

VERKENNING ERT-METINGEN VOOR HET METEN EN MONITOREN VAN BEVERGANGEN



RAPPORT

2026

11

VERKENNING ERT-METINGEN VOOR HET METEN EN
MONITOREN VAN BEVERGANGEN

RAPPORT

2026

11

ISBN 978.94.6479.134.1



COLOFON

Amersfoort, februari 2026

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Jacoline van Loon (BZ ingenieurs en managers)
Karel Hagemans (BZ ingenieurs en managers)
Serkan Elgun (Fugro)
Olivier Winkel (Fugro)
Tirza Schaffers (Fugro)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE
Hanneke Kloosterboer (STOWA / Waterschap Aa en Maas)
Kees Schep (STOWA / Waterschap Rivierenland)
Oscar van Dam (STOWA)

FOTO OMSLAG Edwin Giesbers
VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2026-11
ISBN 978.94.6479.134.1

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

Gravende bevers en dassen hebben een positieve ecologische impuls op een natuurlijker inrichting van het landschap en het vergroten van de biodiversiteit. Tegelijkertijd komen graverijen door bevers en dassen in dijken steeds vaker voor, wat risico's oplevert voor de stabiliteit en veiligheid van waterkeringen. Waterbeheerders beschikken inmiddels over meer kennis van het natuurlijke gedrag van deze dieren, waardoor inspecties gericht kunnen plaatsvinden. Desondanks blijft monitoring kostbaar en arbeidsintensief.

Dat vraagt om de ontwikkeling van efficiënte en effectieve meet- en monitoringstechnieken. STOWA riep in 2024 op kansrijke technieken aan te melden. Dit rapport beschrijft een proof-of-concept (PoC) van een detectietechniek, die *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) combineert met *handheld* lidarmetingen. Daarbij werd ERT gebruikt als detectie- en signaleringsmethode en lidar als referentie- en validatietechniek om de ligging, diepte en omvang van een beverhol te achterhalen. De lidarmeting leverde een gedetailleerd driedimensionaal beeld op waarmee het hol zichtbaar werd.

De resultaten laten zien dat ERT ondergrondse graverij van bevers betrouwbaar kan detecteren. Ook bevatten de ERT-profielen informatie over de lithologische opbouw en de grondwaterverzadiging van de ondergrond, waarmee dijkbeheerders een risicobeoordeling kunnen uitvoeren. De combinatie van ERT en lidar is dan ook een veelbelovende en niet-destructieve techniek voor de opsporing van bevergraverijen, met mogelijkheden voor langjarige in situ monitoring. Om de toepasbaarheid van ERT verder te toetsen, bevelen de onderzoekers aan een langjarig veldexperiment uit te voeren en een gestandaardiseerd ERT-meet- en monitoringsprotocol op te stellen voor de detectie van bevergraverijen.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft een proof-of-concept-onderzoek (PoC) naar de toepasbaarheid van Electrical Resistivity Tomography (ERT), in combinatie met handheld lidar, voor het detecteren en monitoren van bevergraverijen in en nabij dijken. Aanleiding voor het onderzoek is de toenemende aanwezigheid van bevers en de daarmee samenhangende risico's voor de stabiliteit en veiligheid van waterkeringen. Ondergrondse graverijen kunnen leiden tot verzwakking van de dijk en een verhoogde kans op faalmechanismen zoals erosie, piping en macrostabiliteit.

In het PoC-onderzoek zijn de technische haalbaarheid en betrouwbaarheid van ERT als detectie- en signaleringsmethode verkend. Daarbij is lidar ingezet als referentie- en validatietechniek. De aanpak bestond uit: locatiebepaling en -inventarisatie, het uitvoeren van forward modelling ter voorbereiding op de ERT-metingen, veldmetingen met ERT en handheld lidar en de analyse en integratie van de meetresultaten.

De handheld-lidarmeting heeft een gedetailleerd driedimensionaal beeld opgeleverd, georeferereerd met RTK GPS, van de ligging, diepte en omvang van het beverhol. Deze meting is gebruikt als referentie voor de interpretatie van de ERT-data. De ERT-metingen, uitgevoerd met twee profielen loodrecht op het verwachte tracé van de bevergang en georeferereerd met RTK GPS, tonen een duidelijke hoogweerstandsafwijking op de locatie van het beverhol. Deze afwijking komt overeen met de door lidar vastgestelde ligging van de gang en wordt geïnterpreteerd als een luchtgevulde holte in een verder verzadigde ondergrond.

De resultaten laten zien dat ERT in staat is om bevergraverijen in de ondergrond betrouwbaar te detecteren, mits de bodemopbouw geschikt is en versturende elementen beperkt aanwezig zijn. Daarnaast geven de ERT-profielen inzicht in de lithologische opbouw en de grondwaterverzadiging van de ondergrond, wat waardevolle aanvullende informatie oplevert voor dijkbeheer en risicobeoordeling. De overeenkomsten tussen de meetresultaten en de vooraf uitgevoerde forward modelling bevestigen dat forward modelling een effectieve stap is om de kansrijkheid van ERT-metingen vooraf te beoordelen.

Op basis van het onderzoek wordt geconcludeerd dat ERT een veelbelovende techniek is voor het detecteren van bevergraverijen. Lidar blijkt zeer geschikt als validatiemethode en referentie voor ERT-metingen. Het Proof of Concept is geslaagd en toont aan dat ERT potentie heeft als signalerings- en monitoringsinstrument, ook met het oog op langjarige in situ monitoring.

Tot slot wordt aanbevolen om een langjarige pilot-veldexperiment uit te voeren, een gestandaardiseerd meet- en monitoringsprotocol op te stellen voor ERT-monitoring ten behoeve van het detecteren van bevergraverijen. Omgevingsfactoren zoals bodemopbouw, grondwaterstanden en weersomstandigheden worden hierin meegenomen. Deze vervolgstappen zijn noodzakelijk om de overweging ten aanzien van structurele toepasbaarheid van ERT voor monitoring van bevergraverijen in de praktijk.

STOWA IN HET KORT

KENNIS OVER WATER, VOOR NU ÉN LATER

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer – kortweg STOWA – is het kennisplatform van regionale waterbeheerders in Nederland. Vanuit ons kantoor in Amersfoort werken we aan het ontwikkelen, verzamelen, verspreiden en implementeren van toegepaste kennis. Die kennis hebben waterbeheerders nodig om de opgaven waar zij voor staan, goed uit te kunnen voeren. Of het nu gaat om klimaatadaptatie (zowel stedelijk als landelijk gebied), een goede waterkwaliteit, duurzame en effectieve afvalwaterzuivering, veilige dijken en kaden, energietransitie of circulaire economie.

Het soort kennis dat wij ontwikkelen, is breed: technisch en natuurwetenschappelijk, maar soms ook bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk. Om te zorgen dat die kennis maximaal kan worden toegepast in de praktijk, presenteren we onze onderzoeksresultaten indien mogelijk in de vorm van praktische handreikingen, tools en instrumenten. Ook faciliteren we met het oog op kennisdoorwerking Communities of Practice en organiseren we daarvoor allerlei bijeenkomsten en webinars. Via onze eigen en andermans media geven we uitleg over de achtergronden bij ons werk.

STOWA werkt vraaggestuurd. We inventariseren welke kennisvragen waterbeheerders hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers: universiteiten, kennisinstituten, kennisbedrijven of adviesbureaus. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van gezamenlijke kennisprojecten op ons. Maar wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de projectresultaten de deelnemers praktische handelingsperspectieven bieden. Ieder project wordt om die reden begeleid door een commissie waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden vastgesteld door programmacommissies, waar waterbeheerders ook zitting in hebben.

STOWA is onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan waterbeheerders te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast een cijfermatige jaarrekening ook een directieverslag opgenomen over de stichting en haar activiteiten. Het budget bedraagt jaarlijks ongeveer 20 miljoen euro. Onze deelnemers leggen gezamenlijk ieder jaar ongeveer 10 miljoen in als structurele bijdrage. Daarnaast ontvangen we jaarlijks ongeveer 10 miljoen euro in de vorm van bijdragen aan afzonderlijke projecten.

VERKENNING ERT-METINGEN VOOR HET METEN EN MONITOREN VAN BEVERGANGEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	2
1.3	Beoogde resultaten	2
1.4	Leeswijzer	2
2	WERKWIJZE	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Fase 1: Locatie bepaling, inventarisatie bodemopbouw, eerste lidarmeting.	4
2.3	Fase 2: Forward modelling	5
2.4	Fase 3: Go – no go beslissing	5
2.5	Fase 4: Veldmetingen	5
2.5.1	Handheld lidar	5
2.5.2	ERT-meting	6
2.6	Fase 5: Analyse, rapportage en conclusies	8
2.6.1	Dataprocessing	8
2.6.2	Analyse, rapportage en conclusies	8
3	BEPALEN PROEFLOCATIE	9
3.1	Onderzoekslocatie Olburgen	9
3.2	Onderzoekslocatie Haren	9
4	RESULTATEN	10
4.1	Inleiding	10
4.2	Resultaat Forward modeling	10
4.3	Resultaten veldwerk Haren	11
4.3.1	Resultaten lidarmeting	11
4.3.2	Resultaten ERT-metingen	12
4.3.3	Geïntegreerde resultaten ERT-meting en Lidarmeting Haren	14

5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	16
5.1	Inleiding	16
5.2	Conclusies	16
5.3	Aanbevelingen	17
6	VERVOLG PROOF OF CONCEPT: MONITORING IN PRAKTIJK	19
6.1	Inleiding	19
6.2	Doelstellingen	19
6.3	Werkwijze/stappenplan	19
6.4	Monitoringsopstelling	19
6.5	Meekoppelkansen	21
6.6	Nader te onderzoeken aspecten	21
	BIBLIOGRAFIE	22
	BEGRIPPENLIJST	23
BIJLAGE 1	THEORY ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT)	25
BIJLAGE 2	COÖRDINATEN ERT EN BOORPUNTEN	27
BIJLAGE 3	RESULTATEN LIDARMETING BEVERHOL HAREN	28
BIJLAGE 4	RESULTATEN ERT METING HAREN	30
BIJLAGE 5	GEÏNTEGREERDE RESULTATEN ERT- EN LIDARMETING HAREN	32
BIJLAGE 6	RESULTATEN ERT-METING OLBURGEN	34

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Dierlijke graverijen in dijken kunnen de sterkte van de dijken negatief aantasten. Uit overloopproeven in de Hedwige-Prosperpolder (project Polder2C's) is gebleken dat de kwaliteit en sterkte van de afdekkende kleilaag met grasmat hard achteruitgaat wanneer deze beschadigd of doorboord worden. Ook de kans op falen (erosie, macrostabiliteit, piping, etc.) kan sterk toenemen door de verandering van het intredepunt van water als gevolg van dierlijke graverijen. Voorbeelden graafdieren die dijken beschadigen en steeds vaker voorkomen zijn bevers en dassen. Omdat het effect van graverijen door deze dieren op de sterkte van de dijk zo groot kan zijn, is het van groot belang om deze graverijen te detecteren en te monitoren: wanneer en waar treden ze op? Hoe groot/ernstig zijn de graverijen? Brengen ze de (actuele) waterstaatkundige toestand van de dijk in gevaar?

Graverijen van bevers en dassen in dijken komen steeds meer voor. Het is steeds beter bekend wat aantrekkelijke locaties zijn voor deze dieren. Voor dit soort locaties is het van belang om op graverijactiviteiten te inspecteren. Wanneer graverijen plaatsvinden is het van belang de graafactiviteiten van het dier in de gaten te houden en mogelijk de omvang van de graverijen (door de tijd heen) te bepalen. Zeker in relatie tot de dijken. Tijdens de Kennisdag instandhouding waterkeringen van 2024 is door STOWA de oproep gedaan om kansrijke meet- en monitoringstechnieken aan te melden voor praktijkonderzoek. Fugro en BZ Ingenieurs & Managers hebben gezamenlijk de combinatie Electrical Resistivity Tomography (ERT)-handheld lidarmetingen ontwikkeld voor de detectie en monitoring van bevergraverijen.

Deze rapportage beschrijft de resultaten van de verkenning van de mogelijkheden van het inzetten van ERT-metingen gecombineerd met handheld lidar voor het in kaart brengen en monitoren van de graafactiviteiten van de bever in of in de buurt van dijken. Voor een gedetailleerde beschrijving van ERT en de achterliggende theorie achter deze techniek kan bijlage 1 geraadpleegd worden.

Dit project is aangepakt als een 'Proof of Concept' (PoC) voor de toepasbaarheid van ERT-metingen, in combinatie met handheld lidar, voor de detectie en monitoring van bevergraverijen.

De resultaten van de pilotlocatie(s) worden beoordeeld. Hierna kan bepaald worden of de technieken geschikt en of toepasbaar zijn voor het meten en monitoren van bevergraverijen en kan er bepaald worden of er kansen zijn voor opschaling.

1.2 DOEL

Het doel van dit project is als eerste het leveren van een proof of concept van de toepasbaarheid van ERT voor het meten/detecteren van bevergraverijen. De volgende deeldoelstellingen zijn geformuleerd:

- Het bepalen van de toepasbaarheid van ERT-metingen bij het meten van de locatie en omvang van het beverhol. Hiervoor worden handheld lidarmetingen gecombineerd met de ERT-metingen ter validatie van de ERT-metingen. Tegelijkertijd kunnen de ERT-metingen gebruikt worden voor het kiezen van de locatie van de boring voor het meten met lidar.
- Het bepalen van de toepasbaarheid van ERT-metingen als signaleringsmethode (ook voor lange termijn in-situ monitoring). Bijvoorbeeld door het trekken van een rode lijn waar bevers niet overheen mogen en die actief monitoren.

Na een succesvol PoC kan worden bepaald hoe ERT-metingen kunnen worden ingezet voor langjarige monitoring en welke stappen nodig zijn om hier te komen.

1.3 BEOOGDE RESULTATEN

De beoogde eindresultaten zijn:

- Een overzicht van de toepasbaarheid van ERT-metingen in combinatie met handheld lidar voor het langjarig monitoren van bevergraverijen.
- Het in 3D weergegeven beeld van het gemonitorde beverhol, gegeorefereerd.

Op verzoek van de opdrachtgever zijn de stappen bepaald die benodigd zijn om tot de inzetbaarheid van ERT- en handheld lidar-metingen als langjarige monitorings- en signaleringstechniek voor de detectie van bevergraverijen, inclusief de mogelijkheden voor opschaling te komen.

1.4 LEESWIJZER

In dit rapport wordt het onderzoek naar de toepassing van ERT en handheld lidar voor het detecteren en monitoren van bevergraverijen stap voor stap uiteengezet. Het document start in hoofdstuk 2 met de gehanteerde werkwijze. In dit hoofdstuk worden de verschillende onderzoek stappen beschreven, waaronder de locatiebepaling en -inventarisatie, forward modelling, de uitvoering van de veldmetingen en de analyse en rapportage.

Hoofdstuk 3 gaat nader in op de locatiebepaling en inventarisatie. Eerst worden de locatie-eisen toegelicht, gevolgd door een beschrijving van de onderzochte locaties Doeveren en Olburgen, die in de loop van het onderzoek niet geschikt bleken als proof of concept-locatie. Vervolgens wordt de uiteindelijke onderzoekslocatie in Haren beschreven, inclusief de relevante kenmerken en uitgangspunten voor het veldonderzoek.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de forward modelling van de onderzoekslocatie bij Olburgen gepresenteerd. Hierbij wordt uiteengezet hoe het model is opgebouwd en welke inzichten deze geven in de detecteerbaarheid van bevergraverijen met ERT. Voor de locatie Haren is geen afzonderlijk forward model opgesteld, omdat de bodemopbouw overeenkomt met de eerder gemodelleerde locaties. Verder worden in dit hoofdstuk de resultaten van de uitgevoerde metingen gepresenteerd.

Tot slot bevat hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen. Hier worden de belangrijkste bevindingen van het onderzoek samengevat en worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek en de mogelijke doorontwikkeling van ERT als structurele monitorings-techniek. De theoretische achtergrond van ERT, aanvullende resultaten en uitwerkingen zijn opgenomen in de bijlagen.

2

WERKWIJZE

2.1 INLEIDING

De werkwijze is in de volgende stappen onderverdeeld:

- | | |
|---------|---|
| Fase 1) | Locatie bepalen en inventariseren, bepalen bodemopbouw en eerste handheld lidar meting (paragraaf 2.1) |
| Fase 2) | Forward modelling ter bepaling van de kansrijkheid van ERT-metingen op de beoogde veldlocatie (paragraaf 2.2) |
| Fase 3) | Go - no go: Beslissen over het veldwerk op basis van de resultaten van forward modelling (paragraaf 2.3) |
| Fase 4) | Veldmetingen (paragraaf 2.4) |
| Fase 5) | Analyse, rapportage en conclusies (paragraaf 2.5) |

2.2 FASE 1: LOCATIE BEPALING, INVENTARISATIE BODEMOPBOUW, EERSTE LIDARMETING.

Om tot een geschikte locatie voor de pilot te komen, zijn een aantal functionele specificaties opgesteld gebaseerd op vereisten voor het goed kunnen uitvoeren van het proof of concept met ERT- en handheld lidarmetingen:

- De ingang van het beverhol en/of een punt in het beverhol is bekend of kan relatief eenvoudig met eenvoudig veldwerk ter plaatse worden bepaald.
- De locatie van het maaiveld waaronder de bevergang zich bevindt, is in het veld redelijk goed bereikbaar. Voor het uitvoeren van een pilotproject en proof of concept is dit van belang.
- Handmatige grondboringen kunnen op locatie worden uitgevoerd (NB: dus met enige zekerheid waren er geen dikke grindlagen aanwezig).
- De bodemopbouw is globaal als volgt:
 - deklaag van klei met
 - daaronder zandige klei, kleiig zand of siltig zand waarin de bevergang zich bevindt.

Na het bepalen van de locatie, is een locatiebezoek uitgevoerd. Het is van belang om de bodemopbouw in beeld te hebben ten behoeve van de forward modelling. In eerste instantie is de beschikbare bodemopbouw online bepaald via onder andere de BRO-database. Een locatiebezoek wordt uitgevoerd en handboringen worden hierbij gezet waarbij een boorprofiel wordt opgesteld. De aldus verkregen boorprofielen worden gebruikt bij het uitvoeren van de forward modelling.

Tijdens het eerste locatiebezoek wordt eveneens een eerste handheld lidarmetingen uitgevoerd. Met deze metingen wordt een eerste inschatting gemaakt van de omvang en het verloop van het gangenstelsel. Dit vormt eveneens input voor de forward modelling.

2.3 FASE 2: FORWARD MODELLING

Met forward modelling (een modelberekening) wordt van een beoogde projectlocatie een model opgesteld van de ondergrond, waarin de verwachte elektrische weerstanden van de verschillende bodemlagen en holle structuren worden gesimuleerd. Vervolgens wordt berekend welke theoretische meetwaarden zouden ontstaan bij verschillende ERT-opstellingen. Door deze berekeningen te vergelijken met de werkelijke veldsituatie, kan worden bepaald:

- of de verwachting reëel is dat het gangenstelsel met ERT kan worden gedetecteerd;
- welke ERT-opstelling het meest geschikt is (soort opstelling en beste elektrode afstand);
- wat de verwachte resolutie is, en waar beperkingen liggen.

De kansrijkheid van succesvolle veldmetingen is dus met forward modelling bepaald.

2.4 FASE 3: GO – NO GO BESLISSING

De resultaten van de locatiebepaling en de uitgevoerde forward modelling zijn besproken met de opdrachtgever en hebben geleid tot een positief besluit over het vervolg van het project.

2.5 FASE 4: VELDMETINGEN

2.5.1 HANDHELD LIDAR

De handheld lidar-metingen zijn uitgevoerd op 9 september 2025. De locatie van de bevergang en -burcht is in beeld gebracht met behulp van het gerichte locatieinspectie (prikstokken, handmatig uitgevoerd) om bevergangen en de burcht te lokaliseren. Na een eerste inschatting van de richting te hebben bepaald zijn handboringen uitgevoerd die tot in de gang rijden. Via de boorgaten is vervolgens de lidarmeting uitgevoerd. De meetresultaten zijn op locatie verwerkt. Op basis van de lidarmeting is vervolgens bepaald in welke richting de bevergang zich ontwikkelt. Daarna is een nieuwe bepaling (met prikstok) uitgevoerd op een afstand van ongeveer 3 meter van de eerdere handboring in de richting van de bevergang. Vervolgens is na succesvolle nieuwe boring de bevergang of -burcht opnieuw ingemeten. Deze werkwijze is herhaald totdat de burcht volledig in beeld was.

Het maaiveld en de omgeving van de dijk zijn ingemeten met als doel een compleet beeld van de situatie te kunnen geven van de bevergraverij ten opzichte van de dijk. De metingen zijn geogerefeerd met RTK GPS binnen het coördinatenstelsel RD New en met NAP als verticale referentie. Hiermee zijn de diepte van de gangen onder het maaiveld eveneens bepaald.

De boorgaten zijn vervolgens dichtgemaakt met een houten plank en terugplaatsing van de afgestoken zode. Als voorbereiding op de ERT-meting die de volgende dag uitgevoerd werd, zijn gele vlaggetjes en piketpaaltjes uitgezet ter indicatie van de locatie van de boorgaten en het verloop van de bevergang.

Onderstaand zijn enkele foto's opgenomen die zijn genomen tijdens de uitvoering van de lidar-metingen.

Foto 1 en 2

Op de foto's 1 en 2 is zichtbaar hoe het beverhol is uitgezet met behulp van de prikstok en lidar. De gele vlaggetjes geven het verloop van het hol aan. De gekleurde ballen zijn referentiepunten voor de lidar-meting



2.5.2 ERT-METING

De ERT-meting is in het veld uitgevoerd op 10 september 2025 en omvat de acquisitie van twee ERT-profielen, haaks op het verwachte tracé van de bevergang. Elk profiel is opgezet met 64 elektroden, geplaatst met een onderlinge afstand van 0,50 meter, wat resulteert in een totale lengte van 31,5 meter per profiel. De metingen zijn verricht met behulp van het Tigre Campus ERT-systeem.

De voor dit project gehanteerde acquisitieparameters zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1

ERT-metparameters/apparatuur

Parameter	Beschrijving
Apparatuur	Tigre Campus ERT-systeem
Meet protocol	Wenner-Schlumberger
Aantal elektroden	64
Elektrode afstand	0.50 m
Diepte van het onderzoek	Ca. 3.0 m-MV

Voor het uitvoeren van de ERT-metingen zijn stalen elektroden langs elk profiel geplaatst met een onderlinge afstand van een halve meter. De elektroden zijn verbonden met meeraderige kabels via krokodilklemmen, waarbij elke kabel is aangesloten op de Tigre-systeem. Voorafgaand aan de metingen is een kwaliteitscontrole uitgevoerd om te verifiëren dat de contactweerstand van alle elektroden binnen een realistisch bereik vallen. Indien een elektrode een onaanvaardbaar hoge contactweerstand vertoonde, werd de verbinding tussen kabel en elektrode gecontroleerd, evenals de koppeling van de elektrode met de ondergrond. In dergelijke gevallen is de elektrode verplaatst en/of verzadigd met water om de weerstand te verlagen.

Er zijn twee ERT-profielen gerealiseerd, beide met een zuidoost-noordwest-oriëntatie en op een onderlinge afstand van circa 1,10 meter. Deze oriëntatie is gekozen om loodrecht te staan op het verwachte verloop van de bevergang. De exacte locaties van de ERT-profielen zijn ingemeten met behulp van RTK-GPS, binnen het coördinatenstelsel RD New en met NAP als verticale referentie.

De data-acquisitie is automatisch gecontroleerd aan de hand van specifieke meetprotocol-bestanden, die zijn ontworpen om aan de onderzoeksdoelstellingen te voldoen. Voor dit

project is gebruikgemaakt van een Wenner-Schlumberger-opstelling. De gemeten elektrische weerstanden zijn opgeslagen op de veldcomputer.

Onderstaand zijn enkele foto's opgenomen die zijn genomen tijdens de uitvoering van de ERT-metingen.

Foto 3 en 4 Enkele representatieve foto's gemaakt tijdens de uitvoering. 3) De gele vlaggetjes markeren de loop van het beverhol



ALGEMEEN OVERWEGINGEN ERT-METING

ERT-metingen zijn intrinsiek gevoelig voor zowel het vochtgehalte als de kleifractie in de ondergrond. De bodemopbouw beïnvloedt de gemeten elektrische weerstandswaarden, niet alleen door de aard en samenstelling van het bodemmateriaal, maar in het bijzonder door de aanwezigheid en eigenschappen van kleimineralen. De elektrische weerstand wordt namelijk mede bepaald door de geleidbaarheid van het elektrisch oppervlak van het poreuze medium. Bij kleimineralen speelt het specifieke oppervlak een cruciale rol, aangezien deze mineralen doorgaans een platte morfologie hebben, in tegenstelling tot de bolvormige structuur van zandkorrels. Deze morfologische verschillen leiden tot variaties in oppervlaktegeleiding, wat zich vertaalt in meetbare contrasten in elektrische weerstand binnen het bodemprofiel.

Het vochtgehalte van de ondergrond speelt een cruciale rol in de omvang van de gemeten elektrische weerstandswaarden. Onder verzadigde omstandigheden circuleert de elektrische stroom voornamelijk via de met water gevulde poriën, waardoor verzadiging een bepalende parameter is bij het interpreteren van ruimtelijke variaties in elektrische weerstand, met name in de diepte waar deze samenhangt met de grondwaterstand.

Samenvattend dragen de volgende fundamentele verschijnselen bij aan de waargenomen contrasten in elektrische weerstand:

- **Lithologische heterogeniteit:** Kleirijke sedimenten vertonen doorgaans lage elektrische weerstandswaarden (dus hogere geleidbaarheid), terwijl zandige lagen worden gekenmerkt door hogere waarden.
- **Grondwaterverzadiging:** De aanwezigheid van grondwater verlaagt de elektrische weerstand van de betreffende bodemlaag aanzienlijk. Hierdoor kan het voorkomen dat een kleilaag hogere weerstandswaarden vertoont dan een verzadigde zandlaag, ondanks de intrinsieke geleidbaarheid van klei.
- **Graverijen:** een graverij, in den droge, houdt in dat een deel van het bodemmateriaal is verwijderd en dat hiervoor lucht in de plaats is gekomen. Lucht heeft een zeer grote elektrische weerstand die met de ERT-metingen goed detecteerbaar wordt verondersteld.

Om de gemeten elektrische weerstandscontrasten betrouwbaar te kunnen interpreteren en kalibreren, is (aanvullend) bodemonderzoek—zoals sonderingen en/of handboringen—essentieel.

2.6 FASE 5: ANALYSE, RAPPORTAGE EN CONCLUSIES

2.6.1 DATAPROCESSING

De ruwe meetdata is onderworpen aan een filterproces om eventuele foutieve of onrealistische waarden te verwijderen. Vervolgens is de dataset geëxporteerd in een formaat dat compatibel is met de verwerkingssoftware (RES2DINV). Ter ondersteuning van een correcte interpretatie is het verloop van het maaiveldniveau langs elk ERT-profiel opgenomen, zodat hoogtecorrecties nauwkeurig konden worden toegepast tijdens de inversieprocedure.

De verwerking van de meetgegevens is uitgevoerd via een inversieproces, gericht op het genereren van een best-fitmodel dat de contrasten in elektrische weerstand binnen het onderzoeksgebied weergeeft. Het uiteindelijke model van de elektrische weerstand is geëxporteerd naar Oasis Montaj voor verdere visualisatie en analyse. De kleurcontourschaal is geselecteerd om een optimale presentatie van de data over de ERT-profielen te waarborgen. Deze schaal is consistent toegepast op beide profielen, zodat directe vergelijking mogelijk is.

2.6.2 ANALYSE, RAPPORTAGE EN CONCLUSIES

Na het inmeten van de locaties zijn de ingewonnen metingen geanalyseerd op het volgende:

- Allereerst zijn de ruwe ERT- en lidarmetingen verwerkt zodat de omvang en ligging van de gangen duidelijk werd;
- Hierna is de datavalidatie uitgevoerd: zijn er overeenkomsten of verschillen waargenomen tussen de geofysische meting en de lidarmeting?

Een eerste inschatting is uitgevoerd op verzoek van de opdrachtgever naar de mogelijkheden van uitrol naar grootschalige toepassing.

3

BEPALEN PROEFLOCATIE

In dit hoofdstuk zijn de locaties beschreven die voor het onderzoek zijn geselecteerd en beoordeeld.

3.1 ONDERZOEKSLOCATIE OLBURGEN

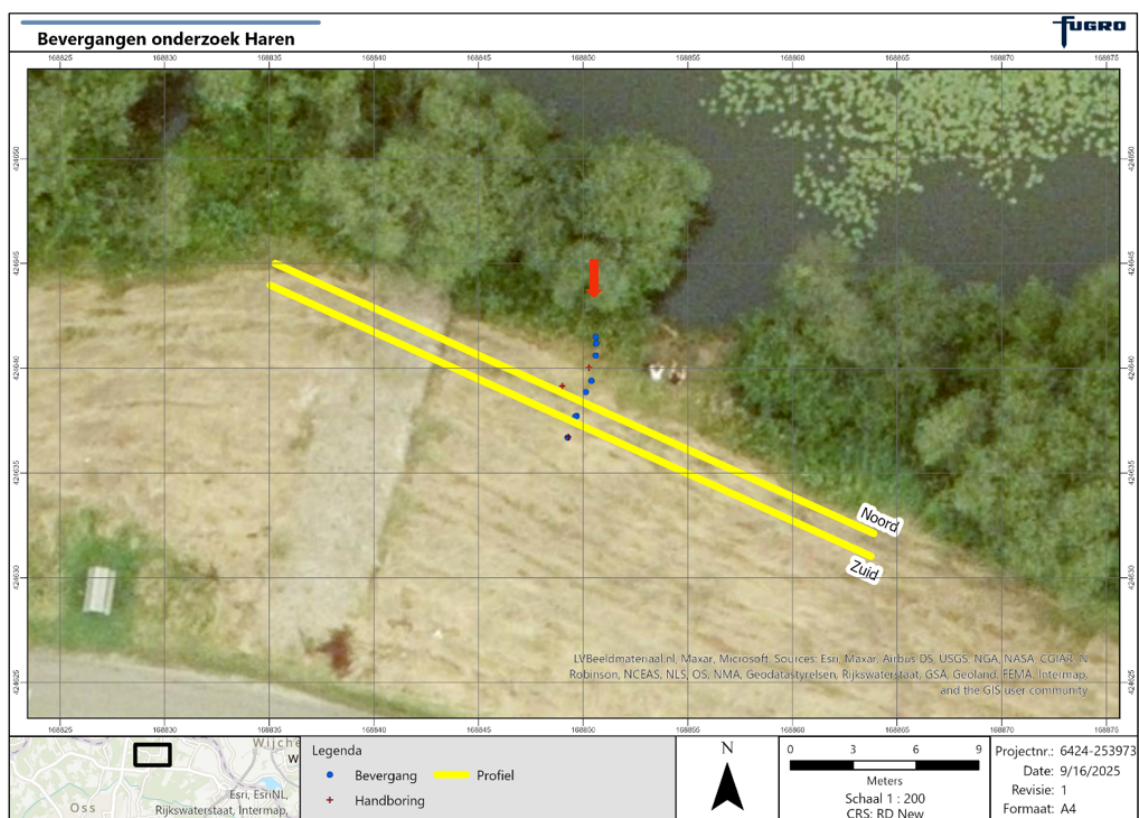
De onderzoekslocatie Olburgen bleek in de loop van het onderzoek beschikbaar maar na metingen uiteindelijk niet geschikt te zijn als Proof of Concept locatie. De resultaten zijn echter wel opgenomen in hoofdstuk 4.

Bij het eerste veldbezoek werd afval op het maaiveld aangetroffen: bakstenen en tapijresten.

3.2 ONDERZOEKSLOCATIE HAREN

De onderzoekslocatie bevindt zich ten noorden van Haren (Noord-Brabant), langs de Ravensteinsedijk. De ingang van de te detecteren bevergang ligt ten noorden van beide meetprofielen, nabij de waterlijn, zoals aangeduid met een neerwaartse rode pijl in figuur 1.

Figuur 1 Onderzoekopstelling projectlocatie Haren



De begin- en eindcoördinaten van de uitgevoerde ERT-profielen en boorpunten zijn te vinden in Bijlage 2.

4

RESULTATEN

4.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de uitgevoerde metingen bij de locatie in Haren. Na enkele algemene overwegingen zijn de afzonderlijke resultaten van de ERT- en Lidarmetingen opgenomen. Vervolgens zijn de lidar en ERT-resultaten geïntegreerd in één model om te verifiëren of de metingen goed op elkaar aansluiten en dus goed zijn uitgevoerd.

De resultaten van de ERT-profielen, de Lidar-meting en het geïntegreerd model zijn bijgevoegd respectievelijk in bijlagen 3, 4 en 5.

4.2 RESULTAAT FORWARD MODELING

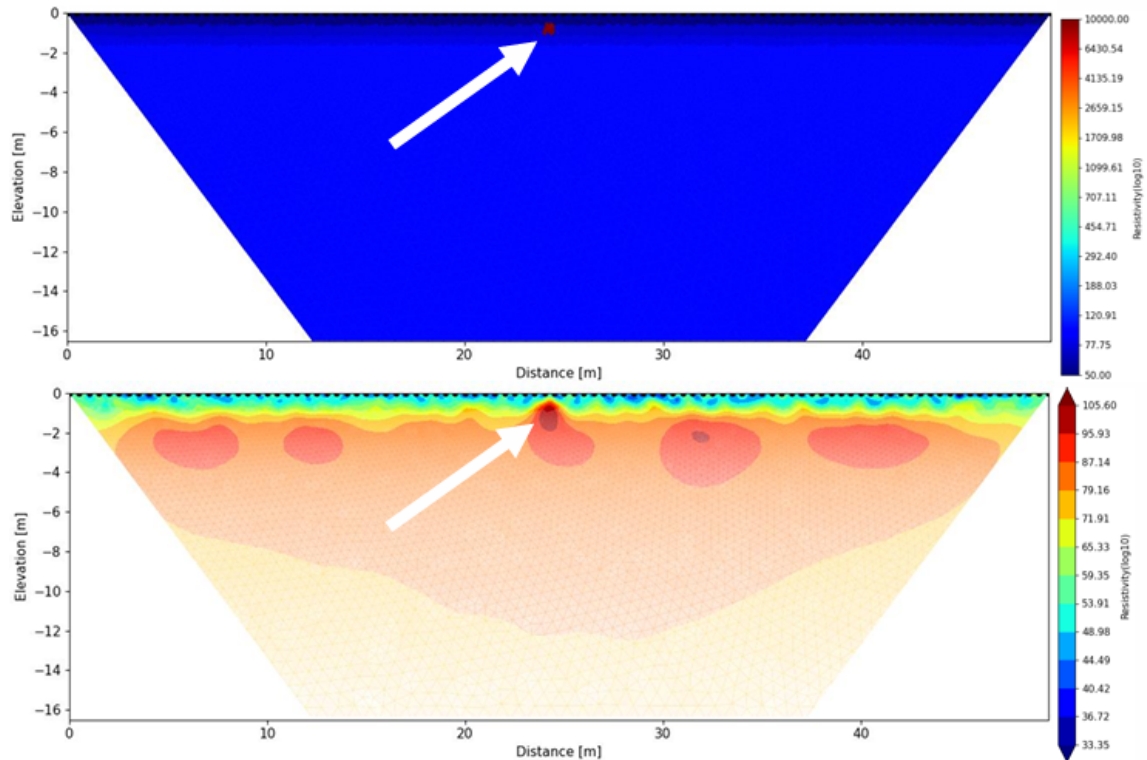
Deze paragraaf behandelt de uitvoering en resultaten van de forward modelling ter voorbereiding op de ERT-metingen.

NB: Voor de onderzoekslocatie bij Haren is geen forward model uitgevoerd. De reden hiervoor is dat de ondergrond overeenkomt met de aangetroffen ondergrond van de onderzoeklocatie bij Olburgen waarvoor wel een forward modelling-analyse is uitgevoerd.

Op basis van debodemopbouw bij Olburgen is in een forward model gebouwd, waarin de expressie van een bevergang op diepte in de ERT-data met het specifiek opgestelde protocol is berekend. Deze berekening is uitgevoerd met verschillende onderlinge elektrode afstanden om de meetconfiguratie te bepalen.

Daarnaast zijn verschillen in datakwaliteit gesimuleerd door 'ruis' toe te voegen aan het beginmodel, waarbij deze ruis geforceerde onsamenhangende afwijkingen in het beginmodel vormen. Het opgestelde forward model en de simulatie van de expressie van het beverhol van dit model in ERT-data zijn getoond in figuur 2.

In figuur 2 is het beginmodel opgenomen, opgebouwd uit een met diepte toenemende elektrische weerstand, waarbij de waarden corresponderen met een toplaag van (zanderige) klei, gevolgd door een zandpakket. De bevergang is gemodelleerd op een diepte van 0.8 m in het midden van het profiel, overeenkomstig met de bevindingen uit de handboringen op deze locatie. De onderste afbeelding is de gesimuleerde expressie van het model in de ERT-data, afgaand op het gebruik van 100 elektroden in de Dipool-Dipoolconfiguratie, met een onderlinge afstand van 0,5 m. Daarnaast is aan het begin model 5% ruis toegevoegd. In deze simulatie is duidelijk de bevergang te herkennen als een gebied met hoge weerstand, te midden van het slechter geleidende zandpakket. De diepte penetratie in deze opstelling is toereikend voor het meetdoel.

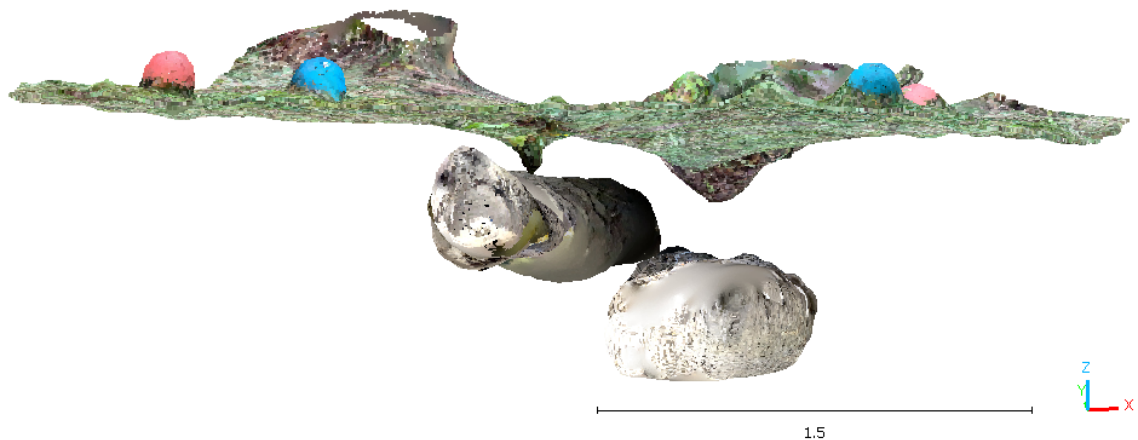
Figuur 2 Forward model Olburgen

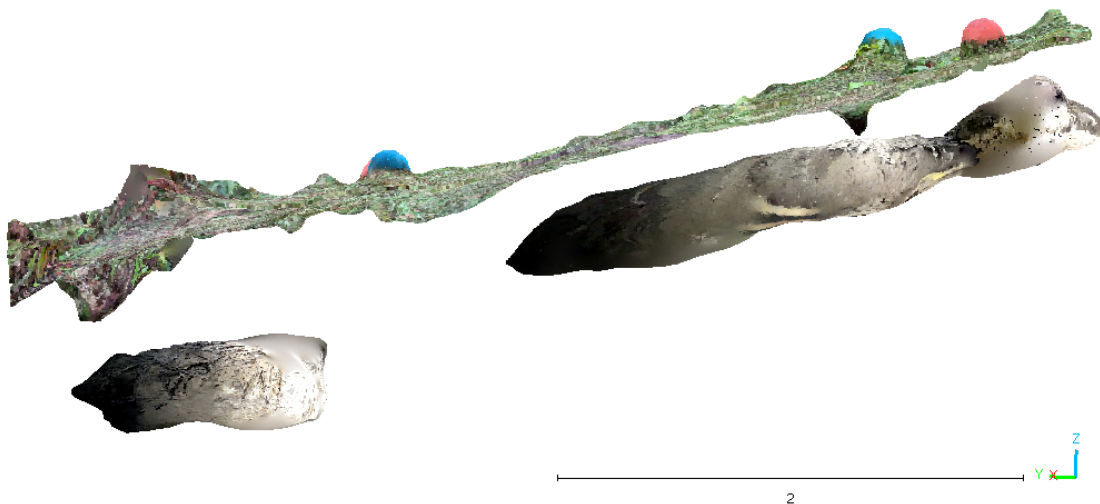
Zoals eerder aangegeven is dit een verwachting van de te meten expressie van de bevergang met de ERT-techniek, gebaseerd op beschikbare gegevens van de initiële onderzoekslocatie.

4.3 RESULTATEN VELDWERK HAREN

4.3.1 RESULTATEN LIDARMETING

In figuur 3 en 4 en in bijlage 3 zijn de resultaten van de uitgevoerde lidarmeting weergegeven. Daarin is te zien dat het beverhol uit verschillende delen bestaat. Dat kan erop duiden dat de gang gedeeltelijk is ingestort. In het bovenste gedeelte van het hol is een opening aanwezig. Deze opening kan een instorting zijn of het kan een nieuwe ingang zijn die door de bever is gemaakt.

Figuur 3 Vooraanzicht lidarmeting Haren

Figuur 4 Zijaanzicht lidarmeting Haren

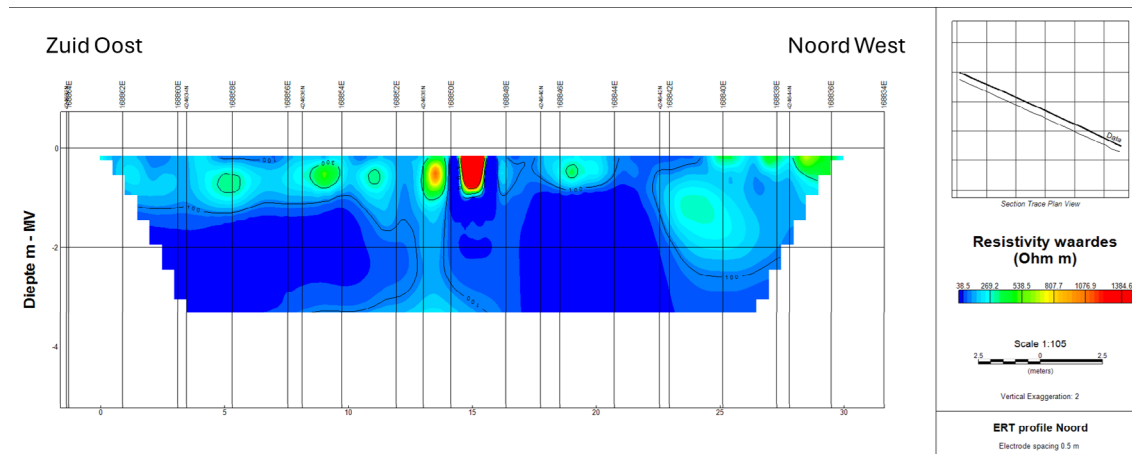
Van de uitgevoerde lidarmeting is een omvangbepaling uitgevoerd van het hol. In onderstaande tabel 2 is de omvangbepaling inclusief diepte van de bevergraverij opgenomen.

Tabel 2 Omvangbepaling beverhol Haren

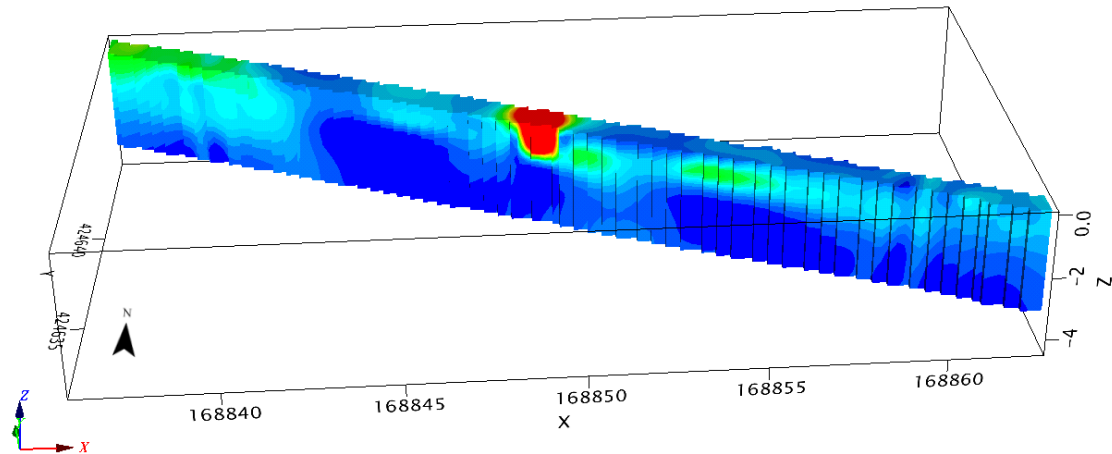
Locatie	Gang/kamer	Lengte vanaf begin tot einde gang	Diameter gang of kamer (breedte)	Diepte bovenkant gang t.o.v. maaiveld, excl. de locaties met een gat in het maaiveld.	Inhoud gangenstelsel
Beverhol bij Haren (Aa en Maas)	Gang (totaal)	3.76 m	0.15 – 0.38 m	0.12 – 0.53 m	0.33 m ³
	Gang (onderzijde talud)	1.18 m	0.15 – 0.38 m	0.44 – 0.53 m	0.18 m ³
	Gang (bovenzijde talud)	2.58 m	0.15 – 0.38 m	0.12 – 0.32 m	0.15 m ³

4.3.2 RESULTATEN ERT-METINGEN

In figuur 5 en 6 en in bijlage 4 zijn de resultaten van de ERT-metingen gepresenteerd.

Figuur 5 Resultaten ERT-meting Haren

Figuur 6 **Resultaat ERT-meting Haren**



Rond 15 meter langs het profiel vertonen beide ERT-profielen een duidelijke hoogweerstandanomalie, met elektrische weerstandswaarden van circa 8000 Ohm.m. Deze waarden zijn significant hoger dan die van de omliggende lagen en wijzen op de aanwezigheid van een luchtgevulde holle ruimte, de bevergraverij. De locatie van deze anomalie komt overeen met de eerder geïdentificeerde ingang van de bevergang, wat de interpretatie bevestigt.

De ondiepe ondergrond (tot circa 1,5 meter onder maaiveld) vertoont elektrische weerstandswaarden tussen 100 en 300 Ohm.m wat duidt op een zandige kleilaag. Deze waarden zijn typerend voor sedimenten met een gematigde geleidbaarheid, beïnvloed door de kleifractie en het vochtgehalte.

Op dieptes tussen 1,5 en 3 meter onder maaiveld worden lage elektrische weerstandswaarden (< 100 Ohm.m) gemeten. Deze lage waarden zijn kenmerkend voor een verzadigd zandpakket, waarin het aanwezige zoet grondwater de geleidbaarheid verhoogt en dus de weerstand verlaagt. De gemeten waterstand ter hoogte van de ingang van de bevergang ligt op 1,5 meter onder maaiveld, wat overeenkomt met de diepte van het verzadigde zandpakket in de ERT-profielen.

De verzadiging van de ondergrond met grondwater is een bepalende factor voor de elektrische geleidbaarheid. In verzadigde omstandigheden circuleert de elektrische stroom voornamelijk via de met water gevulde poriën, wat resulteert in lagere gemeten weerstandswaarden.

De hoge weerstand in het midden van het profiel is een typische indicatie van een ondergrondse holte of tunnel. In het geval van een bevergang:

- Holtes, luchtgevulde poriën en droge sedimenten verhogen de weerstand.
- Verzadigde klei of zand verlaagt de weerstand.

De anomalie is dus een directe reflectie van het contrast tussen de bevergang en de omliggende verzadigde bodemlagen.

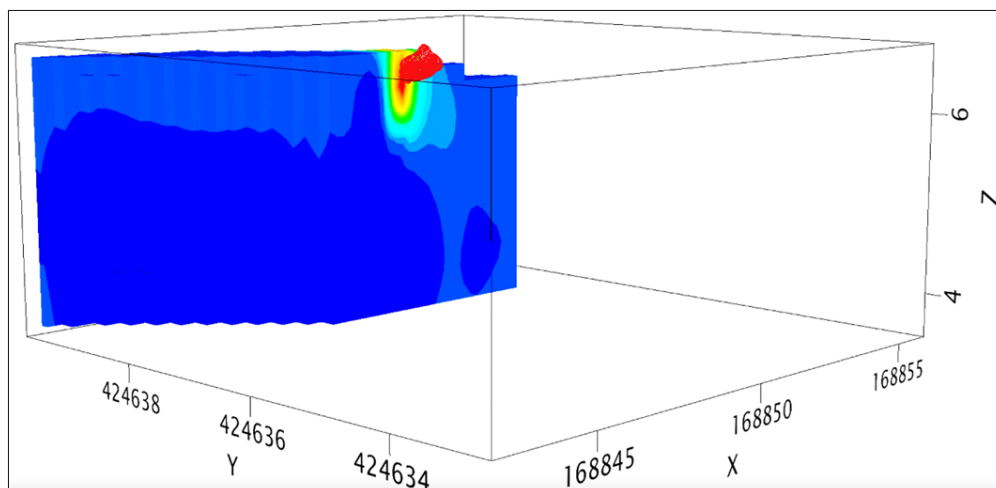
NB: In de resultaten lijkt het alsof het beverhol tot op het maaiveld rijkt. Dit is te verklaren doordat het hol een ondiepe ligging (10-55 cm-mv) heeft en de aangebrachte elektroden een stuk de grond in zijn gebracht.

4.3.3 GEÏNTEGREERDE RESULTATEN ERT-METING EN LIDARMETING HAREN

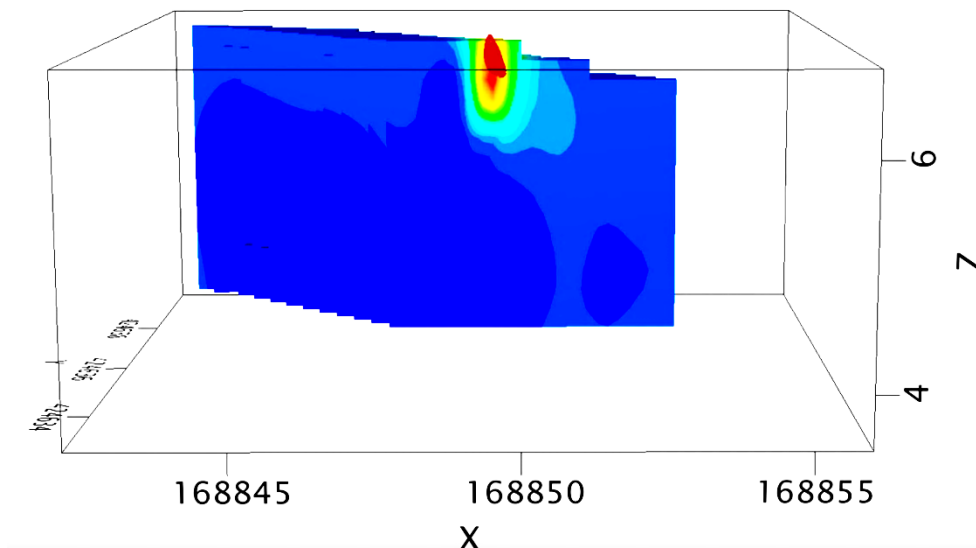
In onderstaande figuren 7, 8 en 9 en bijlage 5 zijn de resultaten van het geïntegreerde 3D-model van de ERT- en lidarmetingen weergegeven. Van deze resultaten zijn bij dit rapport ook twee filmpjes opgeleverd in de externe bijlage, die een gedetailleerd beeld geven.

Het model geeft een duidelijke weergave van de situatie van de met handheld lidar en ERT ingemeten bevergraverij. Dit 3D-model waarbij ERT is een validatie om te controleren of de meetresultaten (beiden RTK-GPS geogerefereerd) op elkaar aansluiten. Het blijkt dat beide metingen zeer goed op elkaar aansluiten.

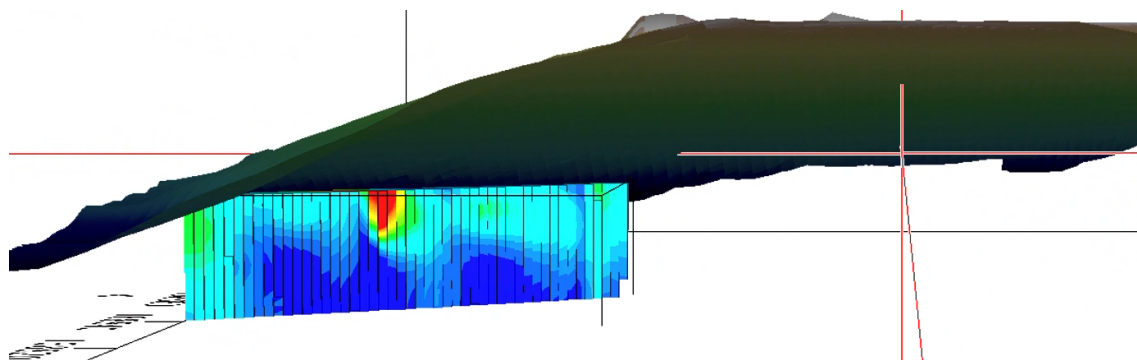
Figuur 7 Geïntegreerd resultaat van de lidar- en ERT-meting



Figuur 8 Geïntegreerd resultaat van de lidar- en ERT-meting



Figuur 9 Geïntegreerd resultaat van de lidar- en ERT-meting t.o.v. het dijkprofiel



5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk zijn de bevindingen uit het onderzoek samengevat en vertaald naar conclusies en aanbevelingen. De conclusies en aanbevelingen zijn als eerste opgenomen waarna concrete aanbevelingen zijn gegeven voor vervolgonderzoek naar praktijktoepassing van ERT-metingen. Tot slot is een plan van aanpak op hoofdlijnen opgesteld voor de mogelijkheden om een proof of concept uit te voeren voor structurele monitoring van dierlijke grave-rijen met ERT-metingen.

5.2 CONCLUSIES

De resultaten van het uitgevoerde ERT-onderzoek wijzen op aanzienlijke laterale variaties in de ondiepe ondergrond langs de onderzochte profielen. Binnen deze metingen is een markante anomalie (de bevergraverij) waargenomen, gekenmerkt door sterk verhoogde elektrische weerstandswaarden van circa 8000 Ohm.m ter hoogte van ongeveer 15 meter profielafstand en op een diepte van circa 1 meter onder het maaiveld. Deze verhoogde weerstandswaarden zijn indicatief voor de aanwezigheid van een met lucht gevulde ondergrondse holte en corresponderen met de locatie van de eerder, op basis van andere technieken, vastgestelde bevergang. Hiermee wordt bevestigd dat de ERT-methode in staat is dergelijke structuren in de ondergrond nauwkeurig te detecteren en te lokaliseren.

Daarnaast geven de ERT-profielen inzicht in de lithologische opbouw van de ondergrond:

- De ondiepe zone (tot ca. 1,5 m – MV) vertoont weerstandswaarden tussen 100 en 300 Ohm.m, wat duidt op een zandige kleilaag.
- Dieper gelegen zones (ca. 1,5 tot 3 m – MV) tonen weerstandswaarden < 100 Ohm.m, kenmerkend voor een verzadigd zandpakket met zoet grondwater. De gemeten waterstand ter hoogte van de ingang van de bevergang komt overeen met deze diepte, wat bevestigt dat verzadiging een significante invloed heeft op de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond.

Het beverhol bij Haren is ten behoeve van het uitvoeren van forward modelling en ter referentie van de ERT-metingen succesvol in beeld gebracht met handheld lidar. De resultaten van de ERT-meting in Haren komen overeen met de resultaten van de forward modelling dat voor de locaties in Olburgen en Doeveren is uitgevoerd. Dit geeft aan dat forward modelling een realistische benadering kan geven van de meetbaarheid van bevergraverijen bij vergelijkbare bodemopbouw.

De uitkomsten van het onderzoek bevestigen dat ERT-metingen ingezet kunnen worden als toepasbaar geofysisch instrument voor het nauwkeurig detecteren van bevergraverijen (en andere ondergrondse holtes).

De resultaten van zowel de handheld lidarmeting als de ERT-meting in Haren, beiden georeferereerd met RTK GPS, vertonen een sterke onderlinge consistentie. Dit betekent dat er geen significante afwijkingen of meetfouten zijn vastgesteld.

De lidarmetingen hebben geresulteerd in een gedetailleerde bepaling van de omvang van het beverhol, waardoor de dijkbeheerder in staat wordt gesteld om een meer gefundeerde risicobeoordeling uit te voeren.

De duidelijke detecteerbaarheid van het beverhol met de ERT-metingen bevestigt de effectiviteit van deze geofysische meettechniek. Het Proof of Concept is succesvol en overtuigend bewezen. Tevens is vastgesteld dat handheld lidar zich uitstekend leent als referentietechniek ter validatie van ERT-metingen. Voor toekomstige projecten, waarbij ERT-metingen worden ingezet als structurele monitoringstechniek voor bevergraverijen, wordt geadviseerd om lidarmetingen systematisch te integreren als validatiemiddel voor de bevindingen die met ERT worden verkregen.

5.3 AANBEVELINGEN

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Onderzoek wat de effecten zijn van bepaalde omstandigheden op het kunnen signaleren van dierlijke graverij met ERT (en handheld lidar metingen). Voorbeelden hiervan zijn: het vochtgehalte, lithologie, droogte en hoogwater.
- Onderzoek in hoeverre uit geclassificeerde ERT-data conclusies kunnen worden afgeleid die inzicht geven in ondergrondse condities, zoals het silt- of kleigehalte in zandlagen, de mate van verzadiging en andere relevante fysische eigenschappen. Deze analyse heeft tot doel te beoordelen of dergelijke condities indicatief zijn voor een verhoogde geschiktheid van de locatie als potentiële vestigingsplaats voor een beverhol.
- Maak voor toepassing van ERT-metingen forward modelling-analyses, zodat een extra kwaliteits- en validatieslag wordt gerealiseerd. Door deze stap te integreren in het meetproces kan voorafgaand aan het veldwerk een realistisch verwachtingspatroon worden opgesteld, wat bijdraagt aan een grotere betrouwbaarheid en interpretatiekracht van de uiteindelijke ERT-resultaten.
- Ontwikkel een gedetailleerd meet- en monitoringsprotocol, inclusief validatie met bijvoorbeeld handheld lidar, voor de toepassing van ERT bij het monitoren van bevergraverijen, specifiek als onderdeel van een pilot-veldexperiment. Dit protocol dient alle relevante stappen, randvoorwaarden en kwaliteitsborgingen te bevatten, zodat de uitvoering reproduceerbaar is en de resultaten vergelijkbaar zijn binnen verschillende onderzoeksfasen en locaties. Hiervoor dient ook vastgesteld te worden wat de optimale hard op hard afstand van de elektroden dient te zijn en hoelang elk individueel meettraject kan zijn.
- Voer gedegen, systematisch vooronderzoek uit naar ondergrond en de omgeving die versturende invloed kunnen uitoefenen op ERT-metingen bij bevergraverijen. Denk hierbij aan variabelen zoals het vochtgehalte, de aanwezigheid van bepaalde lithologische lagen, fluctuaties in grondwaterstanden en andere fysische of chemische factoren (kabels en leidingen, etc.). Door deze invloeden te identificeren en te kwantificeren, kan de interpretatie van ERT-data verder worden aangescherpt.
- Onderzoek de structurele toepassing van ERT nader voor de *monitoring* van bevergraverijen. Het doel hierbij is het bepalen van de toepasbaarheid van ERT voor structurele, langjarige monitoring van bevergraverijen als monitorings-/signaleringsmethode, met oog

op het krijgen van grip op bevergraverijen en binnen de zorgplicht risicogestuurd met bevers en hun graverijen kunt omgaan.

- Voor de ERT-meting is aan te raden om validatiemethoden toe te passen, waarbij je bijvoorbeeld lidar kan inzetten. Voer hiervoor een pilot-veldexperiment uit over een langere periode, waarin ERT als monitoringsysteem wordt gevalideerd. Tijdens een dergelijk project kunnen analyses worden uitgevoerd waar ook andere technieken worden toegepast, zoals grondradar of andere geofysische methoden. Bepaald kan worden of het nodig is ERT-metingen bij langjarige toepassing te valideren en met welke techniek dat het beste kan.
- Verder is aan te bevelen om te onderzoeken wat de impact is van langdurige in-situ monitoring met ERT bij een dijkbeheerder. Met aandacht voor de volgende aspecten: regulier onderhoud van de dijk (zoals het maaibeheer), hoeveel sensoren in de dijk geplaatst en onderhouden moeten worden, hoe ERT als early-warning geïmplementeerd kan worden en de calamiteitorganisatie daarop kan aansluiten, hoe herstelwerkzaamheden uitgevoerd kunnen worden bij een in-situ meetopstelling en hoe de dataverwerking en data-analyse geïmplementeerd kan worden.

6

VERVOLG PROOF OF CONCEPT: MONITORING IN PRAKTIJK

6.1 INLEIDING

Nu het PoC succesvol is verlopen, is de vervolgstap het bepalen van ERT-metingen als monitoringstechniek voor de detectie van bevergraverijen. ERT-metingen worden in dit geval toegepast als in-situ monitoringssysteem. In dit hoofdstuk is een aanzet voor een plan van aanpak opgesteld om een pilot-veldexperiment uit te voeren als Proof of Concept voor de langjarige inzet van ERT-monitoring in de praktijk.

6.2 DOELSTELLINGEN

- Het bepalen van de toepasbaarheid van ERT voor structurele, langdurige monitoring van bevergraverijen als monitorings-/signaleringsmethode, met het oog op het krijgen van grip op bevergraverijen en binnen de zorgplicht risicogestuurd met bevers en hun graverijen om te kunt omgaan (proof of concept).
- Het bepalen van de voor- en nadelen/kansen en beperkingen van ERT-metingen ten opzichte van andere meet- en monitoringstechnieken gericht op bevergraverijen.
- Het opstellen van een 'gestandaardiseerd' protocol voor het monitoren van bevergraverijen.

6.3 WERKWIJZE/STAPPENPLAN

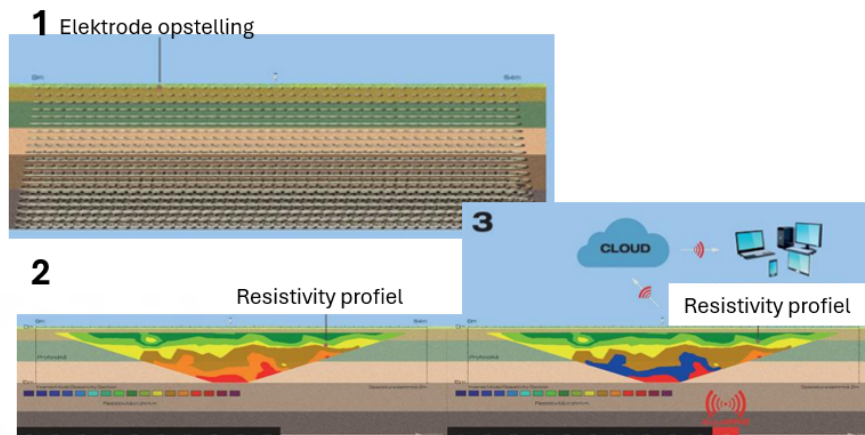
1. Opstellen van een ERT-monitoringsplan en referentiemonitoringsplan voor bevergraverijen.
2. Technische ontwikkeling van een ERT 'in-situ monitoringsinstrument'
3. Locatie bepalen, locatie inventariseren en het opstellen van locatie-eisen voor monitoring (liefst meerdere locaties, om meer variatie te hebben in het onderzoek)
4. Langdurig en/of periodieke monitoring van bevergraverijen in het veld
 - a. Bevindingen uit het veld
 - b. Kansen en knelpunten, voor- en nadelen
 - c. Logboek aanleggen
5. Meetresultaten analyseren
6. Bepalen voor- en nadelen langjarige toepassing ERT als monitoringstechniek
7. Kosten-batenanalyse opstellen uitrol praktijktoepassing
8. Rapportage en analyses

6.4 MONITORINGSOPSTELLING

In onderstaande figuren 10 en 11 is weergegeven hoe een ERT-monitoringsopstelling eruit kan zien. In figuur 10 is een schematische weergave gegeven waarbij de gemeten profielen automatisch opgeslagen worden in de Cloud. In figuur 11 zijn foto's te zien van een in-situ monitoringsopstelling met ERT. Daarin is te zien dat de elektroden direct aan de kabel zijn

bevestigd en samen ingegraven worden. Per aangelegd profiel wordt ook een loggersysteem aangelegd, dat de uitgevoerde metingen naar de Cloud kan sturen.

Figuur 10 Schematische weergave in-situ ERT-monitoring



Figuur 11 In-situ monitoringsopstelling ERT



6.5 MEEKOPPELKANSSEN

- Onderzoek integreren met lopende projecten, zoals Meanderende Maas, Paddenpol, etc.
- Geofysisch onderzoek naar bodemopbouw wordt eveneens uitgevoerd. De aangetroffen lithologie kan een belangrijke bijvangst vormen voor de dijkbeheerders met betrekking tot dijkversterking door ERT in te zetten.
- Het monitoren van bevergraverijen in combinatie met het onderzoek naar bodemopbouw kan een waardevolle bijdrage leveren aan dijken waarvoor dijkversterking op korte termijn niet aan de orde is.

6.6 NADER TE ONDERZOEKEN ASPECTEN

- ERT-plaatsing: wat wordt de meetconfiguratie in het veld?
 - 2 profielen zoals bij Haren of meerdere of één profiel
 - Rode lijn, risicogestuurde monitoring
 - Verschillende typen dijken monitoren, zoals schaar dijken
 - Optimale lengte van de profielen
 - Optimale HOH voor het beste resultaat
 - Periodieke metingen (frequentie)
 - Continue metingen
 - Vormgeven referentiemonitoring ten behoeve van validatie ERT-metingen
- Meten bij bepaalde omstandigheden
 - Verhoogde waterstand (reguliere golven)
 - Hoogwater
 - Droogte (harde grond + mogelijke scheurvorming)
 - Permanent hoge GWS
- Metingen bij potentiële versturende elementen
 - bodemvreemde objecten
 - Hoogspanningsleidingen
- Meten bij verschillende ondergronden
 - Uitsluitend zandgrond
 - Zeer dikke deklaag, kleilaag
 - Veen
 - Zeer heterogene ondergrond

BIBLIOGRAFIE

Elgun, O. W. (2025). *Pilot ERT onderzoek voor bevergangen Olburgen*. Nootdorp: FUGRO NL LAND B.V.

S. Elgun, O. W. (2025). *Pilot ERT onderzoek voor bevergangen Haren*. Nootdorp: FUGRO NL LAND B.V.

BEGRIPPENLIJST

Begrip	Definitie	Bron
Beverhol / beverburcht	Het geheel van gangen en kamers dat door een bever is aangelegd, vaak met meerdere vertakkingen en soms gedeeltelijk ingestort.	Kenniscentrum Bever (2021)
Electrical Resistivity Tomography (ERT)	Geofysische methode waarbij elektrische weerstand contrasten in de ondergrond worden gemeten om bodemopbouw, verzadiging en holle ruimtes in kaart te brengen. In bijlage 1 wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van ERT-methode.	Reynolds (1997)
Elektrische weerstand (resistiviteit)	Maat voor de mate waarin bodemmateriële elektrische stroom tegenhouden, afhankelijk van porositeit, vochtgehalte en samenstelling.	Reynolds (1997)
Forward modelling	Rekenmethode waarbij een theoretisch ondergrond-model wordt opgesteld om de verwachte respons van ERT-metingen te simuleren.	Reynolds (1997)
Geofysische meetmethode	Niet-destructieve meetmethode waarmee fysische eigenschappen van de ondergrond worden bepaald.	US EPA
Grondradar (GPR)	Geofysische techniek waarbij elektromagnetische golven worden gebruikt om structuren in de ondiepe ondergrond te detecteren.	Reynolds (1997)
Handheld lidar	Meetinstrument dat met laserpulsen een nauwkeurig 3D-model van objecten en ruimtes maakt; in dit onderzoek gebruikt om bevergangen via boorgaten in beeld te brengen.	FOXTECH Robotics (2025)
In-situ monitoring	Het langdurig monitoren van processen of structuren direct op locatie, zonder ingrijpende bodemver storing.	STOWA
Lithologie	Beschrijving van bodemlagen op basis van samenstelling, korrelgrootte en structuur (bijv. klei, zand).	Geologische standaardterminologie
Macrostabiliteit	Faalmecanisme van dijken waarbij grote grond-massa's verschuiven, mede beïnvloed door ondergrondse verzwakkingen.	Waterveiligheids-literatuur
Meetprotocol	Vastgelegde set instellingen en procedures voor het uitvoeren van metingen, waaronder elektrode-opstelling en meetconfiguratie.	Ekwadraat
Proof of Concept (PoC)	Pilotonderzoek waarin wordt aangetoond of een techniek technisch haalbaar en toepasbaar is voor een specifieke toepassing.	Techtarget (2023)
Referentiemeting	Meting die wordt gebruikt om andere meetresultaten te controleren en te valideren.	Vanotools
Resolutie (ERT)	Het vermogen van ERT om kleine structuren in de ondergrond te onderscheiden, afhankelijk van elektrodeafstand en meetopstelling.	Reynolds (1997)

RTK-GPS	Zeer nauwkeurige GPS-techniek waarmee posities tot op centimeterniveau worden bepaald.	GNSS-standaard-terminologie
Signaleringsmethode	Meetmethode gericht op het vroegtijdig detecteren van afwijkingen of risico's, zoals nieuwe of uitbreidende graverijen.	Medilex Onderwijs
Stratigrafie	De verticale opbouw en volgorde van bodemlagen in de ondergrond.	geologische standaard-terminologie
Verzadiging	De mate waarin bodemporiën met water zijn gevuld, bepalend voor elektrische geleidbaarheid.	Reynolds (1997)
Wenner-Schlumberger-opstelling	Specifieke elektrodeconfiguratie bij ERT-metingen die geschikt is voor het detecteren van zowel verticale als laterale variaties.	Reynolds (1997)

BIJLAGE 1

THEORY ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT)

In deze bijlage is de achterliggende theorie over Electrical Resistivity Tomography (ERT) metingen en de toepassing op bevergraverijen toegelicht.

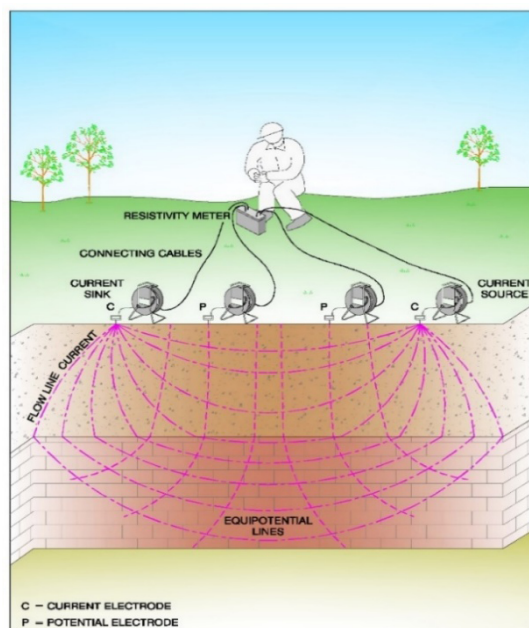
INLEIDING

Electrical Resistivity Tomography (ERT) wordt vaak uitgevoerd als een stratigrafische profileringsstool, maar kan ook worden gebruikt voor het opsporen van laterale variaties in de grondstructuur, zoals het bepalen van stortplaatsen, het karteren van holle ruimtes en/of het karteren van verontreinigingen. De techniek meet de variaties in de parameters gerelateerd aan elektrische weerstand in de ondergrond. Waar een gelaagde grondstructuur aanwezig is met significante contrasten in elektrische weerstandseigenschappen, kunnen ERT-metingen gebruikt worden om de stratigrafische/geologische dwarsdoorsneden van de bodemopbouw te bepalen. ERT-gegevens kunnen effectief een link leggen tussen verschillende puntinformatiebronnen (boringen, sonderingen etc.) om een volledig begrip van de bodemopbouw te geven.

MEETPRINCIPE

De schijnbare elektrische weerstandsverdeling van de ondergrond kan worden gemeten met behulp van een elektrodeopstelling van vier elektroden. Door het injecteren van een gelijkstroom of een zeer laagfrequente wisselstroom (I) tussen twee elektroden en het meten van het resulterende potentiaalverschil (V) tussen een tweede paar elektroden, is het mogelijk om de schijnbare weerstand te berekenen met behulp van de wet van Ohm ($R=V/I$). Deze aanpak staat bekend als de galvanische weerstand. In figuur 12 wordt een schematische illustratie van elektrische weerstandsmetingen gepresenteerd.

Figuur 12 Schematische weergave van elektrische weerstandsmetingen



De elektroden zijn normaal co-lineair en geometrisch verdeeld. Een elektrische stroom is vervolgens geïnjecteerd via twee stroom-elektroden, en de daaruit voortvloeiende potentiële verschillen worden gemeten bij een paar potentiaal-elektroden. De penetratiediepte is primair een functie van de elektrode-afstand, dat wil zeggen hoe groter de elektrodeafstand des te dieper de penetratie van de meting. Talloze soorten elektrodeopstellingen kunnen worden gebruikt, afhankelijk van de plaats en het doel van de metingen, bijvoorbeeld Wenner-, Dipool-Dipool en Wenner-Schlumbergeropstellingen kunnen worden gekozen.

Voor de elektrische weerstand (Resistivity) tomografie (ERT) metingen worden vaak multi-elektrode acquisitiesystemen gebruikt. Multi-elektroden worden ingezet en aangesloten op het systeem via meeraderige kabels. Het systeem selecteert automatisch de verschillende combinaties van elektroden aan de hand van een bepaald protocol en genereert eventueel een dwarsdoorsnede van de schijnbare weerstandswaarden van de ondergrond onder de elektrodeopstelling. De elektrische weerstand van de ondergrond is afhankelijk van verschillende factoren: in de eerste plaats varieert de weerstand door verschillen in porositeit maar deze kan ook variëren als gevolg van variaties in de chemische samenstelling van het materiaal (matrix), de korrelgrootte, -vorm en poriënvloeistofkenmerken.

WEERSTAND EN SOORTEN GROND

De verschillende soorten grond en gesteente kunnen verschillende elektrische weerstandseigenschappen hebben. In het algemeen zal de sedimentaire bodem een lagere schijnbare weerstand vertonen dan die van vast gesteente. Klei en veenachtige bodems hebben meestal een lagere schijnbare soortelijke weerstand dan bijvoorbeeld zandige of grindachtige bodems. De aanwezigheid van losjes samengeperst materiaal of holle ruimtes boven de grondwaterspiegel kan resulteren in een toename van de schijnbare elektrische weerstandswaarden (als een functie van de met lucht gevulde porositeit). In onderstaande tabel 3 zijn enkele weerstandswaarden van de meest voorkomende geologische materialen weergegeven (Reynolds, 1997: p.422-423).

Tabel 3

Typische weerstandswaarden van meest voorkomende geologische materialen

Grond/Steen type	Elektrische weerstand [Ohm.m]
Bovenste grond	250 – 1700
Klei (zeer droog)	50 – 150
Quaternair / recent zand	50 – 100
Grind (droog)	1400
Grind (verzadigd)	100
Droge zandgrond	80 – 1050
Zandige klei / kleiig zand	20 – 215
Zand en grind	30 – 225
Alluvium en zand	10 – 800
Kalksteen	50 – 5×10^7

Op basis van de voorgaande tabel 3 is het duidelijk dat het classificeren van de geologische materialen uit de weerstandswaarden vatbaar is voor meerdere interpretaties. De interpretatie kan worden verfijnd door kalibratie met andere geofysische of geotechnische metingen. Holle ruimtes, zoals ook bevergraverijen zijn, hebben een zeer hoge weerstandswaarde. Deze eigenschap wordt verondersteld meetbaar te zijn waardoor ERT-metingen gebruikt kunnen worden voor het detecteren en monitoren van bevergraverijen.

BIJLAGE 2

COÖRDINATEN ERT EN BOORPUNTEN

In tabel 4 zijn de coördinaten van de ERT profielen opgenomen.

Tabel 4 Begin en eind coördinaten van de uitgevoerde ERT-profielen

Profielnaam	Eind coördinaten						Gemeten profiel- lengte [m]
	X [m]	Y [m]	Z [m NAP]	X [m]	Y [m]	Z [m NAP]	
ERT Profiel Noord	168863.90	424632.11	5.91	168835.28	424644.97	5.60	31.50 m
ERT Profiel Zuid	168863.71	424631.01	6.45	168835.06	424643.96	5.90	31.50 m

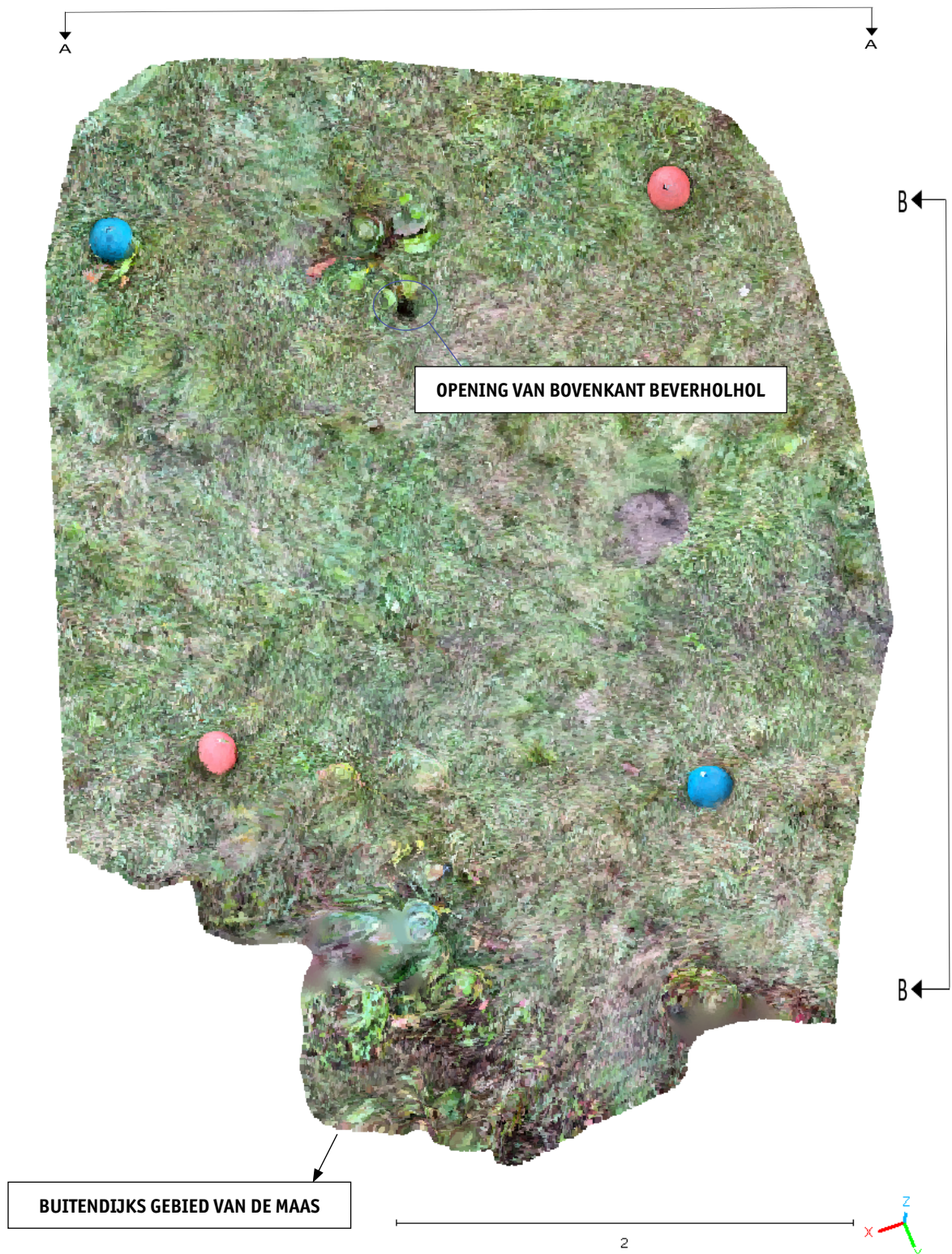
In tabel 5 zijn de coördinaten van de boorpunten opgenomen.

Tabel 5 Ingemeten coördinaten van door BZIM uitgezette bevergang indicaties

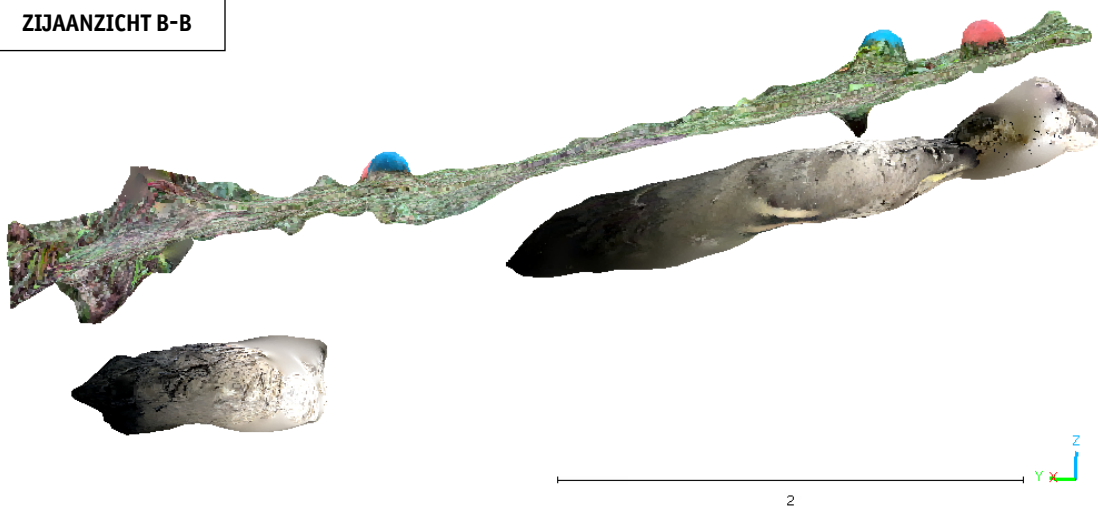
Locatie	X [m]	Y [m]	Z [m NAP]
Maaiveld boven bevergang	168849.27	424636.70	6.93
Maaiveld boven bevergang	168849.34	424637.48	6.63
Maaiveld boven bevergang	168850.13	424638.87	6.23
Maaiveld boven bevergang	168850.39	424639.41	5.90
Maaiveld boven bevergang	168850.59	424640.61	5.52
Maaiveld boven bevergang	168850.59	424641.49	5.33
Maaiveld boven bevergang	168850.62	424641.19	5.32

BIJLAGE 3

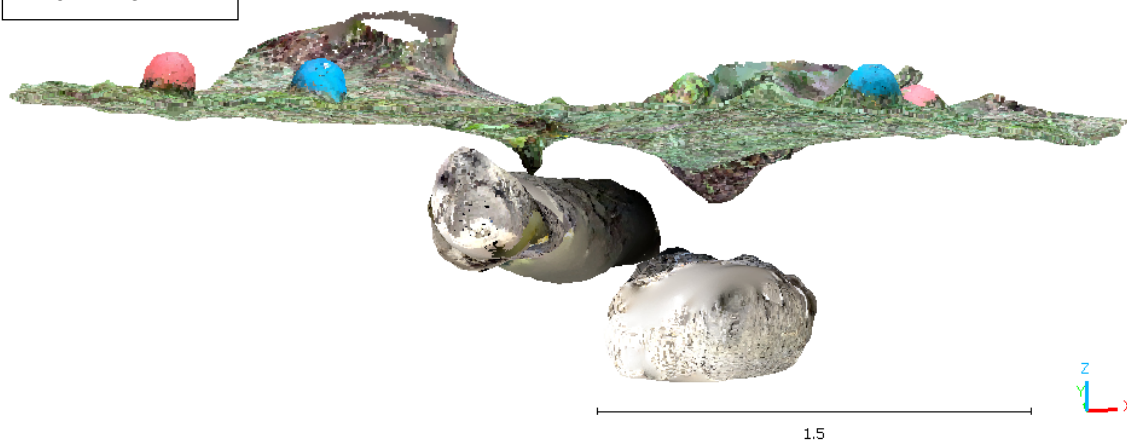
RESULTATEN LIDARMETING BEVERHOL HAREN



ZIJAANZICHT B-B



ZIJAANZICHT A-A

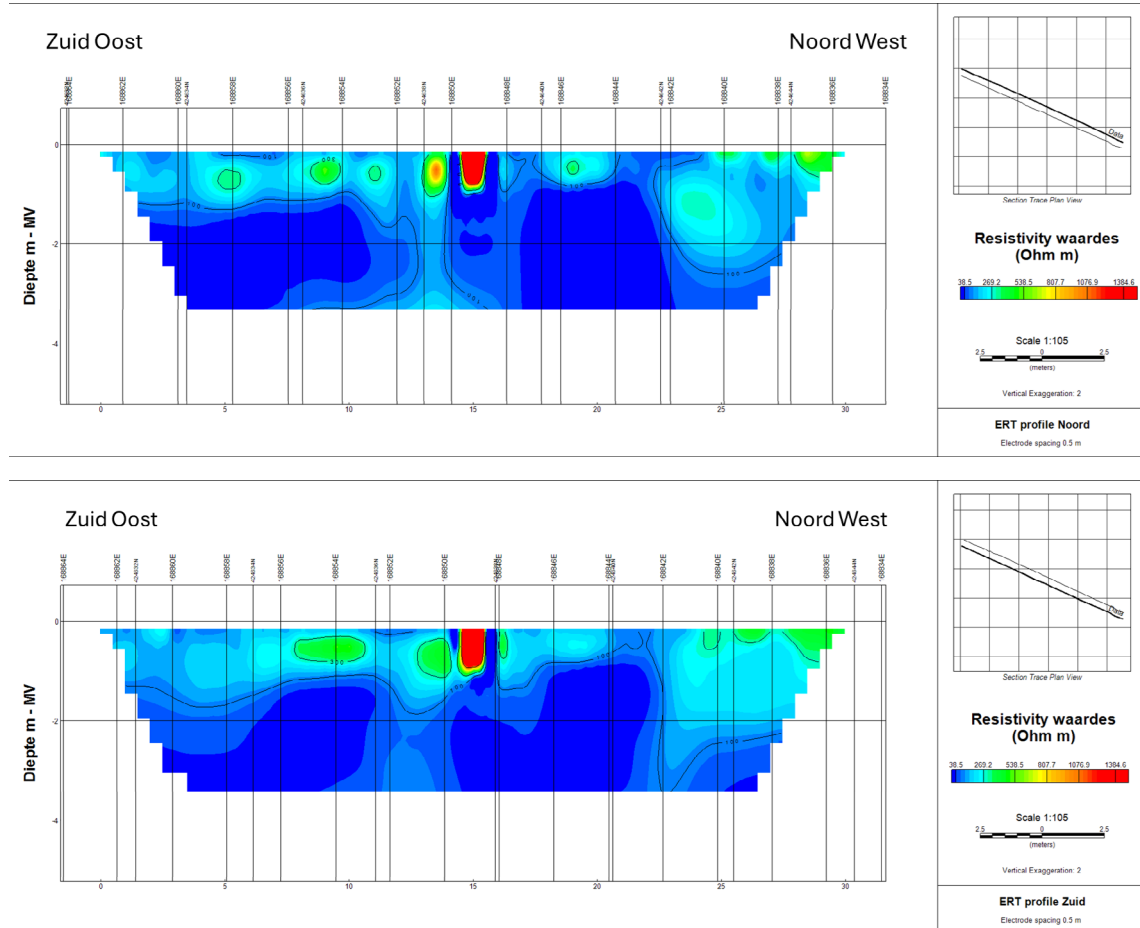


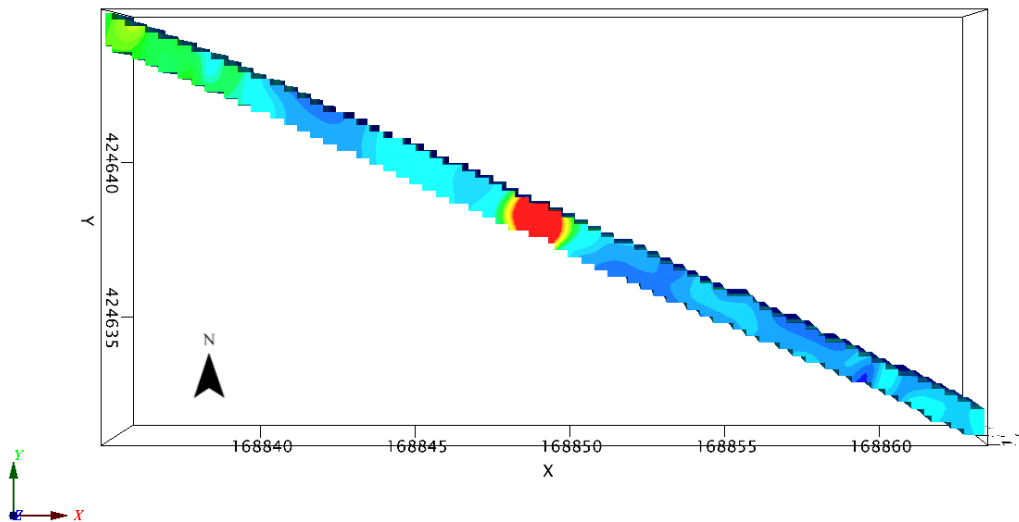
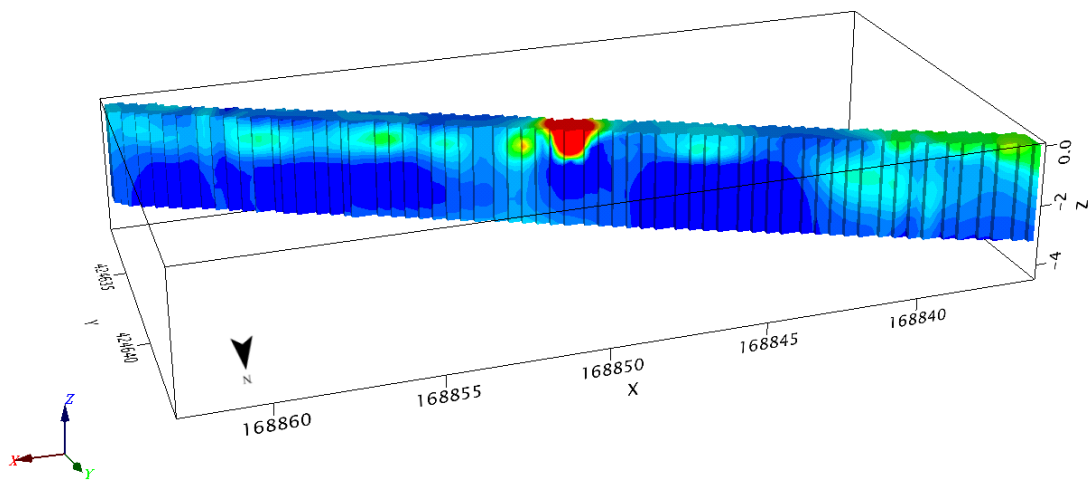
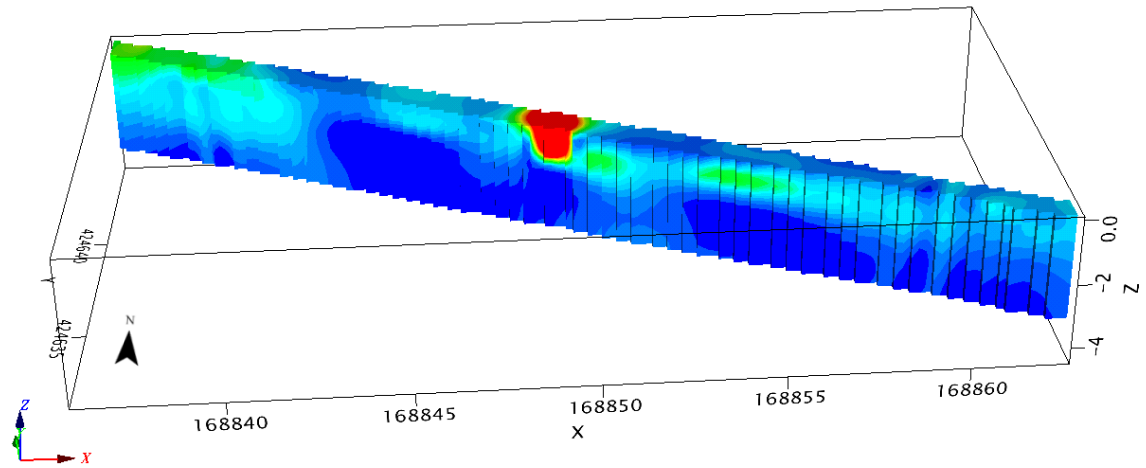
Tabel 6 Omvangbepaling beverhol Haren

Locatie	Gang/kamer	Lengte vanaf begin tot einde gang	Diameter gang of kamer (breedte)	Diepte bovenkant gang t.o.v. maaiveld, excl. de locaties met een gat in het maaiveld.	Inhoud gangen-stelsel
Beverhol bij Haren (Aa en Maas)	Gang (totaal)	3.76 m	0.15 – 0.38 m	0.12 – 0.53 m	0.33 m ³
	Gang (onderzijde talud)	1.18 m	0.15 – 0.38 m	0.44 – 0.53 m	0.18 m ³
	Gang (bovenzijde talud)	2.58 m	0.15 – 0.38 m	0.12 – 0.32 m	0.15 m ³

BIJLAGE 4

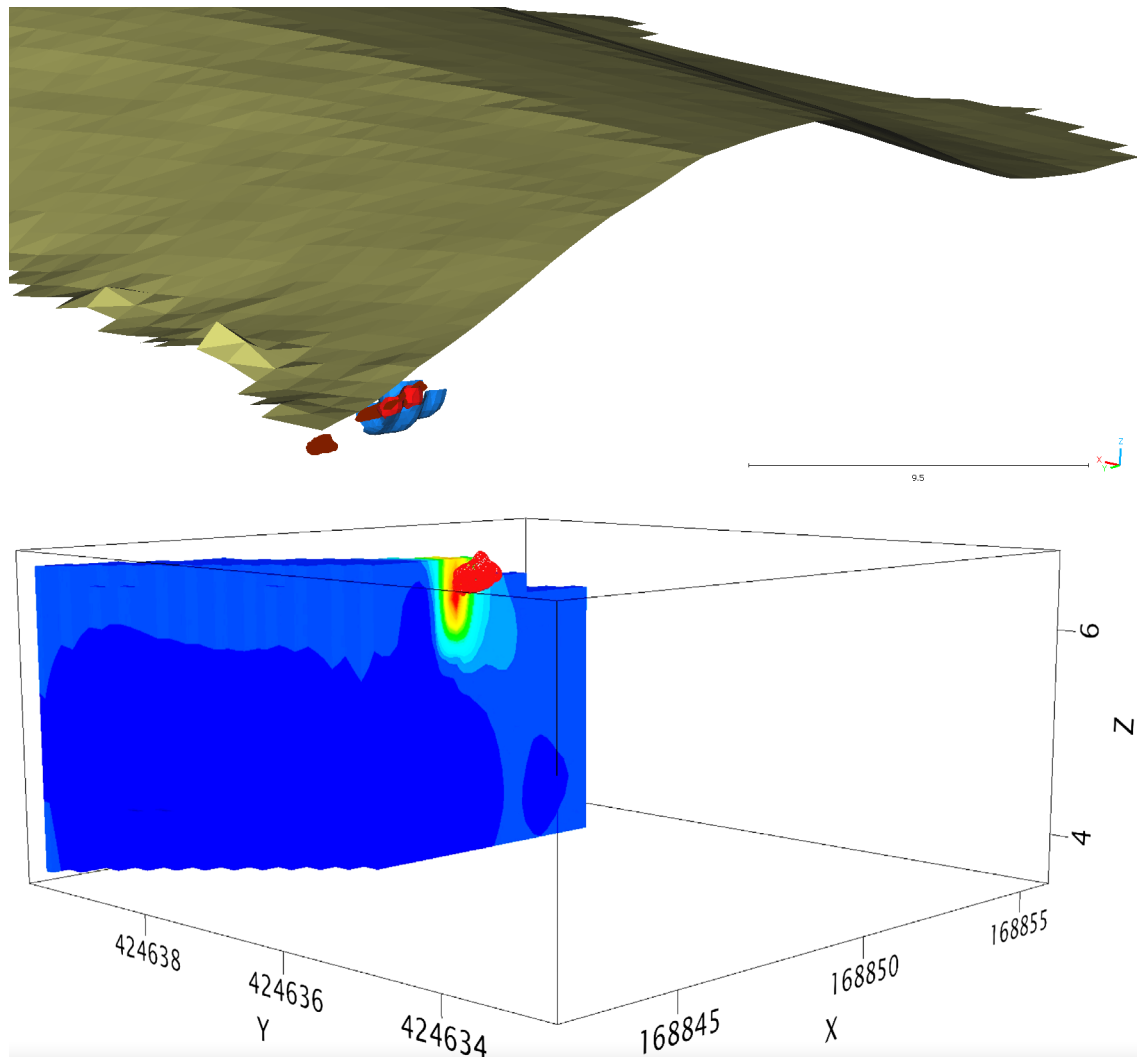
RESULTATEN ERT METING HAREN

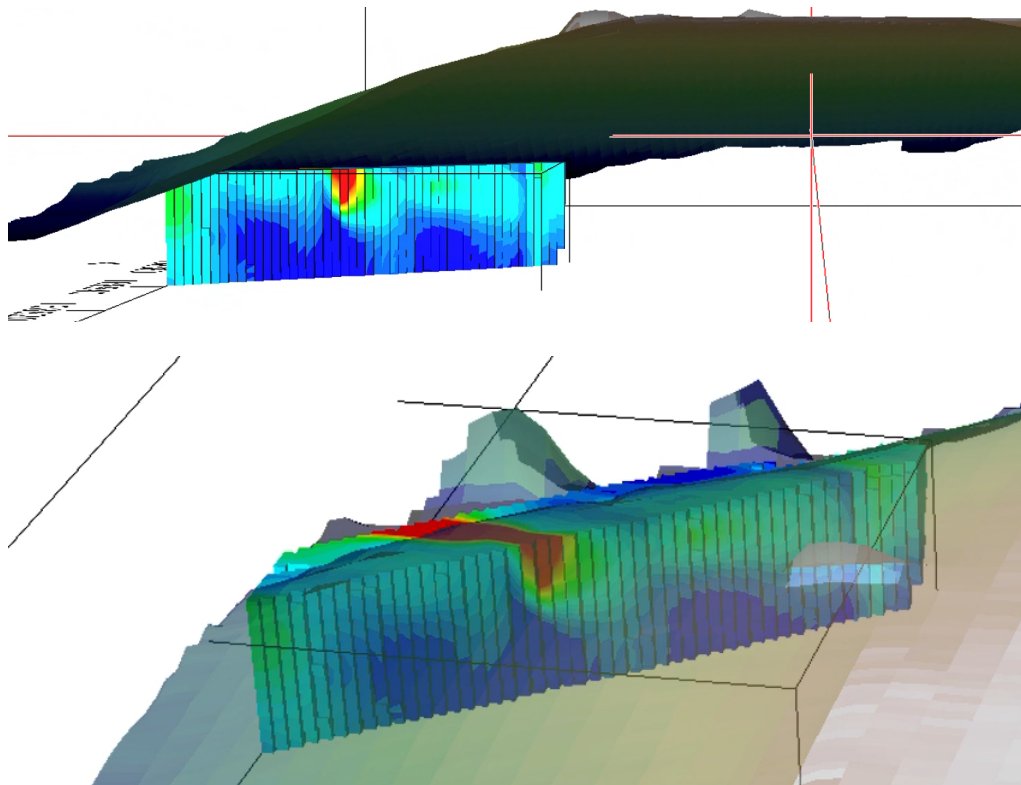
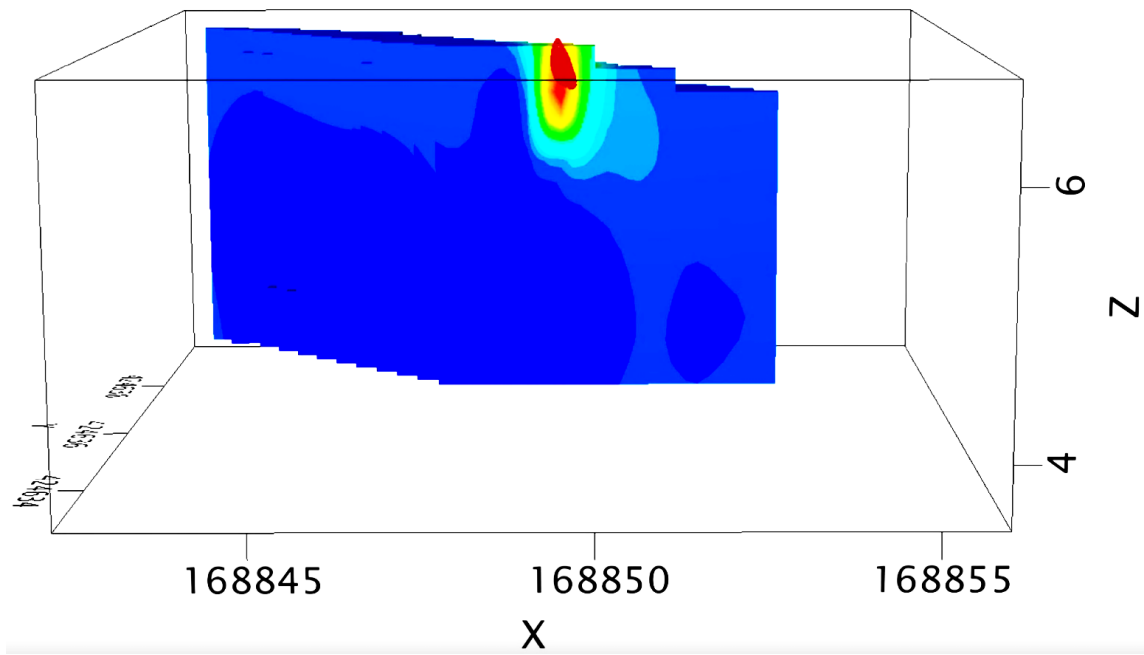




BIJLAGE 5

GEÏNTEGREERDE RESULTATEN ERT- EN LIDARMETING HAREN





BIJLAGE 6

RESULTATEN ERT-METING OLBURGEN

