



Arjen Kok, Vitens

Frans Schaars, Artesia

Michel Groen, Vrije Universiteit Amsterdam

Esben Auken, Universiteit Århus

# Geofysica vanuit de lucht levert veel informatie op

**Bij geohydrologisch onderzoek is het toepassen van geofysische meetmethoden niet nieuw. Om meer te weten over de bodemopbouw of waterkwaliteit werd geofysica in het verleden veelvuldig toegepast. Nieuw is dat geofysische metingen nu ook vanuit de lucht kunnen plaatsvinden, met verbeterde meettechnieken. In een korte tijd kan het aardoppervlak met een hoog detailniveau tot op grote diepte worden 'afgetast'. Het uiteindelijke resultaat is een driedimensionaal overzicht van de ruimtelijke verbreiding van zoet en zout grondwater maar ook zand- en kleilagen.**

In het INTERREG-project CLIWAT is Terschelling één van de pilotgebieden naast de kustzone van België, Nederland, Duitsland en Denemarken. Doel van CLIWAT is te kijken naar de effecten van klimaatverandering en zeespiegelrijzing op het evenwicht tussen zoet en zout grondwater. Vitens is direct betrokken bij dit onderzoek, omdat de projectresultaten ook goed toepasbaar zijn in een studie naar de mogelijkheid van een duurzame onafhankelijke (grond)waterwinning op Terschelling.

Eén van de belangrijkste onderdelen van het CLIWAT-onderzoek is de kartering vanuit de lucht om een driedimensionaal beeld te krijgen van het zoet/zoutgrensvlak en de verbreiding van klei- en zandlagen in de ondergrond. Het gebruik van de geo-elektrische weerstand is niet nieuw, de recent verder ontwikkelde meetmethode (*airborne* TDEM, SkyTEM) is dit wel. Deze relatief goedkope techniek blijkt goed toepasbaar voor het op grote schaal karteren van de ondergrond op verschillende dieptes en met verschillende resoluties.

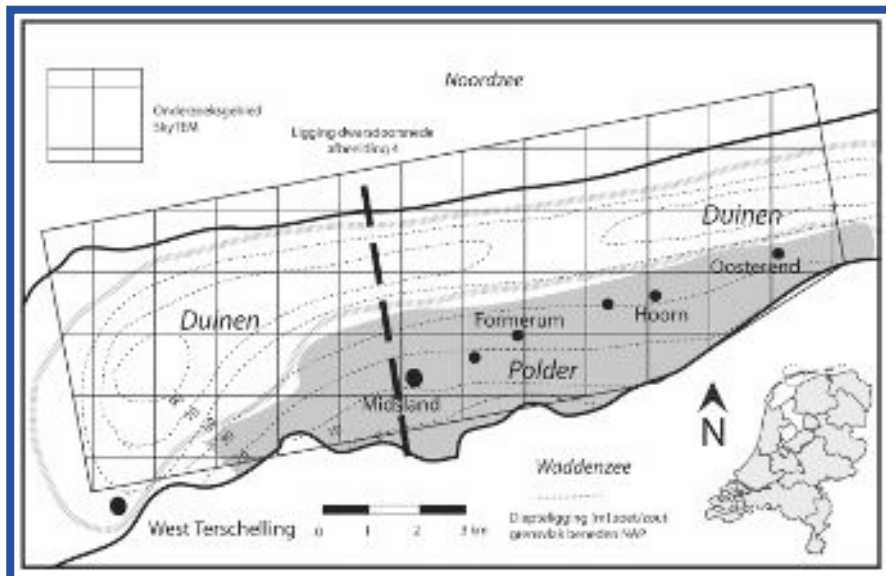
## De meettechniek

In het verleden werd de parameter geo-elektrische weerstand al veelvuldig gebruikt om veranderingen van de waterkwaliteit en lithologieën (zand/grind/klei/veen) te karteren. Dit werd dan gemeten met simpele, vaak ééndimensionale methoden met een beperkte resolutie en toepasbaarheid. Een goed voorbeeld hiervan is VES (*Vertical Electrical Sounding*) waar de weerstandsverandering met behulp van vier steeds verder uit elkaar te plaatsen

elektroden in diepte kon worden gemeten. Dit was een arbeidsintensieve methode met zeer beperkende randvoorwaarden. De komst van microcomputers en de schaalverkleining in de elektronica maakte het mogelijk de weerstanden met een grotere resolutie, nauwkeurigheid en dieptebereik te meten. Door de introductie van nieuwe elektromagnetische technieken werd het zelfs mogelijk weerstanden te meten zonder het gebruik van elektroden. Deze technieken maken gebruik van wisselspanning met een specifieke frequentie (elektromagnetisch signaal), die door een zender via een zendspoel of antenne

wordt opgewekt en waarop de ondergrond reageert met inductie. De mate waarin dit inductieve signaal verschilt van het primair opgewekte signaal, is afhankelijk van de weerstandsopbouw in de bodem. Het resultaat is een weerstandsprofiel (uitgedrukt in Ohm per meter) van de ondergrond. Doordat voor het meten van weerstanden met elektromagnetische methoden geen elektroden nodig zijn, bestaat de mogelijkheid vanuit de lucht gegevens te verzamelen, met als groot voordeel dat dit veel sneller gaat en veel meer data oplevert. De resolutie (lateraal) verbetert hierdoor sterk. Voor dit type onderzoek zijn Time

Afb. 1: Overzicht van het onderzoeksgebied op Terschelling.



Domain EM (TDEM) en Frequency Domain EM (FDEM) de belangrijkste.

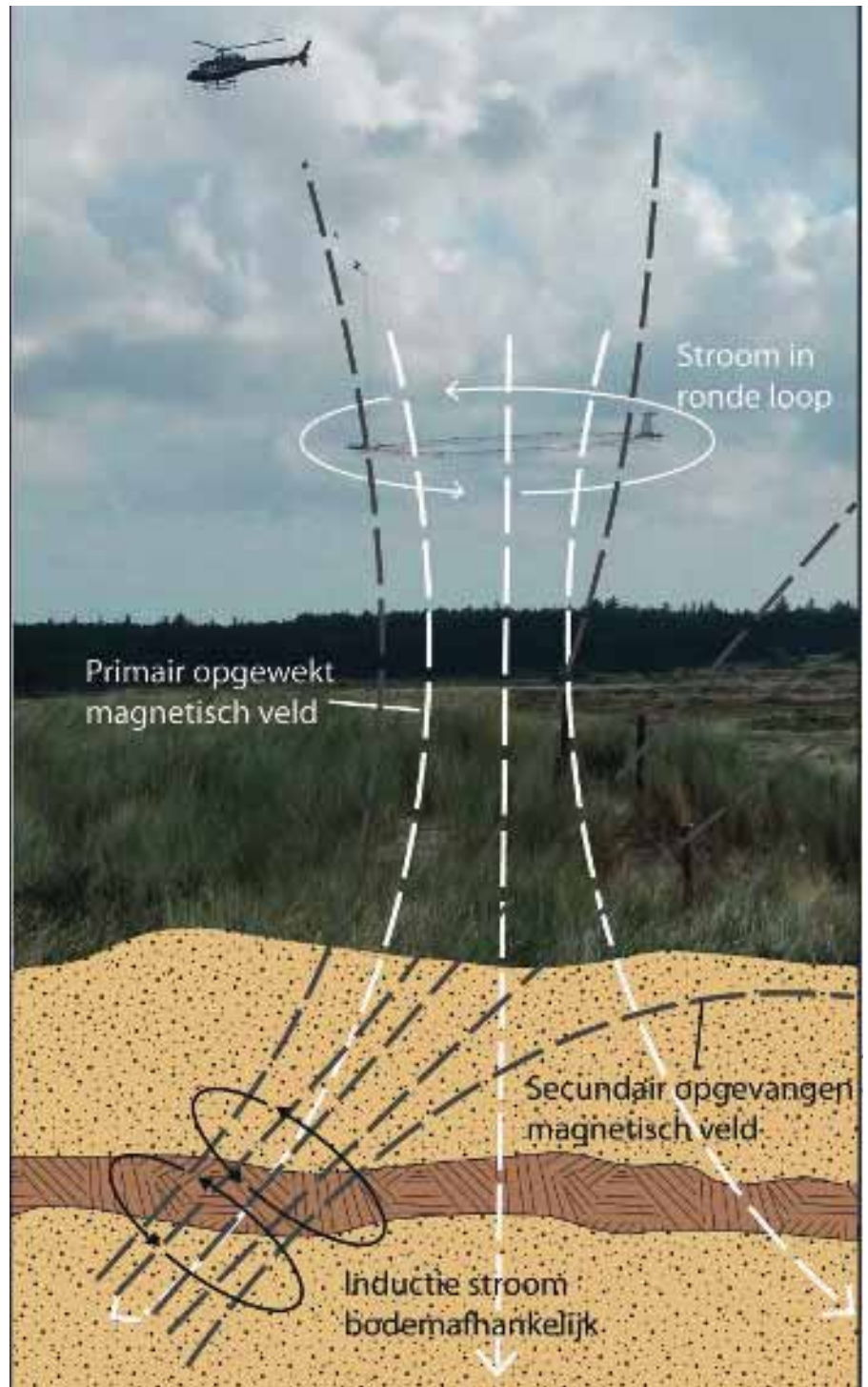
Met TDEM wordt een pulserend elektromagnetisch veld gebruikt en de afname van het inductieve veld in de tijd van elke puls gemeten. TDEM geeft een min of meer vergelijkbaar weerstandsprofiel als VES, maar met een veel grotere penetratiediepte en een zeer hoge meetsnelheid. FDEM gebruikt een continu uitgezonden elektromagnetisch signaal, dat wordt vergeleken met het inductieve signaal dat terugkomt van de ondergrond in een ontvanger. Het verschil tussen deze twee signalen is weer een maat voor de weerstandsopbouw. FDEM heeft een wat geringere doordringingsdiepte en is vooral geschikt om laterale veranderingen te karteren.

Binnen het kader van CLIWAT is op Terschelling het SkyTEM-systeem gebruikt. Bij dit in Denemarken ontwikkelde TDEM-systeem worden de zender en ontvanger onder een helikopter gehangen. Er kan worden gewerkt met verschillende zender/ontvangerafmetingen en sterktes van elektromagnetische pulsen, waardoor op verschillende dieptes met verschillende resoluties kan worden gemeten. De helikopter vliegt met de zender/ontvangerspoel circa 40 meter boven het maaiveld met een snelheid van ongeveer 80 km per uur (zie ook pagina 6). Doordat een enkele TDEM-meting slechts enkele microseconden duurt, is de gegevensdichtheid zeer groot, waardoor een lateraal zeer dicht net aan metingen ontstaat. Vluchtlijnen kunnen deels overlappend of met tussenruimte gevlogen worden, afhankelijk van de gevraagde resolutie.

### Interpretatie van de data

De ruwe data zullen eerst moeten worden geschoond van 'ruis'. Die wordt vooral veroorzaakt door kabels en leidingen. Indien de ligging ervan bekend is, kan hier ook in het vluchtplan mee rekening worden gehouden. Daarom is het toepassen van (*airborne*) geofysica in stedelijk gebied minder zinvol. Daarna moeten de ruwe veldcurves worden 'geïnverteerd'. Hierbij wordt de veldcurve omgezet in een lagenmodel van verschillende weerstanden met verschillende diktes. Van groot belang hierbij is dat, ondanks de grote hoeveelheden datapunten, de oplossing van de dataset naar een lagenmodel met verschillende weerstanden nog steeds niet (helemaal) uniek is. Dit wordt het 'equivalentieprobleem' genoemd.

Bovendien moet er ook voldoende weerstandscontrast zijn om een laag te kunnen detecteren (dunne kleilagen zijn op een bepaalde diepte niet meer te 'zien'). Hoe meer 'vaste gegevens' er beschikbaar zijn door middel van boringen of andere geofysische technieken, des te beter de inversie is en des te beter het lagenmodel overeenkomt met de werkelijkheid. In de software, die speciaal hiervoor ontwikkeld is in Denemarken, kunnen deze randvoorwaarden worden meegegeven. Uiteindelijk levert dit een driedimensionaal beeld van de weerstandsopbouw van de ondergrond op.



Afb. 2: Meetprincipe van geofysische SkyTEM-metingen vanuit de lucht.

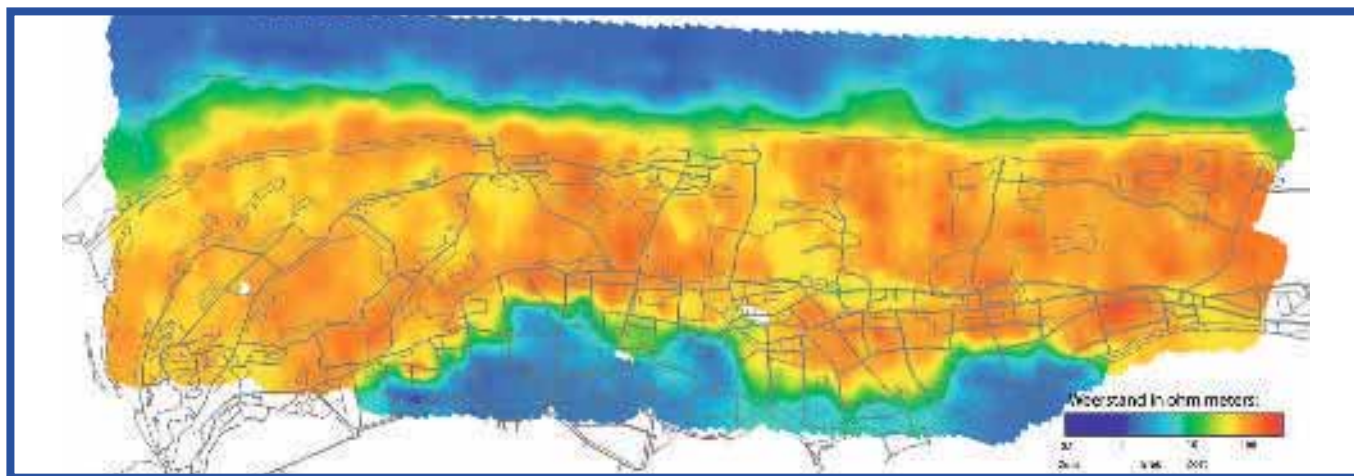
De volgende stap is de vertaling van de weerstand naar lithologie en waterkwaliteit. Dit is in feite ook een equivalentieprobleem, maar onafhankelijk van de gebruikte methode, omdat TDEM alleen weerstanden meet. Bepaalde grondsoorten kunnen dezelfde weerstand hebben afhankelijk van de waterkwaliteit. Dit is echter ook weer goed op te lossen met extra informatie uit boorgaten, geleidbaarheidssonderingen en boorgatmetingen. Het uiteindelijke resultaat is een driedimensionaal beeld van de ondergrond ingedeeld naar lithologie en waterkwaliteit.

### Resultaten Terschelling

De polder op Terschelling is één van de gebieden die in aanmerking komen als

mogelijk nieuw wingebied voor de drinkwaterwinning. Om de risico's van het aantrekken van zout grondwater goed in te kunnen schatten, is het verkrijgen van een gedetailleerd inzicht in de ruimtelijke verdeling tussen zoet en zout grondwater en de verspreiding van kleilagen van essentieel belang. In de vorm van boringen, boorgatmetingen, geleidbaarheidssonderingen en hoge resolutie geofysische veldmetingen was al een redelijk beeld beschikbaar, maar nog sterk fragmentarisch, doordat het was gebaseerd op puntinformatie. Daaruit viel in ieder geval uit af te leiden dat op sommige plekken het verloop heel grillig kan zijn.

De SkyTEM-metingen vonden in september 2009 plaats. In twee dagdelen is Terschelling



Afb. 3: Meetresultaat op Terschelling op een diepte van 25 tot 30 meter. Rode, oranje, gele en groene kleuren: zoet grondwater. Blauwe kleuren: zout en brak grondwater.

min of meer eilanddekkend 'bevlogen'. Voordat de data bij de universiteit van Århus zijn bewerkt en geïnterpreteerd naar een driedimensionaal weerstandsmodel, vond een vergelijking plaats tussen de bestaande en de ruwe SkyTEM-gegevens om te controleren in hoeverre extra randvoorwaarden noodzakelijk waren voor het verkrijgen van een betrouwbaar model. Dit bleek een belangrijke stap. Het uiteindelijke resultaat is een waardevol, betrouwbaar en relatief gedetailleerd model van de ondergrond. Zo was het met SkyTEM mogelijk de complete zoetwaterbel onder het eiland, tot 100 meter diep, nauwkeurig in kaart te brengen (uiteraard mede dankzij het hoge weerstandscontrast). Ook werd zichtbaar (metingen op het strand toonden dit in 2007 al aan) dat de zoetwaterbel een verbreiding buiten de laagwaterlijn onder het zeewater kent. Met behulp van de SkyTEM-gegevens zijn de contouren van die zoetwaterbel in kaart gebracht. In de polder bleken de al eerder aangetoonde grote verschillen in de verbreiding van zoet en zout grondwater, op korte afstand van elkaar, gedetailleerd en continu in kaart te kunnen worden gebracht. Ook binnen de zoetwaterbel waren nog tal van andere weerstandsverschillen te zien, die waarschijnlijk overeenkomen met het voorkomen van Holocene kleilagen.

### Wat kunnen we met deze resultaten?

De SkyTEM EM-gegevens geven een

gedetailleerd beeld van het voorkomen van zoet en zout grondwater maar ook van de opbouw van de bodem, een soort MRI-scan van de ondergrond. Met deze informatie snappen we beter hoe het hydrologische systeem van Terschelling functioneert. Met de uitkomsten van dit onderzoek zijn we in staat onze geohydrologische modellen te verfijnen en aan te passen, vooral aan de randen waar veelal informatie ontbreekt. Effectberekeningen van bijvoorbeeld de verplaatsing van de waterwinning of klimaatverandering zullen hiermee nog nauwkeuriger worden. De SkyTEM-gegevens kunnen ook helpen bij de selectie van een locatie voor een nieuwe winning en bij het bepalen van locaties voor gedetailleerde hoge resolutie geofysische metingen om het nieuwe wingebied zelf beter in kaart te brengen.

### Heeft *airborne* EM toekomst?

Aan informatie over de diepere ondergrond bestaat continu behoefte. Niet elke plek is echter gemakkelijk toegankelijk en om de locaties voor kostbare diepere boringen te selecteren en te optimaliseren is (regionale) informatie van de diepere ondergrond zeer essentieel. *Airborne* EM-meettechniek is voor dit soort ontoegankelijke gebieden een praktisch meetalternatief. Kan *airborne* EM de veldmetingen vervangen? Nee, om de elektromagnetische metingen uit de lucht te kunnen verifiëren blijven oude of nieuwe veldmetingen noodzakelijk. Maar het is wel

zo dat de intensiteit waarmee deze moeten worden toegepast, in vergelijking met een onderzoek zonder *airborne* EM, fors naar beneden kan. Qua kosten-batenverhouding is deze wijze van onderzoek zeer kostenefficiënt. Het mes snijdt aan twee kanten: vliegen lijkt kostbaar, maar voor hetzelfde onderzoeksgeld of minder krijg je gebiedsdekkend gedetailleerde informatie die kan worden geoptimaliseerd met oude en nieuwe veldmetingen.

### LITERATUUR

- 1) Kok A., E. Auken, M. Groen, J. Ribeiro en F. Schaars (2010). Using ground based geophysics and airborne transient electromagnetic measurements (SkyTEM) to map salinity distribution and calibrate a groundwater model for the island of Terschelling - The Netherlands. Program and proceedings book SWIM 2010. Azores pag. 121-124.
- 2) Kok A., M. Groen, K-J. van der Made en V. Post (2008). The use of mapping the salinity distribution using geophysics on the island of Terschelling for groundwater model calibration. Program and proceedings book SWIM 2008. Naples Florida pag. 124-127.
- 3) Auken E., A. Christiansen, J. Westergaard, C. Kirkegaard, N. Foged en A. Viezzoli (2009). An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system. Exploration Geophysics 40, pag. 184-192.
- 4) Viezzoli A., A. Christiansen, E. Auken en K. Sørensen (2008). Quasi-3D modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion. Geophysics 73, pag. F105-F113.

Afb. 4: Dwarsdoorsnede Terschelling ter hoogte van Midsland.

