



STOWA  
T.a.v. ir. H. van Hemert  
Postbus 2180  
3800 CD AMERSFOORT  
NEDERLAND

<b>Datum</b>	<b>Ons kenmerk</b>	<b>Uw kenmerk</b>	<b>Aantal pagina's</b>
23 mei 2014	1208066-021-BGS-0004-evdl	JG131210004/474.60 8/HVH	11
<b>Contactpersoon</b>	<b>Doorkiesnummer</b>	<b>E-mail</b>	
Victor Hopman	+31 (0)88 33 57 306	victor.hopman@deltares.nl	

**Onderwerp**

Motivatie keuze geofysische meettechnieken tweede pilot boezembodem

Geachte heer Van Hemert,

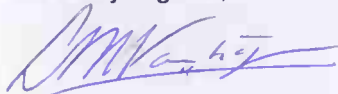
Voor bepaling van de bodemopbouw (aanwezigheid en dikte afsluitende laag op een waterbodem) heeft Deltares in 2012-2013 een pilot uitgevoerd op drie locaties: De Vecht (bij Nigtevecht), De Donk en op de Vlaardingervaart (tussen Rotterdam en Delft).

Deze pilot is uitgevoerd met akoestische technieken. Een belangrijk deel van de metingen is succesvol verlopen en een beperkt deel van de metingen niet. Bij deze laatste metingen waren of de ondergrondomstandigheden of de terreinomstandigheden te complex om met de betreffende meettechniek succesvol te zijn. Op basis van de ervaringen uit deze pilot stellen wij voor een tweede pilot uit te voeren met aangepaste akoestische technieken en andere geofysische meettechnieken.

In de bijlage treft u de motivatie aan van de in te zetten geofysische meettechnieken bij een tweede pilot. In de bijlage worden de individuele technieken beschreven en worden voorbeelden gegeven van eerdere toepassingen op water waaruit blijkt dat de techniek mogelijk succesvol kan worden toegepast.

Graag lichten wij de mogelijkheden toe in een gesprek.

Met vriendelijke groet,

b/a 

dr. R.M. Hoogendoorn  
Afdelingshoofd Toegepaste geologie en geofysica  
Unit Bodem- en Grondwatersystemen

**Bijlage**

Motivatie geofysica 2<sup>e</sup> pilot



Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
2/11

## **Bijlage – Motivatie geofysische meettechnieken voor een tweede pilot boezembodem**

### **1 Inleiding**

#### **1.1 Aanleiding**

Voor bepaling van de bodemopbouw onder de bodem van een boezem (aanwezigheid en dikte afsluitende (klei)laag onder een waterbodembodem) heeft Deltares in 2012-2013 een pilot uitgevoerd op drie locaties: de Vecht bij Nigtevecht, bij De Donk en op de Vlaardingervaart tussen Rotterdam en Delft. Dit onderzoek richtte zich op de inzet van akoestische technieken met hoge resolutie, die normaal gesproken in de offshore geofysica toegepast worden. Deze technieken bleken, op een aantal locaties/situaties na, goede resultaten te leveren. Daarnaast heeft deze pilot waardevolle inzichten geleverd in het toepassen van dit type meettechnieken op een boezem. De redenen voor de mindere prestaties op sommige locaties waren de mogelijke aanwezigheid van gas in de bodem, een ongunstige overgang tussen water en sediment, of reflecties van het akoestische signaal aan het wateroppervlak (zogenoemde multiples). Op deze locaties kunnen aanvullende geofysische technieken en een aanpassing op reeds toegepaste akoestische technieken uitkomst bieden, omdat bovenstaande oorzaken minder of geen rol spelen. Hierbij is het toepassen van het zgn. 'One sweep survey' concept belangrijk, waarbij gecombineerd beschikbare (punt)informatie, kennis en de inzet van verschillende, ruimtelijke geofysische technieken gecombineerd moet leiden tot het vaststellen van de juiste methodiek voor boezembodem onderzoek.

#### **1.2 Doel**

Het doel van dit memo is het geven van een overzicht van bestaande geofysische technieken, waarvan ingeschat wordt dat deze succesvol kunnen worden ingezet bij het onderzoek naar de aanwezigheid en dikte van slecht doorlatende grondlagen onder de boezembodem. Tevens wordt een onderbouwd voorstel gedaan voor de inzet van deze technieken bij een afrondende pilot. Het uiteindelijke doel is het vinden van een integrale meettechniek waarmee de relevante parameters op een efficiënte manier onder deze boezems in kaart worden gebracht. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de afsluitende laag kan bestaan uit een kleilaag met voldoende dikte, maar ook uit de combinatie van een kleilaag met een sliblaag. De mogelijk aanwezige sliblaag dient derhalve ook gedetecteerd te worden.

### **2 Overzicht geofysische technieken**

In dit overzicht zijn geofysische technieken opgenomen waarvan op basis van ervaring en expert kennis wordt ingeschat dat deze zinvol ingezet kunnen worden voor onderzoek naar de aanwezigheid en dikte van de afsluitende laag op een boezembodem.



Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
3/11

## 2.1 Aanvullende akoestische techniek – alternatieve Xstar

In de eerste pilot is een subbottom profiler ingezet van het type SB512i X-star met een frequentiebereik van 0,5 -12 kHz. Op sommige trajecten kon de dikte van de afdichtende lagen niet bepaald worden doordat de reflectie op deze lagen overschaduwde werd door zogenaamde multiples. Bij een multiple kaatst het akoestische signaal meerdere keren tussen de bodem en het wateroppervlak op en neer. Deze multiples geven daardoor geen nieuwe informatie over de bodemopbouw onder de waterbodem, maar verstoren juist wel het signaal dat uit de diepere bodem komt. Het effect van de multiples kan mogelijk voorkomen worden door de X-star dicht bij de bodem te brengen, zodat het apparaat de weerskaatsing naar het wateroppervlak deels afschermt.

Aanvullend kan de verticale resolutie van de X-star verbeterd worden door de inzet van een compacte X-star met een hogere frequentie (type SB424, 2 - 24 kHz). Hiermee kan de dikte nauwkeuriger worden vastgesteld.

De compacte X-star kan achter de boot worden gesleept. Om de X-star (reguliere of compacte versie) dicht bij de bodem te brengen, kan het apparaat op een slede bevestigd worden die dichtbij de waterbodem door het water beweegt ('dicht bij de bodem geofysica'). De mogelijke aanwezigheid van objecten op de waterbodem kan de apparatuur echter beschadigen. Een andere optie is bevestiging van de X-star (reguliere of compacte versie) aan de boot met een verticale (paal)constructie. Hiermee kan de hoogte van het apparaat boven de waterbodem gevarieerd worden, waarmee het versturende effect van de multiples verkleind kan worden.

## 2.2 Grondradar onderzoek op water

Een andere stoorfactor voor het akoestisch meten was de aanwezigheid van gas in de waterbodem. Reguliere reflectie seismiek is een akoestische methode die gebruik maakt van compressie-golven. Hierbij wordt het signaal gedempt door gas. Bij aanwezigheid van gas in de bodem dienen de metingen daarom aangevuld te worden met andere geofysische technieken die niet of minder gevoelig zijn voor de aanwezigheid van ondiep gas (afkomstig van de afbraak van organisch materiaal).

De grondradar (ground penetrating radar, GPR) is een geofysische techniek die het ook mogelijk maakt om de opbouw van de ondergrond te visualiseren. Net als reflectie seismiek is GPR een afbeeldingstechniek waarbij het signaal op specifieke objecten of laagovergangen reflecteert. Deze techniek is gebaseerd op hoogfrequente elektromagnetische signalen (orde 50-2000 MHz) in plaats van een akoestisch signaal.

In een omgeving met een hoge elektrische geleidbaarheid dringt het GPR signaal niet goed door. In zout en brak water functioneert het systeem daardoor niet, maar de top van een kleilaag onder een zandlaag is daardoor juist weer goed zichtbaar als een harde reflector. GPR wordt ingezet om, waar mogelijk, laagovergangen in kaart te brengen en aanvullend informatie te geven over de aanwezigheid van klei, veen en zand. Het is op het land een succesvolle techniek, daar waar het GPR signaal voldoende de bodem indringt.

GPR op water vereist een aangepaste meetopstelling ten opzichte van metingen op land. Het succes van deze techniek op het water is voornamelijk gebaseerd op een combinatie van de elektrische geleidbaarheid van het water en de afstand die het signaal door het water moet reizen om de bodem te bereiken. Hoe groter de afstand, hoe minder sterk het signaal is wat de bodem indringt. Bovendien geldt ook dat er meer demping optreedt naarmate water elektrisch



**Datum**  
23 mei 2014

**Ons kenmerk**  
1208066-021-BGS-0004-evdl

**Pagina**  
4/11

geleidender is. Daarom is het verstandig de GPR apparatuur zo dicht mogelijk bij de waterbodem te plaatsen.

Voor het uitvoeren van de metingen is het een optie om de GPR op de bodem van een rubberboot te leggen. In ondiep, zoet water is het GPR signaal veelal sterk genoeg voor de visualisatie van de opbouw van de waterbodem (zie Figuur 2.1 voor de toepassing en Figuur 2.2 voor een voorbeeld van een meetresultaat).



*Figuur 2.1 Voorbeeld van het gebruik van grondradar apparatuur vanuit een rubberboot.*

*Bron: <https://sensoft.ca/Resources/Case-Studies/Geotech-Environment/GPR-Bathymetry.aspx>.*



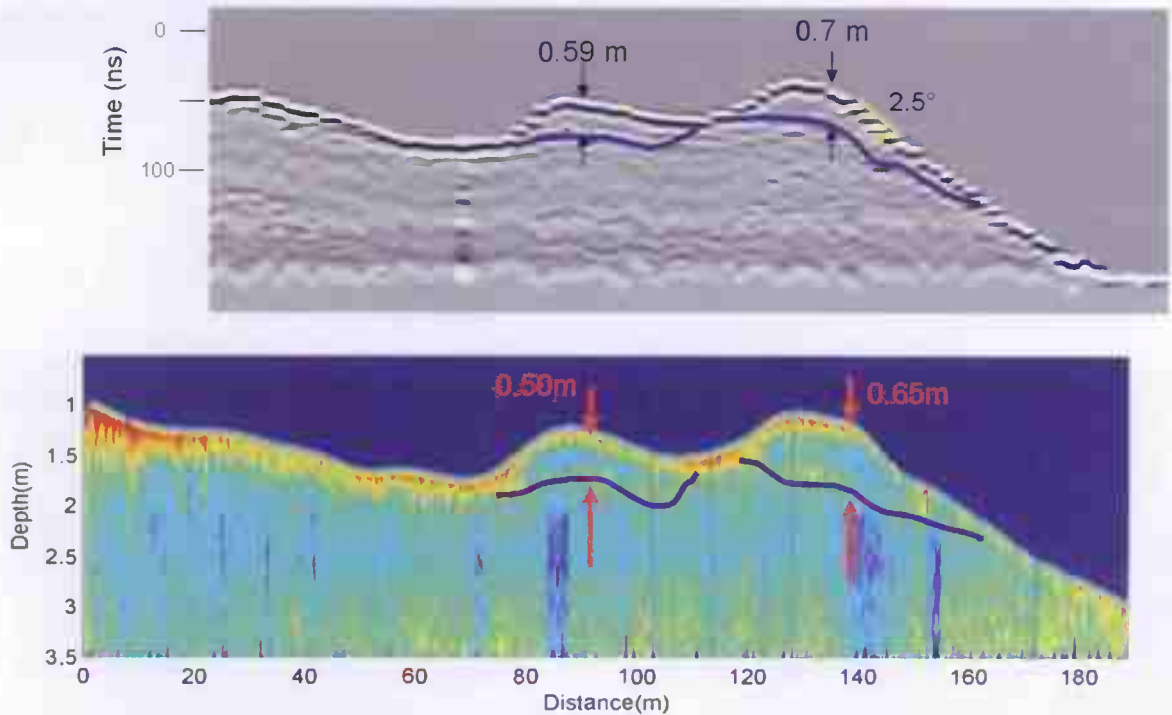


Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
5/11

## shoreline



Figuur 2.2 Boven: grondradar resultaat behaald met metingen vanuit een rubberboot op een meer. Onder: Resultaat van akoestische metingen van dezelfde meetlijn.

Bron: [http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE618\\_Exploration\\_of\\_Great\\_Lakes/Students/Kevin\\_Craig/SurveyResult.htm](http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE618_Exploration_of_Great_Lakes/Students/Kevin_Craig/SurveyResult.htm).

Indien de afstand tussen de GPR en de waterbodem te groot is, kan deze, net zoals bij de X-star, verkleind worden door bevestiging van een waterdichte GPR aan een verticale constructie of op een slede op de waterbodem. De maximale diepte waarbij het GPR signaal nog voldoende penetratie in de waterbodem heeft, hangt af van de geleidbaarheid van het water en van de onderzoeksdiepte in de waterbodem.

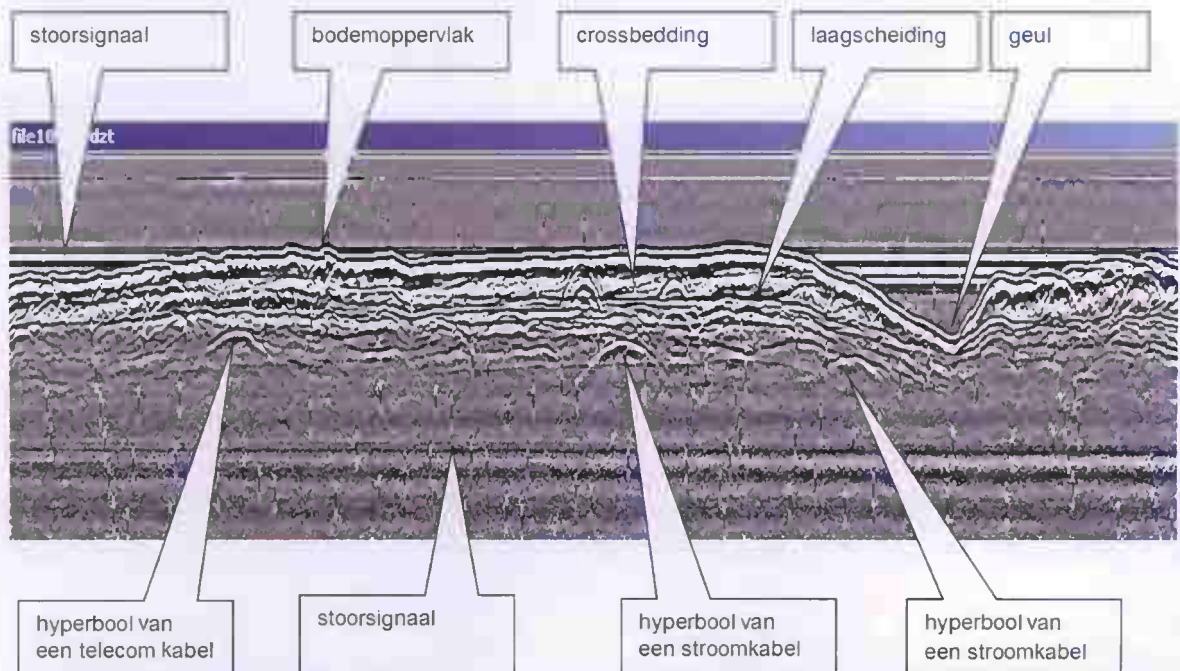
GPR bevestigd aan een paal aan een boot, is succesvol ingezet bij het detecteren van kabels en leidingen op de Waal. Een groep van bedrijven hebben in 2003-2004 daarvoor een onderwatergrondradar ontwikkeld (Devlin et al., 2006). Een 500 MHz antenne, in een waterdichte behuizing, werd aan een paal bevestigd. Deze paal kon in hoogte versteld worden, zodanig dat de afstand tot de waterbodem tussen 1 en 2 m bedroeg. Bij een grotere afstand was het signaal onvoldoende sterk om reflecties vanuit het sediment van een diepte groter dan ca. 2,5 m (de onderzoeksdiepte) te detecteren. Deze setup functioneerde goed. Naast de kabels en leidingen werden ook interne structuren in het sediment waargenomen. Een voorbeeld van een radargram is opgenomen in Figuur 2.3.



Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
6/11



Figuur 2.3 Voorbeeld van radargram verkregen met een 500 MHz onderwater grondradar op de Waal, waarbij een aantal karakteristieke reflecties zijn aangegeven. (Devlin et al., 2006).

In de boezemwateren is veelal sprake van zoetwater met een relatief lage elektrische geleidbaarheid. Dit is gunstig voor de penetratie van het signaal. De penetratie hangt verder af van de frequentie van het meetsignaal, waarbij geldt dat hoe lager de frequentie des te beter de penetratie, met een afnemende resolutie. Hoe hoger de frequentie des te beter de resolutie, maar met een afname van de penetratie in de bodem. Er is dus altijd een trade-off tussen penetratie en resolutie.

Het GPR signaal wordt in klei gedempt. Bij een hoge frequentie dringt het GPR signaal niet door de kleilaag heen. Er kan dan bijvoorbeeld wel onderscheid gemaakt worden tussen locaties waar wel en geen klei aanwezig is (gaten in de boezembodem). Bij een lage frequentie kan mogelijk wel in de klei doorgedrongen worden en kan de dikte bepaald worden of in ieder geval de aanwezigheid (top kleilaag). De top van de kleilaag is een belangrijke indicator voor de aanwezigheid van waterremmende lagen, indien deze ontbreekt, is er sprake van een potentieel 'lek' in de waterbodem. De invloed van een sliblaag op de waterbodem op het GPR signaal is nog onbekend. Mogelijk zorgt slib voor verdere demping van het signaal als het bestaat uit kleimineralen.

Voor het boezemkade onderzoek is de inzet van meerdere frequenties (tussen 100 MHz en 500 MHz) nodig om de mogelijkheden van het GPR-meetsysteem optimaal te benutten.

## 2.3 Geo-elektriek op water

De geo-elektrische methode wordt on-shore veel ingezet om met behulp van een actieve elektrische stroombron de elektrische weerstand van de bodem in kaart te brengen. Dit is niet zozeer een afbeeldingstechniek zoals reflectie seismiek en GPR, maar levert een volume bepaling van de elektrische eigenschappen van de grond.



Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
7/11

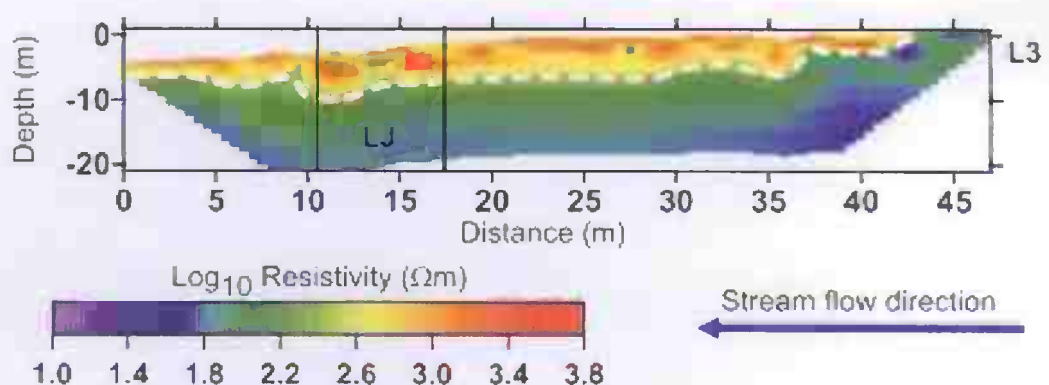
Bij geo-elektriek op land worden twee meetmethoden toegepast: er worden stalen pinnen in de grond geplaatst als elektrische contacten of er worden speciale sleepelektroden ingezet. Bij toepassing op water kan ook gebruik gemaakt worden van sleepelektroden. De techniek maakt gebruik van het verschil in elektrische geleidbaarheid tussen zand en klei/veen om deze lagen te kunnen onderscheiden. Toepassingen zijn onder andere het in kaart brengen van verontreinigingen, de grondwaterspiegel, verzilting, detectie van holtes en tunnels, de stabiliteit van hellingen en het inschatten van in situ gesteente eigenschappen als verzadiging, porositeit en permeabiliteit.

Er zijn meerdere voorbeelden van de toepassing van geo-elektriek op water. De techniek vormt potentieel een goede aanvullende methode om ook de eigenschappen en laagopbouw met een andere dan de akoestische parameter te karakteriseren. De techniek heeft geen last van de aanwezigheid van gas in de bodem.

Een voorbeeld van geo-elektriek op water is het Aquares systeem van Demco. Ook Deltares beschikt over apparatuur voor de inzet van geo-elektriek op water.

Indien het water erg geleidend is (bijv. zeewater) is de indringing van de elektrische stroom in de bodem geringer, maar levert (in tegenstelling tot GPR) toch geo-elektrisch bruikbare informatie over de ondergrond op. Bij boezemkades is geen sprake van zout water, hierdoor zal een groot deel van de stroom de bodem ingaan.

Een voorbeeld van het gebruik van geo-elektriek in water is een survey uitgevoerd in een stroombed. Hierbij zijn klassieke elektroden (pennen) in de bodem van een waterloop geplaatst (Crook et al., 2008). Deze studie laat zien dat het mogelijk is om onder water elektroden te plaatsen. In deze setting kon met behulp van contrasten in weerstand onderscheid gemaakt worden tussen de rivier afzettingen en de vaste gesteenten daaronder (Figuur 2.4).



Figuur 2.4 Resultaat van geo-elektriek onder water voor de detectie van een laagovergang (aangepast uit Crook et al., (2008).

De elektrische weerstand is onder andere afhankelijk van de mineralogische samenstelling van de ondergrond, de porositeit en de hoeveelheid en samenstelling van het poriewater. Er is een contrast in weerstand tussen zand (hoge elektrische weerstand) en klei (lage elektrische weerstand). De configuratie van de elektroden heeft invloed op het oplossend vermogen van de weerstandscontrasten, zoals laterale verschillen of contrasten in de diepte. De resolutie en het dieptebereik hangen af van de gekozen elektroden configuratie. Het dieptebereik hangt





Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
8/11

samen met de grootste afstand tussen de stroomelektroden. Als vuistregel kan uitgegaan worden van een dieptebereik van ca. een derde van de afstand tussen de stroomelektroden.

Orlando (2013) onderzocht de verschillende ondiepe geo-elektrische meetconfiguraties met zowel een drijvende als een onderwater elektroden-kabel. Uit zijn studie volgde het advies om een onderwaterkabel te gebruiken met zogenaamde Schlumberger of Wenner configuratie. De drijvende elektroden-kabel en een andere veel gebruikte meetconfiguratie on-shore (dipool-dipool) geven minder goede resultaten bij de bepaling van een dunne laag onder de waterbodem. In het geval van de boezembodem wordt verwacht dat door het kiezen van de juiste configuratie onderscheid gemaakt kan worden tussen zand en klei in de boezembodem en daarmee de afsluitende laag bepaald kan worden.

## 2.4 Elektromagnetische metingen op water

Elektromagnetische metingen zijn gebaseerd op inductie van elektromagnetische signalen. Door een zendspoel wordt een elektromagnetisch veld opgewekt dat in de ondergrond wervelstromen induceert. De sterkte van deze stromen hangt af van de elektrische geleidbaarheid. Het magnetische veld opgewekt door de zendspoel en door de in de grond geïnduceerde stromen wordt gemeten met een ontvangspoel. Door de grootte en fase van het ontvangen veld te meten, kan de elektrische geleidbaarheid afgeleid worden. Een voordeel van deze techniek is dat er geen contact met de grond nodig is. Hierdoor is snelle data-acquisitie mogelijk.

De elektrische geleidbaarheid is onder andere afhankelijk van de mineralogische samenstelling van de ondergrond, de porositeit en de hoeveelheid en samenstelling van het poriewater. Over het algemeen is verzadigde kleigrond elektrisch geleidender dan verzadigde zandgrond.

Analoog aan elektromagnetische metingen op land kunnen vergelijkbare technieken ingezet worden op water. Het dieptebereik tot waar de elektromagnetische signalen gevoelig zijn hangt af van de frequentie van het elektromagnetische signaal, de spoelafstand en de geleidbaarheid van het medium. Als indicatie: in zoet oppervlaktewater is met een veel gebruikte signaalfrequentie van 10 kHz een penetratie diepte van ca. 15 meter mogelijk. Omdat er sprake is van een lagensysteem (water, klei, zand) zal de werkelijke penetratiediepte kleiner zijn.

Met de aanname van constante opbouw van de geleidbaarheid in de waterkolom en constante waterdiepte kunnen EM metingen op een snelle manier indicaties geven voor de aan-of afwezigheid van kleilagen. Bij het gebruik van meerdere spoelafstanden kan tevens de dikte van de kleilagen achterhaald worden. Indien stalen voorwerpen (bv damwanden) aanwezig zijn, veroorzaken deze een storende invloed op de EM metingen.

Er zijn meerdere systemen beschikbaar, zoals de DUALEM voor metingen vanaf het wateroppervlak (Figuur 2.5). Een meer experimenteel systeem is een apparaat waarbij de zend- en ontvangerspoelen onder water gesleept worden, zoals de "towed EM tool" van het Woods Hole Oceanographic Institution (Figuur 2.6).





Datum  
23 mei 2014

Ons kenmerk  
1208066-021-BGS-0004-evdl

Pagina  
9/11



*Figuur 2.5 Gebruik van een EM apparaat op water (DUALEM 421S).*

*Bron: <http://www.dualem.com/products/>*



*Figuur 2.6 Gesleepte EM tool van Woods Hole Oceanographic Institution (Evans, 2007).*

*Bron: <http://www.whoi.edu/science/GG/coastal/research/geophysics-1.html>*



## 3 Voorstel voor een tweede pilot boezembodem

De eerste pilot is uitgevoerd om te testen of bepaalde akoestische technieken de gewenste informatie kunnen leveren met betrekking tot het bepalen van de dikte van de cohesieve laag. Een belangrijk deel van de metingen is succesvol gebleken en een deel van de metingen niet. Bij deze laatste metingen waren of de ondergrondomstandigheden of de terreinomstandigheden te complex om met de betreffende meettechniek succesvol te zijn. Zoals mogelijke aanwezigheid van gas in de bodem, een ongunstige overgang tussen water en sediment, of reflecties van het akoestische signaal aan het wateroppervlak (multiples).

Op basis van de lessen uit deze pilot stellen wij een tweede pilot voor met een combinatie van de geofysische technieken zoals in dit memo beschreven. Het doel daarbij is het vinden van een integral, efficiënte methodiek om de bodem van boezemkades in kaart te brengen.

Een voordeel van geofysica ten opzichte van traditionele (punt) metingen is het verkrijgen van ruimtelijke, continue informatie. Echter, geofysica is een indirecte techniek waarbij het resultaat afhangt van vele factoren. Door het specialistische karakter van (innovatieve) meettechnieken past Deltares de zgn. One sweep survey toe, waarbij de kracht zit in het combineren van kennis, informatie en verschillende, elkaar versterkende, meettechnieken. Deltares heeft veel ervaring met de uitvoering van geofysisch onderzoek ten behoeve van het in kaart brengen van de opbouw van de ondergrond en is goed in staat om deze pilot uit te voeren, mede gezien het specialistische karakter ervan.

Voor een relevante tweede pilot gaat de voorkeur uit naar tenminste twee locaties met een verschillende geologische setting en wellicht ook verschillende terreinomstandigheden zoals variatie in waterdiepte, aanwezigheid van gas of een stalen (dam)wand. Het is wenselijk dat de bodemopbouw ter plaatse van de boezem nauwkeurig bekend is.

Om tot een juiste methodiek voor het bepalen van de opbouw van de boezembodem te komen zijn de volgende stappen voorzien:

- 1 Definiëren pilot; locaties, omvang;
- 2 Opstellen Plan van aanpak, waarbij deze memo geldt als uitgangspunt;
- 3 Uitvoeren One sweep survey; toepassen van technieken op boezemkades;
- 4 Analyseren metingen en concept rapport met methodiek voor bepaling van de bodemopbouw (aanwezigheid en dikte afsluitende laag op een waterbodem);
- 5 Feedback stakeholders;
- 6 Vaststellen van de juiste methodiek voor boezembodem onderzoek.



**Datum**  
23 mei 2014

**Ons kenmerk**  
1208066-021-BGS-0004-evdl

**Pagina**  
11/11

## 4 Referenties

Crook, N., Binley, A., Knight, R., Robinson, D., Zarnetske, J., and Haggerty, R., 2008, Electrical resistivity imaging of the architecture of substream sediments: *Water Resources Research*, v. 44, no. 4.

Devlin, A., Kruiver, P. P., and Seegers, H. C. M., 2006, Ontwikkeling van een meetsysteem voor het detecteren van kabels en leidingen op de Waal: CSO Report 05.088.

Evans, R. L., 2007, Using CSEM techniques to map the shallow section of seafloor: From the coastline to the edges of the continental slope: *Geophysics*, v. 72, no. 2, p. WA105-WA116.

Orlando, L., 2013, Some considerations on electrical resistivity imaging for characterization of waterbed sediments: *Journal of Applied Geophysics*, v. 95, no. Complete, p. 77-89.

Opgesteld door:  
Pauline Kruiver

Review door:  
Marco de Kleine