

Advies voor de toepassing van *ground-penetrating radar* bij de inventarisatie van de grondwaterdynamiek

M. Knotters

Alterra-rapport 436

Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001

REFERAAT

Knotters, M., 2001. *Advies voor de toepassing van ground-penetrating radar bij de inventarisatie van de grondwaterdynamiek*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 436. 30 blz.; 1 tab.; 28 ref.

Ground-penetrating radar (GPR) biedt mogelijk een nauwkeurig alternatief voor arbeidsintensieve metingen van de grondwaterstand in boorgaten. De GPR-metingen kunnen als hulpinformatie dienen bij geostatistische interpolatie van grondwaterstanden. Op basis van literatuurstudie en verkenning van het internet is gebleken dat relatief weinig kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van grondwaterstandsmetingen met behulp van GPR bekend is. Het verdient daarom aanbeveling om een validatie-experiment uit te voeren alvorens GPR grootschalig in te zetten bij inventarisaties.

Trefwoorden: grondwaterstand, freatisch grondwater, geofysische methoden

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 30,00 (€ 13,00) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 436. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra is de fusie tussen het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN) en het Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC). De fusie is ingegaan op 1 januari 2000.

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Probleemstelling	9
1.2 Achtergrond	10
1.3 Projectdoelstelling	10
1.4 Opbouw van het rapport	10
2 GPR en de grondwaterstand in de literatuur	13
3 Verkenning Internet	17
4 Veldexperiment	19
Conclusies en aanbevelingen	21
Literatuur	23
<i>Aanhangsel</i>	
1 Toepassing GPR in Massachusetts	27

Woord vooraf

De grondwaterstand is een variabele in het landelijk gebied waaraan veel waarnemingen worden verricht, om te kunnen voorzien in een voortdurende behoefte aan actuele en betrouwbare informatie ten behoeve van uiteenlopende probleemstellingen. De grondwaterstand wordt gemeten in buizen of in boorgaten. In het begin van de jaren vijftig, toen het landelijke meetnet van grondwaterstanden ontstond, werd de grondwaterstand nog beschouwd als een eenvoudig en goedkoop te meten variabele. Inmiddels zijn de arbeidskosten echter zodanig gestegen dat de grondwaterstand een eenvoudige maar duur te meten variabele is geworden. De vraag naar gedetailleerde en nauwkeurige informatie over de grondwaterstand neemt echter eerder toe dan af. Om hieraan te kunnen voldoen zijn er waarnemingen nodig buiten de meetnetten van grondwaterstanden. Tot nu toe worden deze waarnemingen verricht in boorgaten. Deze waarnemingen zijn duur, omdat er een gat moet worden geboord, en na een insteltijd dit gat moet worden teruggevonden om er de grondwaterstand in te meten. Vanzelfsprekend is er behoefte aan goedkopere methoden. Het mooiste zou zijn als je geen gat meer hoeft te boren en meteen 'met één druk op de knop' de grondwaterstand kon meten. Ground-penetrating radar lijkt aan dit ideaalbeeld te voldoen, totdat je de radarbeelden ziet die voor een leek niet meer voorstellen dan een grauwe wirwar van lijnen. Ervaren ogen kunnen hier echter de grondwaterstand in herkennen.

Toestellen voor ground-penetrating radar zijn duur in aanschaf. Er dient ook in randapparatuur te worden geïnvesteerd en een goede interpretatie van de radarbeelden maakt een kennisinvestering noodzakelijk. Voordat tot deze investeringen wordt overgegaan is het verstandig om zich te verdiepen in de operationele mogelijkheden en beperkingen van de diverse instrumenten en in de nauwkeurigheid waarmee de grondwaterstand kan worden waargenomen. Dit rapport is een verslag van het noodzakelijke voorwerk. Het onderzoek vond plaats in het kader van het LNV-programma 328, Geodata Groene Ruimte. Ik bedank mijn collega Willy de Groot hartelijk voor zijn waardevolle opmerkingen bij het concept van dit rapport. Verder wil ik graag Bart J.M. Goes van TNO-NITG in Delft, prof. Laurence R. Bentley van de University of Calgary en dr. Jim L. Doolittle (USDA-NRCS, Newton Square, Pennsylvania) bedanken voor de informatie die zij mij verstrekt hebben.

Samenvatting

Om een gebiedsdekkend beeld van de grondwaterdynamiek te verkrijgen, worden 'momentopnames' verricht in een groot aantal boorgaten. Deze momentopnames zijn kostbaar, omdat er gaten moeten worden geboord en nadat de grondwaterstand zich heeft ingesteld de boorgaten opnieuw moeten worden bezocht om de grondwaterstand te meten. Een bijkomend probleem is dat in boorgaten en grondwaterstandsbuizen de diepte tot zogenaamde tijdelijke grondwaterspiegels of schijnspiegels niet nauwkeurig kan worden gemeten. Het **doel** van dit onderzoek is om te beoordelen of *Ground-Penetrating Radar* (GPR) een nauwkeurig alternatief is voor de boorgatmetingen en inzicht te krijgen in de apparatuur die voor dit doel beschikbaar is.

In de literatuur zijn 22 referenties gevonden waarbij GPR is toegepast om de grondwaterstand te meten. Bij acht van deze referenties wordt kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van de gemeten grondwaterstanden gegeven. De fouten lopen uiteen van enkele centimeters tot circa 70 cm. Naarmate de grondwaterstand zich dieper bevindt lijkt de nauwkeurigheid af te nemen. Alle toepassingen hebben betrekking op zandige sedimenten. De instrumenten die voor ondiepe toepassingen (0-3 m) worden gebruikt zien er gebruiksvriendelijk uit; ze hebben het formaat van een gazonmaaier en kunnen voortgeduwd of getrokken worden.

Het internet biedt veel informatie over studies met GPR en leveranciers van apparatuur. Uit de informatie blijkt dat het om grote investeringen gaat (ca. Hfl 100.000,= voor een instrument).

Op basis van de literatuur en de informatie die het internet biedt kan worden geconcludeerd dat met GPR nauwkeurige metingen van de grondwaterstand kunnen worden verkregen in zandige, homogene gronden. De investeringskosten zijn echter hoog en kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van GPR-metingen van de grondwaterstand is slechts beperkt in de literatuur aanwezig. Het verdient daarom aanbeveling om middels een veldexperiment meer inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid en operationaliteit. Een veldexperiment in Nederland dient beperkt te blijven tot de open zandgronden; kleiïge en venige lagen beïnvloeden de radarreflectie van de grondwaterspiegel nadelig. Een validatie-experiment met het Ekko-1000-toestel dat door TNO-NITG wordt gebruikt voor ondiepe toepassingen zou interessant zijn. Uit een objectieve vergelijking van onafhankelijke boorgatmetingen en radarinterpretaties kan een kwantitatieve maat voor de nauwkeurigheid van GPR worden afgeleid.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

De freatische grondwaterstand is een belangrijke factor in de ecologische, milieu- en landbouwkundige condities van de groene ruimte. Daarom wordt al ruim een halve eeuw de freatische grondwaterstand gemeten in een landelijk netwerk van grondwaterstandsbuizen. Naast het landelijke meetnet bestaan provinciale en gemeentelijke meetnetten en meetnetten van waterschappen, waterwinbedrijven en natuurbeheerinstanties. Al deze meetnetten hebben een min of meer permanent karakter. In de buizen wordt de grondwaterstand waargenomen met een vaste frequentie, bijvoorbeeld per kwartaal, per maand of per halve maand. Voor regionale studies hebben deze meetnetten echter een te geringe dichtheid om de grondwaterstand voldoende nauwkeurig in ruimte en tijd te kunnen voorspellen. Verder zijn vaak waarnemingen gewenst op tijdstippen die buiten de vaste frequentie vallen. Om deze redenen worden vaak aanvullende waarnemingen verricht in tijdelijke grondwaterstandsbuizen en in boorgaten. In het laatste geval is er vaak sprake van een 'momentopname'. Als in grondwaterstandsbuizen is vastgesteld dat de grondwaterstand zich op een bepaald moment op of rond een karakteristiek niveau bevindt, zoals de gemiddeld hoogste of gemiddeld laagste grondwaterstand, resp. GHG of GLG, dan wordt op dat moment in een groot aantal boorgaten de grondwaterstand waargenomen. Op die manier ontstaat een ruimtelijk beeld van bijvoorbeeld de GHG en de GLG. Momentopnames zijn echter arbeidsintensief. Locaties moeten tweemaal bezocht worden: eerst om een boorgat te maken en een etmaal later om de grondwaterstand te meten. Daarnaast levert een boorgatmeting puntinformatie op, terwijl we geïnteresseerd zijn in de diepte van de grondwaterspiegel die zich uitstrekt over een bepaalde oppervlakte.

Een ander probleem is dat het in gronden met stagnerende lagen vaak niet duidelijk is of het wel de freatische grondwaterstand is die wordt waargenomen in een boorgat of een grondwaterstandsbuis. De freatische grondwaterstand is namelijk het niveau van het eerste 'vrije' water - met een drukhoogte die gelijk is aan de atmosferische druk - dat je tegenkomt als je een gat in de grond maakt. Dit is voor plantengroei een relevant niveau, omdat hiermee bijvoorbeeld de vochtleverantie aan de wortels kan samenhangen. De aanduiding 'schijngrondwaterstand' voor de diepte tot de grondwaterspiegel die zich tijdelijk boven een stagnerende laag bevindt is dus misplaatst. Het eerste 'vrije' grondwater kan heel goed een tijdelijke spiegel op een stagnerende laag betreffen. Waarom zouden we de diepte tot deze spiegel niet gewoon de grondwaterstand noemen, en kunnen we deze diepte met GPR nauwkeuriger meten dan in boorgaten en grondwaterstandsbuizen?

Inmiddels is er een techniek ontwikkeld waarmee de grondwaterstand wellicht op een minder arbeidsintensieve manier continu kan worden gemeten: *ground penetrating radar* (GPR). In gronden met stagnerende lagen heeft GPR mogelijk het voordeel dat de meest ondiepe en dus praktisch relevante grondwaterspiegel wordt gereflecteerd. Freeland *et al.* (1998) wijzen op de toepassingsmogelijkheden van GPR bij het karteren van *perched water* (stagnerend water) en de relevantie van dit water met

voornamelijk horizontale stroming voor de uitspoeling van vervuilingen. Er is echter in Nederland nog weinig ervaring met betrekking tot het meten van ondiepe freatische grondwaterstanden m.b.v. GPR.

1.2 Achtergrond

GPR kent vele 'diepe' toepassingen. De instrumenten die hiervoor worden toegepast leveren geen nauwkeurige informatie op over de bodem tussen 0 en 2 m diepte. Bovendien waren deze toestellen meestal niet eenvoudig inzetbaar in het veldbodembkundig/hydrologisch onderzoek (Van Kuijk, 1987). Inmiddels zijn er echter makkelijk verplaatsbare GPR-instrumenten ontwikkeld voor verkenning van de ondiepe ondergrond. De grondwaterspiegel is met behulp van GPR waar te nemen als een continue reflectie, terwijl daarboven zogenaamde schijnspiegels op stagnerende lagen kunnen worden waargenomen (Young en Sun, 1999). Recent hebben er zelfs studies plaatsgevonden naar de nauwkeurigheid van GPR bij bodemvochtmetingen (Van Overmeeren *et al.*, 1997; Huisman *et al.*, 2001). Een mogelijk knelpunt is dat GPR de bovenkant van de volcapillaire of funiculaire zone reflecteert (ook wel *capillary fringe* genoemd), terwijl de freatische grondwaterspiegel zich lager bevindt, nl. op het niveau waarbij de drukhoogte gelijk is aan de atmosferische druk. De afwijking tussen beide niveaus varieert met het substraat waarin ze zich bevinden. Wellicht zijn GPR-metingen bruikbaar als hulpinformatie bij de ruimtelijke interpolatie van grondwaterstanden. De metingen zouden bijvoorbeeld als hulpvariabele in co-kriging, *external drift*-kriging (Goovaerts, 1997) of kriging gecombineerd met regressie (Ahmed en De Marsily, 1987).

1.3 Projectdoelstelling

Het **doel** van het project is om te beoordelen of *Ground-Penetrating Radar* (GPR) een nauwkeurig alternatief is voor de boorgatmetingen en inzicht te krijgen in de apparatuur die voor dit doel beschikbaar is. Hiertoe wordt op basis van literatuurstudie inzicht verworven in de nauwkeurigheid van GPR bij het meten van de grondwaterstand. Op basis van literatuurstudie en verkenning van het internet wordt GPR-apparatuur geïnventariseerd die voor het meten van de grondwaterstand kan worden gebruikt.

Het projectresultaat is een advies voor de toepassing van GPR bij inventarisaties van de grondwaterdynamiek.

1.4 Opbouw van het rapport

Het onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van GPR bij het inventariseren van de grondwaterstand startte met een literatuurverkenning, waarvan verslag wordt uitgebracht in hoofdstuk 2. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de resultaten van een verkenning op het internet gegeven, voor zover deze niet in hoofdstuk 2 als literatuurreferentie aan de orde zijn gekomen. In hoofdstuk 4 wordt een

beschouwing gegeven van het nut en de mogelijkheden om in Nederland de gebruiksmogelijkheden van GPR te onderzoeken in een veldexperiment. Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 GPR en de grondwaterstand in de literatuur

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de gepubliceerde ervaringen die zijn opgedaan met GPR bij het meten van grondwaterstanden.

Tabel 1 Literatuuroverzicht nauwkeurigheid GPR-metingen van de grondwaterstand

referentie	toestel	gebied	substraat	diepte	nauwkeurigheid
Anderson Jr. <i>et al.</i> , 2000	SIR System-8 120 MHz	North Carolina	zand	1-5 m	onbekend
Bachrach en Nur, 1998	100 MHz	onbekend	zand	0-2 m	onbekend
Bano <i>et al.</i> , 2000	GPR 100 MHz	Rijn, Elzas	rivierafzettingen, kwartair	ca. 7 m	onbekend
Bentley and Trenholm, 2001	100 MHz, 200 MHz	Red Deer River, Alberta (Can.)	fijn-grof zand, fijn-grof grind	ca. 3-6 m	$RMSE=0.2-0.6$ m ?
Beres <i>et al.</i> , 1995	100 MHz	Zwitserland, Rijnafzettingen	fluvioglaciaal	10 m	onbekend
Beres en Haeni, 1991	80 MHz	Connecticut	fijne lacustroglaciale afzettingen, grof zand en grind	ca. 20 m	onbekend
Birkhead <i>et al.</i> , 1996	SIR-10, 500 MHz	Botswana, Kruger National Park	medium sands to medium gravels, fluviatile deposits	0-2 m	$R^2 = 0.97$, $ME=0.08$ m
Branson <i>et al.</i> , 2000	SIR-10 A, 200 MHz	Tennessee	copper mine tailings	0-2 m	onbekend
Demanet <i>et al.</i> , 2001	50 MHz, 120 MHz	Roerdal	zand, grind	6 m	onbekend
De Vos, 1999	onbekend	Oost-Veluwezoo	zand	0-50 m	onbekend
Doolittle <i>et al.</i> , 2000	SIR System-2, 200 MHz	Indiana	fine sands	0-10 m	$R^2 = 0.9926 - 0.9994$ maximum residu 18-69 cm
Goes, 2001	50 MHz	Eerbeek, stuwwal	zand, klei (gestuwd preglaciaal)	5-10 m	onbekend
Goes en Oosterhof, 2000	50 MHz	Doorwerth, stuwwal	zand, klei (gestuwd preglaciaal)	10-20 m	onbekend

Iivari en Doolittle, 1994	onbekend	New Milford, Connecticut	loamy fine sand, gravelly loam sand	3-5 m	$R^2 = 0.74$, $RMSE = 0.35$ m (ranging from 0 - 0.7 m)
Johnson, D.G., jaartal onbekend	onbekend	Cape Cod, Massachusetts	sand and gravel	7-8 m	$RMSE=SDE = 0.55$ m
Nguyen <i>et al.</i> , 1998	80 MHz	Bennekom	zand	5-6 m	onbekend
Shih <i>et al.</i> , 1986	SIR System-8 300 MHz	Massachusetts Florida	1.coarse, glacio-fluvial 2.course-silty, sandy 1.sandy siliceous, hyperthermic	ca. 1 m ca. 2 m	onbekend $R^2=0.98$ $s_{res}^2 = 8.75$ cm ² $R_{adj.}^2 = 97.4\%$ me=5.5 cm sde=2.9 cm
Stickley <i>et al.</i> , 2000	SFGPR 10-620 MHz	Australië	zand	onbekend	onbekend
Tronicke <i>et al.</i> , 1999	Ramac 160 MHz	Duitsland, waddenkust	duinzand	0-6 m	$RMSE(?) = \pm 0.3$ m
Truman <i>et al.</i> , 1988	SIR System 8 120 MHz	Georgia, Southern Coastal Plains Region	zand, leem	1-6 m	$R^2 = 0.98$
Van Overmeeren <i>et al.</i> , 1998	200 MHz	Noord-Brabant	zand, veen, leem	0-3 m	onbekend
Young en Sun, 1999	100 MHz	Oklahoma	fijn zand, rivierafzetting en	2-3 m	onbekend

R^2 = determinatiecoëfficiënt

Uit het overzicht in Tabel 1 blijkt dat er weinig kwantitatieve informatie is over de nauwkeurigheid van GPR-metingen van de grondwaterstand; in 8 van de 22 referenties wordt de nauwkeurigheid gekwantificeerd. Een mogelijke reden is dat GPR wordt toegepast in de exploratieve, verkennende onderzoeksfase waarin de interpretatie van de radarbeelden slechts op een kwalitatieve, niet-reproduceerbare wijze plaatsvindt en kwantitatieve informatie nog niet nodig is. De subjectieve, moeilijk reproduceerbare *expert knowledge* wordt vooral gebruikt om te beslissen welke reflectie bij welke discontinuïteit in de bodem behoort. Als deze beslissing eenmaal is genomen, dan levert het GPR-sigitaal in combinatie met zogenaamde CMP-metingen (CMP=*common midpoint*) kwantitatieve informatie op over de diepte van deze discontinuïteit.

Opvallend is de relatief hoge nauwkeurigheid in de resultaten van Shih *et al.* (1986) voor grondwaterstandsmetingen in zandige afzettingen in Florida en voor Birkhead *et al.* (1996) in Botswana. In vergelijking met de andere studies is van een relatief hoge

frequentie (resp. 300 en 500 MHz) gebruik gemaakt, omdat de grondwaterstand zich relatief ondiep beneden het maaiveld bevindt (ca. 2 m). Hoe hoger de frequentie, hoe hoger de resolutie, maar hoe geringer de penetratiediepte. Er is dus een optimale frequentie gegeven de diepte waarbinnen de grondwaterstand fluctueert en de weerstand van het bodemmateriaal. Voor toepassingen in zandgronden in Nederland bieden de resultaten van Shih *et al.* (1986) en Birkhead *et al.* (1996) perspectief, gezien de overeenstemming in diepte waarbinnen de grondwaterstand wordt aangetroffen. Overigens bleken er in de resultaten van Shih *et al.* (1986) kleine discrepanties voor te komen tussen de resultaten in de tekst en in de tabel, terwijl de resultaten van Birkhead *et al.* (1996) onvolledig zijn ten aanzien van de absolute nauwkeurigheid. De relatief geringe nauwkeurigheden in de resultaten van Bentley en Trenholm (2001), Iivari and Doolittle (1994), Tronicke *et al.* (1999) en Johnson (jaartal onbekend) hebben betrekking op relatief diepe grondwaterstanden (3-8 m). Uit het onderzoek van Bentley en Trenholm (2001) blijkt dat een frequentie van 200 MHz iets nauwkeuriger resultaten oplevert dan een frequentie van 100 MHz. De resultaten die door Truman *et al.* (1988) zijn gevonden voor het SIR-8 System met een antenne van 120 MHz zijn op het eerste gezicht veelbelovend ($R^2 = 0.98$). De auteurs geven echter te weinig informatie om de absolute nauwkeurigheid te schatten. Ook is niet duidelijk welke definitie van R^2 is gehanteerd.

Een interessante toepassing van GPR bij de kartering van verdichte lagen met 'schijnspiegels' wordt beschreven door Branson *et al.* (2000). De resultaten GPR worden vergeleken met de resultaten van elektromagnetische metingen (EM31-MK2). De auteurs stuiten op het probleem dat niet altijd duidelijk is of een reflectie wordt veroorzaakt door de grondwaterspiegel, een 'schijnspiegel' of een verdichte laag. Helaas blijft een goede kwantitatieve analyse van de resultaten in dit artikel achterwege, maar de kwalitatieve beschrijving van de resultaten geeft aan dat in gebieden waarin slechts één verklarende factor ruimtelijk varieert zowel EM-methoden als GPR kunnen worden toegepast.

Bachrach en Nur (1998) concluderen dat GPR en ultra-ondiepe seismische reflectietechnieken met succes kunnen worden gecombineerd bij het karteren van de grondwaterstand. Van deze studie is helaas maar een beknopt Abstract gevonden. De indruk is dat de combinatie van deze twee technieken nog in de kinderschoenen staat.

3 Verkenning Internet

Het internet is verkend op toepassingen van GPR waarbij de nauwkeurigheid is gekwantificeerd waarmee de grondwaterstand kan worden gemeten. De zoekopdracht aan Altavista luidde "ground penetrating radar AND water table AND accuracy". Dit leverde op 12 juni 2001 85 referenties op. De zoekopdracht is in november 2001 herhaald en uitgebreid. Ook is de zoekopdracht aangeboden aan de zoekmachine "Google". Dit leverde nog meer referenties op, met name uit elektronische tijdschriften. Het merendeel van de referenties op internet biedt geen kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van de metingen. De elektronische artikelen zijn in het vorige hoofdstuk besproken. In aanhangsel 1 is een gedeelte gegeven van de webplek www.geophysical.com/geoapps.htm, waarin kwantitatieve informatie wordt gegeven over de nauwkeurigheid van grondwaterstandsmetingen met GPR.

Een interessant literatuuroverzicht over GPR wordt gegeven op web.interpuntonet.it/baradello/georadar_bibliography.html. In mei 2000 vond in Queensland (Australië) een internationale GPR-conferentie plaats, waar door Doolittle *et al.* een presentatie werd gehouden over de toepassing van GPR bij de voorspelling van grondwaterstanden. Het abstract is hieronder afgedrukt.

Improved Radar Interpretations of Water Table Depths and Groundwater Flow patterns Using Predictive Equations

J. A. Doolittle, B. J. Jenkinson, D. P. Franzmeier, and W. Lynn.

Recent interest in soils and hydrologic modeling has increased the need for information concerning the depth and movement of groundwater. Hydrologic data are commonly obtained by measuring water levels in observation wells. In areas of coarse-textured sediments, ground-penetrating radar (GPR) can provide a continuous record of the water table, comprehensive coverage of sites, and significantly reduce the number of wells. Ground-penetrating radar was used eight times over a two year period to chart depths to water table and to indicate spatial flow patterns within a 32-ha forested site in northwestern Indiana, USA. The site has contrasting soil with intricate spatial patterns over a dune-interdune topography. Relief is about 10 m. A total of 16 observation wells are installed, most in a dune-interdune transect. Radar imagery was correlated with depth to water table in the wells. The velocity of propagation was both temporally and spatially variable across the site. The velocity of propagation ranged from 0.0508 m/ns to 0.1606 m/ns at the sixteen observation wells. Propagation velocities were generally slower during the spring and early summer months when depths to the water table were relatively shallow. Propagation velocities were faster through dunes than through the more poorly drained interdunes. Because of the spatiotemporal variability in propagation velocities and the known complexity of soil and landform patterns, a predictive equation based on water table depths and two-way travel times was developed for each GPR survey. In this setting, the use of a predictive equation based on multiple GPR measurements over a known reflector substantially improved the accuracy of radar depth interpretations over single or averaged measurements. The use of predictive equations increased confidence in radar-interpreted depth measurements of the water table and the assessment of groundwater flow patterns.

Jim Doolittle is een bekende deskundige op het gebied van ondiepe, veldbodemkundige, toepassingen van GPR. Daarom is hem per e-mail om *reprints* en advies gevraagd.

Onder de internetreferenties bevonden zich enkele beschrijvingen van handzame GPR-instrumenten voor ondiepe toepassingen:

Interragator II, Vermeer Manufacturing Company, Iowa.

Deze heeft het formaat van een elektrische grasmaaimachine (handmodel). Volgens de beschrijving wordt deze gebruikt om grondwaterstanden te meten. Vertegenwoordiger in Nederland:

Vermeer Holland B.V.

P.O. Box 20

2130 AA Hoofddorp

023-5542305

023-5542306

Alexander de Bas, info@vermeer-holland.nl

Uit navraag bij de firma Vermeer bleek dat de kosten van de Interragator II op Hfl 98500,= liggen. Het toestel, dat in Nederland nog niet is verkocht, wordt gepromoot onder aannemers als instrument om kabels en leidingen op te sporen.

Georadar System 12

Electronics Company Italy

Via Pediano 3A

IMOLA ITALY 40026

mediaelettra@mediaelettra.com

stefanomors@libero.it

Dit instrument heeft het formaat van een metaaldetector.

SIR-2000

Dit instrument is van het formaat van een metaaldetector. Er kunnen antennes met een breed bereik van frequenties op worden geplaatst. Het is de opvolger van het SIR-8 System waarmee door Shih *et al.* (1986) de grondwaterstand nauwkeurig is voorspeld. Informatie is beschikbaar op www.geophysical.com/sys1.htm.

Sensors & Software

Op www.sensoft.on.ca wordt informatie gegeven over de pulseEKKO GPR-apparatuur die bij TNO-NITG wordt gebruikt. Met name de pulseEKKO 1000 systemen lijken in aanmerking te komen voor het meten van ondiepe grondwaterstanden.

4 Veldexperiment

Eenzijds vinden Shih *et al.* (1986) en Birkhead *et al.* (1996) nauwkeurige metingen van ondiepe grondwaterstanden in zandgronden. Anderzijds blijkt uit hoofdstuk 2 dat kwantitatieve studies naar de nauwkeurigheid van GPR bij het meten van ondiepe grondwaterstanden zeer schaars zijn. Daarom is een validatie-experiment in een open zandgrond met ondiepe grondwaterspiegels in Nederland aan te bevelen. TNO-NITG heeft in Nederland ervaring met het meten van de grondwaterstand met behulp van GPR. Op 12-6-2001 is er telefonisch overleg geweest met Bart Goes van TNO-NITG. Een veldonderzoek van 3 dagen inclusief rapportage kost ca. Hfl 26000,=. Er kan niet worden aangehaakt bij lopende projecten, waarbij medewerkers van Alterra een aantal boorgatmetingen doen om de nauwkeurigheid van GPR-waarnemingen van de grondwaterstand te kwantificeren. Bart Goes heeft ervaring met de inzet van GPR in stuwwallen. Het gaat hier om grotere dieptes van het grondwater. Tijdens het telefoongesprek kwam het volgende naar voren:

1. GPR werkt alleen goed in gronden met een laag elektrisch geleidingsvermogen: zandige afzettingen. GPR werkt niet in kleigronden en gebieden met zout of brak grondwater;
2. Hoe hoger de frequentie, hoe hoger de resolutie maar hoe geringer de diepte. Voor toepassingen tussen 0-2 m zijn frequenties van 200MHz nodig;
3. Tijd moet middels snelheid worden vertaald in diepte. Er wordt echter gerekend met een *gemiddelde* snelheid voor alle bodemlagen. Hoe gelaagder een profiel, hoe onnauwkeuriger de diepte;
4. De bovenkant van de volcapillaire zone wordt gereflecteerd. Hoe geleidelijker het capillaire profiel verloopt, hoe moeilijker de bovenkant van de volcapillaire zone is waar te nemen. Grof zand geeft om die reden de beste resultaten;
5. Het GPR-toestel wordt achter een wagentje door het veld voortbewogen. Op de Veluwe wordt het ingezet op onverharde wegen. De voorbereidingstijd en nazorg (opbouwen/afbreken) kost zoveel tijd dat het niet efficiënt is om GPR gedurende één dag in te zetten. Meestal wordt er een dag of drie mee gewerkt. Er kan dan ca. 3,5 km per dag worden afgelegd, afhankelijk van de terreinomstandigheden;
6. Over de eerste 50 cm is niets zinnigs te zeggen, tenzij de ondiepe toepassingen (bodemvochtmetingen) worden toegepast;
7. Meestal wordt in de orde van decimeters gemeten;
8. CMP-metingen zijn nodig om de GPR-metingen te ijken.

In vergelijking met de apparatuur die is gevonden op het internet (zie hoofdstuk 3) en de SIR-apparatuur die in diverse publicaties wordt genoemd (zie hoofdstuk 2) lijkt het toestel dat TNO-NITG gebruikt, de pulseEkko 100 (www.sensoft.on.ca), niet erg gebruiksvriendelijk. Het moet immers met een wagentje door het terrein worden getransporteerd. Dit heeft te maken met de relatief lage frequentie (25-100 MHz) die nodig is voor de verkenning op grote dieptes. De spoelen moeten dan verder uit elkaar staan dan bij de apparatuur met hoge frequenties (200-1000 MHz), waarbij de spoelen zich dicht bij elkaar vinden en het apparaat dus compact is. Deze apparatuur kan met de hand worden voortgetrokken of voortgeduwd, zoals een gazonmaaier.

TNO-NITG heeft de beschikking over een dergelijk toestel, de pulseEkko 1000, maar maakt hier slechts weinig gebruik van.

Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de literatuur en de informatie die het internet biedt kan worden geconcludeerd dat met GPR nauwkeurige metingen van de grondwaterstand kunnen worden verkregen in zandige, homogene gronden. De investeringskosten zijn echter hoog en kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van GPR-metingen van de grondwaterstand is slechts beperkt in de literatuur aanwezig. In het buitenland, met name in de Verenigde Staten van Amerika en Canada, wordt GPR toegepast om de diepte van de grondwaterstand te meten. Ook in Nederland wordt GPR voor dit doel gebruikt, door TNO-NITG. De toepassingen blijven doorgaans beperkt tot exploratief, verkennend onderzoek waarbij de radarbeelden kwalitatief worden geïnterpreteerd. Kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van grondwaterstandsmetingen met behulp van GPR zijn hierdoor helaas schaars en blijken nogal uiteen te lopen. Om te kunnen beoordelen of GPR-metingen bruikbaar zijn als hulpinformatie bij de ruimtelijke interpolatie van grondwaterstanden, bijvoorbeeld in interpolatiemethoden zoals *co-kriging* en *external-drift kriging*, is meer kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van deze metingen gewenst.

Uit operationeel oogpunt komt apparatuur in aanmerking die momenteel niet of weinig in Nederland wordt gebruikt, zoals de pulseEkko 1000 waar TNO-NITG de beschikking over heeft. Het is aan te bevelen om bij een toekomstige toepassing van de pulseEkko 1000 een aantal metingen van de grondwaterstand in boorgaten te verrichten, en deze metingen te vergelijken met de interpretaties van de radarbeelden die onafhankelijk van deze metingen hebben plaatsgevonden. Een dergelijk validatie-experiment dient beperkt te blijven tot zandgronden, omdat uit de literatuur blijkt dat tot dit bodemtype de toepassing van GPR bij het meten van grondwaterstanden beperkt blijft. Kleiige en venige lagen beïnvloeden de radarreflectie van de grondwaterspiegel nadelig. Als onder Nederlandse omstandigheden dezelfde nauwkeurigheid kan worden bereikt als in 1986 werd waargenomen in zandgronden in Florida met het SIR-8-systeem en in 1996 in Botswana met het SIR-10-systeem, dan biedt GPR aantrekkelijke hulpinformatie bij de ruimtelijke interpolatie van grondwaterstanden.

Samenvattend luidt de aanbeveling om in Nederland eerst een validatiestudie uit te voeren in homogene zandgronden met grondwaterspiegels binnen 0-2 m, alvorens over te gaan tot aanschaf en grootschalige toepassing van GPR voor de voorspelling van grondwaterstanden.

Literatuur

- Ahmed, S. and De Marsily, G., 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research* **23**: 1717-1737.
- Anderson Jr., W.P., D.G. Evans and S.W. Snyder, 2000. The effects of Holocene barrier-island evolution on water-table elevations, Hatteras Island, North Carolina, USA. *Hydrogeology Journal* **8**: 390-404.
- Bachrach, R. en A. Nur, 1998. Same wavelength GPR and ultra shallow seismic reflection on a river point bar: Sand stratigraphy and water table complexity. *1998 SEG Expanded Abstracts*, Stanford University.
- Bano, M., G. Marquis, B. Nivière, J.C. Maurin en M. Cushing, 2000. Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions patterns. *Journal of Applied Geophysics* **43**: 33-41.
- Bentley, L.R. en N.M. Trenholm, 2001. The accuracy of water table elevation estimates determined from ground penetrating radar data. *Submitted to: Journal of Engineering and Environmental Geophysics*.
- Beres, M. en F.P. Haeni, 1991. Application of groundpenetrating-radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water* **29**: 375-386.
- Beres, M., A. Green, P. Huggenberger en H. Horstmeyer, 1995. Mapping the architecture of glaciofluvial sediments with three-dimensional radar. *Geology* **23**: 1087-1090.
- Birkhead, A.L., G.L. Heritage, H. White en A.W. van Niekerk, 1996. Ground-penetrating radar as a tool for mapping the phreatic surface, bedrock profile, and alluvial stratigraphy in the Sabie River, Kruger National Park. *Journal of soil and water conservation* **51**(3): 234-241.
- Branson, J.L., J.T. Ammons, R.S. Freeland, L.L. Leonard, V.C. Stevens, D.S. Walker en R.E. Yoder, 2000. Application of non-intrusive imaging in mapping perched water on reclaimed lands. *An ASAE Meeting Presentation*, Paper No. 00TN105.
- Demant, D., F. Renardy, K. Vanneste, D. Jongmans, T. Camelbeeck en M. Meghraoui, 2001. The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. *Geophysics* **66**: 78-89.
- De Vos, W., 1999. *Geofysisch en hydrologisch onderzoek nabij pompstation Ellecom*. NUON-Water.

- Doolittle, J.A., B.J. Jenkinson, D.P. Franzmeier en W. Lynn, 2000. Improved radar interpretations of water table depths and groundwater flow patterns with predictive equations. In: *Eight Intl. Conference on Ground Penetrating Radar*. D.A. Noon, G.F. Stickley en D. Longstaff (Eds.), SPIE Vol. 4084, 488-493.
- Freeland, R.S., R.E. Yoder en J.T. Ammons, 1998. Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics* **40**: 19-27.
- Goes, B.J.M., 2001. *Een methode voor het karteren van laterale grondwaterstromingsbarrières en anisotrope zones in gestuwde gebieden*. Delft, TNO-rapport NITG 00-330-A.
- Goes, B.J.M., en A. Oosterhof, 2000. *Hydrogeologisch en geofysisch onderzoek naar verhoogde grondwaterstanden in de stuwwal bij Doorwerth*. Delft, TNO-rapport NITG 00-321-B.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York, Oxford University Press.
- Huisman, J.A., C. Sperl, W. Bouten en J.M. Verstraten, 2001. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology* **245**: 48-58.
- Iivari, T.A. en J.A. Doolittle, 1994. Computer simulations of depths to water table using ground-penetrating radar in topographically diverse terrains. In: K. Kovar and J. Soveri (Eds.) *Groundwater Quality Management. Proceedings of the GQM 93 Conference held at Tallinn, September 1993*. Wallingford, IAHS Publ. no. 220, pp. 11-20.
- Johnson, D.G., jaartal onbekend, *Use of Ground-Penetrating Radar for Watertable Mapping, Brewster and Harwich, Massachusetts*. <http://www.geophysical.com/geoapps.htm>.
- Nguyen, B.-L., J. Bruining, E.C. Slob en V. Hopman, 1998. Delineation of air/water capillary transition zone from GPR data. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, August 1998.
- Shih, S.F., J.A. Doolittle, D.L. Myhre en G.W. Schellentrager, 1986. Using radar for groundwater Investigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **112**: 110-118.
- Stickley, G.F., D.A. Noon, M. Cherniakov en I.D. Longstaff, 2000. Gated stepped-frequency ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* **43**: 259-269.
- Tronicke, J., N. Blindow, R. Groß en M.A. Lange, 1999. Joint application of surface electrical resistivity- and GPR-measurements for groundwater exploration on the island of Spiekeroog-northern Germany. *Journal of Hydrology* **223**: 44-53.
- Truman, C.C., H.F. Perkins, L.E. Asmussen en H.D. Allison, 1988. *Some applications of ground-penetrating radar in the southern coastal plains region of Georgia*. The Georgia

Agricultural Experiment Stations, College of Agriculture, The University of Georgia, Research Bulletin 362.

Van Kuijk, J.M.J., 1987. *Ontwikkeling en verbetering van (geo-)fysische data-acquisitietechnieken voor de verkenning van de ondiepe ondergrond ten behoeve van waterhuishoudkundig en milieutechnisch onderzoek*. Doelsubsidieprogramma L&V, Onderzoeksprogramma 1, Evaluatie rapport fase 1. Delft/Oosterwolde, rapport OS 87-08 DGV-TNO.

Van Overmeeren, R.A., S.V. Sariowan en J.C. Gehrels, 1997. Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites. *Journal of Hydrology* **197**: 316-338.

Van Overmeeren, R.A., H.J. Simmelink en P. Cleveringa, 1998. *Geofysisch bodemonderzoek van het ven 'Grote Meer' op de Brabantse Wal m.b.v. steekboringen. Veld- en laboratoriummetingen*. Delft, TNO-Rapport NITG 98-98-B.

Young, R.A. en J.S. Sun, 1999. Revealing stratigraphy in ground-penetrating radar using domain filtering. *Geophysics* **64**: 435-442.

Aanhangsel 1 Toepassing GPR in Massachusetts

Gedeelte van www.geophysical.com/geoapps.htm

Use of Ground-Penetrating Radar for Watertable Mapping, Brewster and Harwich, Massachusetts

More than 125 miles of continuous ground-penetrating radar profiles of the sand and gravel aquifer on Cape Cod, Massachusetts, were made in the towns of Brewster and Harwich. Penetration of the radar signal ranged from less than 3 feet in areas containing clay near the surface, to more than 95 feet in clay-free sand and gravel. About 60 percent of the radar profiles showed water-table images that were easily identified on the graphic record.

Depths to water were calculated from the radar records using an average signal velocity of 0.45 feet per nanosecond in the unsaturated zone. Comparison of depths to water derived using ground-penetrating radar with the altitude of water levels measured in wells and ponds at 85 sites showed an average difference of about 7 percent (1.8 feet) with standard deviation of 6.4 percent (1.8 feet). Additionally, good agreement was achieved between water-table altitudes calculated using ground-penetrating radar and seismic-refraction methods with altitudes determined at selected observation wells.

Ground-penetrating radar was used in conjunction with water levels measured at ponds and wells to construct a water-table map with 2-foot contours in the 45-square mile area of Brewster and Harwich. The radar proved unsuccessful in determining zones of contribution to pumping wells, but provided sufficient water-table information to delineate a ground-water mound at a septage disposal bed and steep water-table gradients toward a stream near the Harwich landfill.

David G. Johnson

For additional information
District Chief Massachusetts - Rhode Island District
U.S. Geological Survey
Water Resources Division
28 Lord Rd., Suite 280
Marlborough, MA 01752

Copies of this report can be purchased from:
Books and Open-File Reports Section
U.S. Geological Survey
Federal Center
Box 25425, Building 810
Denver, CO 80225

Copied from: <http://www.geophysical.com/geoapps.htm>

