs die willen aanhaken, met het oog op voldoende draagvlak en financiering voor een serieuze pilot en ontwikkeltraject.

Peter van Dijk voegt nog toe dat een proof of concept op korte termijn lastig kan zijn binnen organisaties en dat het lastig is de baten te onderbouwen zolang handelingsperspectief en

maatregelen niet duidelijk gekoppeld zijn. Wouter benadrukt dat belemmeringen ook gezien kunnen worden als randvoorwaarden voor succes: door ze scherp te formuleren, kan het project gericht toewerken naar oplossingen.

Frank sluit om 14:36 de bijeenkomst af met dank aan alle deelnemers voor hun bijdrage, en wenst iedereen fijne dagen.

Bijlage 8 Kosten schade door bevers

Tabel 23 Overzicht kosten van onderhoud en inspectie gerelateerd aan bever graverij (bron: email H. Kloosterboer aan R. Stellingwerff, 4 december 2025).

