

NOBIS 95-2-02
ONDERZOEKSCUSTER GRONDRADAR
(BEHORENDE BIJ HET ONDERZOEKSPROJECT
'VERBETERING VAN DE POSITIE VAN DE IN
SITU BIODEGRADATIEVARIANT DOOR TOE-
VOEGING VAN IMBIBITIE EN DRAINAGE AAN
BESTAANDE THEORIE')

Fase 1: Eindrapportage deelresultaten 1 en 2

ir. K.R. Weytingh (Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)
drs. T.A. Kaligis (Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)
drs. M.C. van der Rijst (Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)
drs R.A. van Overmeeren (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO)
dr. J.A.C. Meekes (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO)
drs. H. Opdam (T&A Radar)
drs. M.P.A. van den Blik (T&A Radar)

september 1998

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CUR/NOBIS.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Onderzoekscluster grondradar (behorende bij het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie') - Fase 1: Eindrapportage deelresultaten 1 en 2", september 1998, CUR/NOBIS, Gouda."

Aansprakelijkheid

CUR/NOBIS en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en CUR/NOBIS sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CUR/NOBIS en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Copyrights

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of CUR/NOBIS.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"GPR research cluster (part of the research project 'Improvement of the position of the in situ bioremediation alternative by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory') - Phase 1: Final report subresult 1 and 2", September 1998, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

Liability

CUR/NOBIS and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and CUR/NOBIS hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of CUR/NOBIS and/or the contributors.

Titel rapport

Onderzoekscluster grondradar
(behorende bij het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie')
Fase 1: Eindrapportage deelresultaten 1 en 2

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-02

Project rapportnummer

95-2-02 fase 1

Auteur(s)

ir. K.R. Weytingh
drs. T.A. Kaligis
drs. M.C. van der Rijst
drs. R.A. van Overmeeren
dr. J.A.C. Meekes
drs. H. Opdam
drs. M.P.A. van den Blik

Aantal bladzijden

Rapport: 50

Bijlagen: 132

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (ir. K.R. Weytingh, 0570-663907)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (dr. J.A.C. Meekes, 015-2697192)
Shell Research and Technology Centre Thornton (dr. V.T.N. Nguyen, 00-44.1513735535)
Shell Nederland Verkoopmaatschappij RNCSN (ing. A. Baan, 010-4696514)
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (ing. A.G. Veltkamp, 0592-364565)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

In de onderzoekscluster Grondradar zijn de mogelijkheden geverifieerd die grondradar kan bieden voor onderzoeks- en monitoringsaspecten binnen de bodemsanering. De belangrijkste onderzoekspunten zijn het nagaan of het mogelijk is om de verdeling van lucht in de bodem tijdens persluchtinjectie te monitoren en om voor verontreinigingen met olieproducten de situatie (retentie/retardatiezones) in kaart te brengen. Zowel literatuuronderzoek, evaluatie van radaronderzoeken als veldproeven tonen aan dat grondradar goede mogelijkheden biedt, maar een eenduidig aantoonbare relatie tussen de waargenomen anomalieën in radardata en de verschillende te onderscheiden zones met verontreinigingen of geïnjecteerde lucht kon niet worden gelegd. Voor de monitoring van geïnjecteerde perslucht is met een computermodellering wel aangetoond dat, in ieder geval onder ideale omstandigheden, de verdeling van lucht in de bodem met grondradar kan worden aangetoond. Voor beide toepassingsmogelijkheden is verder onderzoek nodig om de waarde van grondradar in de praktijk ook werkelijk aan te tonen.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodem, bodemonderzoek, milieu
persluchtinjectie, radar

Vrije trefwoorden:

bodemverontreiniging, grondradar,
LNAPL's/DNAPL's, modellering,
monitoring, retentie/retardatie, veld-
proeven

Titel project

Onderzoekscluster grondradar

Projectleiding

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.
(ir. K.R. Weytingh, 0570-663907)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:
CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

GPR research cluster
(part of the research project 'Improvement of the position of the in situ bioremediation alternative by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory')
Phase 1: Final report subresult 1 and 2

CUR/NOBIS report number

95-2-02

Project report number

95-2-02 phase 1

Author(s)

ir. K.R. Weytingh
drs. T.A. Kaligis
drs. M.C. van der Rijst
drs. R.A. van Overmeeren
dr. J.A.C. Meekes
drs. H. Opdam
drs. M.P.A. van den Blik

Number of pages

Report: 50

Appendices: 132

Executive organisation(s) (Consortium)

'Oranjewoud' Consultants B.V. (ir. K.R. Weytingh, 0570-663907)
Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO - National Geological Survey (dr. J.A.C. Meekes, 015-2697192)
Shell Research and Technology Centre Thornton (dr. V.T.N. Nguyen, 00-44.1513735535)
Shell Nederlandse Verkoopmaatschappij RNCSN (ing. A. Baan, 010-4696514)
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (ing. A.G. Veltkamp, 0592-364565)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

In the GPR research cluster it is studied which opportunities GPR may offer for research and monitoring aspects relating to soil remediation. The research mainly focuses on checking whether it is possible to monitor the distribution of air in soil during air sparging and to map a situation (retention/retardation zones) in the case of hydrocarbon contaminations. Literature studies, evaluations of radar surveys, as well as field tests, show that GPR offers good opportunities, but an unambiguously association between the observed anomalies in radar data and the different zones with contaminations or sparged air could not be demonstrated. As for monitoring of sparged air, a computer modelling has demonstrated, though, that - at least under ideal conditions - the distribution of air in soil can be shown using GPR. However, both applications need further research to really assess the value of GPR in the field.

Keywords**Controlled terms:**

air sparging, environment, radar,
site assessment, soil

Uncontrolled terms:

field tests, ground penetrating radar
(GPR), LNAPLs/DNAPLs, monitoring, modelling, retention/retardation, soil pollution

Project title

GPR research cluster

Projectmanagement

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.
(ir. K.R. Weytingh, 0570-669307)

This report can be obtained by: CUR/NOBIS, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Dutch Research Programme In-Situ Bioremediation (NOBIS)

VOORWOORD

Dit rapport beschrijft de resultaten van de eerste fase van de 'Onderzoekscluster Grondradar'. Deze onderzoekscluster is een toegevoegd onderdeel van het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie' (afgekort I & D). Het project is uitgevoerd onder subsidiëring van de stichting Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering (NOBIS).

Voor de uitvoering van het onderzoek is een consortium gevormd bestaande uit Ingenieursbureau Oranjewoud B.V., Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, T&A Radar, Shell Research and Technology Centre Thornton (UK), Shell Nederlandse Verkoopmaatschappij RNCSN en de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. De benodigde theoretische kennis van grondradar, verontreinigingen, bodemonderzoek en persluchtinjectie is door NITG-TNO, Shell Research en Oranjewoud ingebracht. T&A radar heeft als hierin gespecialiseerd bedrijf de radarmetingen uitgevoerd. Shell RNCSN en NAM zijn als probleembezitter en eindgebruikers in het consortium vertegenwoordigd en hebben een klankbordfunctie.

In dit rapport zijn de deelresultaten 1 en 2 uit het basisprojectplan ('Onderzoekscluster grondradar, aanvullend basisprojectplan', 22 november 1996) opgenomen. Deze deelresultaten bestaan uit het literatuuronderzoek, de veldproeven, berekeningen, modellering en de conclusies. Deelresultaat 3, veldproeven op ideale locaties, is nog niet uitgevoerd. Voorafgaand aan de uitvoering van deelresultaat 3 zal een positieve go-beslissing moeten worden genomen.

september 1998

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	viii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Aanleiding voor het onderzoek	1
	1.2	Doel en product van het onderzoek	1
	1.3	Samenwerkingsverband	2
	1.4	Indeling van het rapport	3
Hoofdstuk	2	ACHTERGRONDINFORMATIE GRONDRADAR	5
	2.1	Basisprincipes grondradar	5
	2.2	Overzicht beschikbare radarsystemen	9
	2.3	Reproduceerbaarheid grondradarmetingen	10
	2.3.1	Invloed van het vochtgehalte van de grond	10
	2.3.2	Invloed onderlinge verschillen beschikbare apparatuur	11
	2.3.3	Conclusies reproduceerbaarheid grondradarmetingen	12
Hoofdstuk	3	ONDERZOEKSPUNT PERSLUCHTINJECTIE	13
	3.1	Aanleiding en doel van het onderzoek	13
	3.2	Literatuuronderzoek	14
	3.3	Veldproef in Brummen	14
	3.3.1	Inleiding onderzoek Brummen	14
	3.3.2	Resultaten en conclusies onderzoek Brummen	15
	3.4	Modellering grondradar voor persluchtmonitoring	16
	3.4.1	Inleiding modellering	16
	3.4.2	Resultaten en conclusies modellering	16
	3.5	Conclusies onderzoekspunt perslucht	16
Hoofdstuk	4	ONDERZOEKSPUNT VERONTREINIGINGEN (RETENTIE/ RETARDATIE)	19
	4.1	Inleiding	19
	4.2	Theorie imbibitie en drainage bij bodemverontreinigingen	20
	4.3	Literatuurstudie grondradar en verontreinigingen	22
	4.3.1	Inleiding literatuurstudie	22
	4.3.2	Vaste stoffen/ionen	23
	4.3.3	LNAPL's	23
	4.3.4	DNAPL's	26
	4.3.5	Recent onderzoek/lopend onderzoek	28
	4.3.6	Conclusies literatuuronderzoek verontreinigingen	29
	4.4	Evaluatie grondradaronderzoeken voor de opsporing van brandstofverontreinigingen	29
	4.4.1	Inleiding	29
	4.4.2	Achtergrondinformatie	30
	4.4.3	Methodiek en werkwijze	31
	4.4.4	Resultaten	33
	4.4.5	Conclusies evaluatie grondradaronderzoeken voor de opsporing van brandstofverontreinigingen	35

	4.5	Veldmetingen 'Terschelling': grondradar en bodemverontreinigingen	35
	4.5.1	Inleiding	35
	4.5.2	Resultaten en conclusies veldmetingen Terschelling	36
	4.6	Conclusies onderzoekspunt retentie/retardatie	36
		VERKLARENDE WOORDENLIJST GRONDRADAR	39
		LITERATUUR	43
Bijlage	A	TECHNISCHE SPECIFICATIES VAN VEELGEBRUIKTE GRONDRADARELEMENTEN EN BOORGATRADARSYSTEMEN	
Bijlage	B	RAPPORT: 'BODEMRADARONDERZOEK TER MONITORING VAN EEN IN-SITU PERSLUCHTINJECTIESYSTEEM' (T&A RADAR, PROJECTNUMMER 0696-GPR324\BRO, JULI 1996)	
Bijlage	C	RAPPORT: 'GRONDRADARMODELLERING VOOR PERSLUCHT-MONITORING' (NITG-TNO, TNO-RAPPORT NITG 97-257-B, NOVEMBER 1997)	
Bijlage	D	GEGEVENSBLADEN EVALUATIE GRONDRADARONDERZOEKEN	
Bijlage	E	RAPPORT: 'RETENTIE/RETARDATIE: BODEMRADARONDERZOEK AAN DE HEERENWEG TE TERSCHELLING' (T&A RADAR, PROJECTNUMMER T&A-NOBIS GPR2, MEI 1997)	
Bijlage	F	RAPPORT: 'FREQUENTIE-SPECTRA VAN GEORADARMETINGEN UITGEVOERD OP EEN VERONTREINIGDE LOCATIE OP TERSCHELLING' (NITG-TNO, TNO-RAPPORT NITG 97-63 (B), MAART 1997)	

SAMENVATTING

Onderzoekscluster grondradar (behorende bij het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie')

De onderzoekscluster grondradar is uitgevoerd in het kader van het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie', hierna afgekort tot I & D. Dit project is onderverdeeld in drie clusters: 'olie', 'zoning' en 'perslucht', en met name voor de laatste twee onderdelen bestaat een duidelijke behoefte aan methodieken voor het in kaart brengen van zones waar zich LNAPL's, respectievelijk geïnjecteerde perslucht in de bodem bevinden. De vraag is ontstaan of grondradar hieraan kan bijdragen.

De achterliggende gedachte hierbij is dat grondradar onderscheid kan maken tussen gebieden met verschillende eigenschappen. Omdat in de retentiezonaire residuaire olie aanwezig is, leeft de verwachting dat grondradar deze zone kan onderscheiden van de retardatiezone. Eenzelfde gedachtegang is tevens van toepassing voor het in kaart brengen van zones waar lucht in de bodem aanwezig is als gevolg van persluchtinjectie.

De conclusie dat over bovengenoemde toepassingen van grondradar geen eenduidigheid bestaat en de mogelijke voordelen die grondradar kan opleveren ten opzichte van conventionele technieken (snelle metingen zonder direct bodemcontact die vrijwel continue diepteprofielen of vlakdekkende diepte-informatie leveren) was aanleiding voor het opstarten van onderhavige onderzoekscluster grondradar.

Doelstelling

Deze onderzoekscluster grondradar heeft als doelstelling de mogelijkheden te verifiëren die radar kan bieden voor onderzoeks- en monitoringsaspecten binnen de bodemsanering.

Hiervoor zijn de volgende punten onderzocht:

- de reproduceerbaarheid van radarmetingen;
- de mogelijkheid om de verdeling van lucht in de bodem tijdens persluchtinjectie te monitoren;
- nagaan of het mogelijk is om voor verontreinigingen met olieproducten de situatie (retentie/retardatiezones) in kaart te brengen.

Het onderzoek naar de reproduceerbaarheid van radarmetingen is door middel van een literatuurstudie uitgevoerd. Voor de onderzoekspunten persluchtinjectie en retentie/retardatie zijn na het literatuuronderzoek veldmetingen en computermodelleringen en/of berekeningen verricht.

Resultaten

Reproduceerbaarheid

Grondradar is gevoelig voor verschillen in vochtgehalte van de onverzadigde zone. Uit de literatuur blijkt dat in de praktijk metingen in een droge ondergrond een betere datakwaliteit opleveren voor de potentiële detectie van verontreinigingen dan dezelfde metingen uitgevoerd op een locatie na een periode van regenval.

Ook bevroren grond is, door de verminderde demping van het radarsignaal, bevorderlijk voor de datakwaliteit. Indien de projectplanning dit toelaat, kan hiermee rekening worden gehouden bij de planning van het veldwerk.

Verder kan worden gesteld dat de deskundigheid waarmee een grondradarapparaat wordt gebruikt, de keuze van de antennefrequentie en de interpretatievaardigheden van de onderzoeker een vele malen groter effect hebben op de kwaliteit van het onderzoeksresultaat dan de keuze voor een bepaald merk apparatuur.

Monitoring van persluchtinjectie

Uit de inventarisatie van de literatuur blijkt dat radar niet eerder is toegepast voor monitoring van persluchtinjectie. Wel zijn enkele geslaagde toepassingen met tomografische radarmetingen vanuit boorgaten bekend. Omdat de voor boogtradmelingen benodigde diepe boorgaten vaak bij saneringen ontbreken, en omdat de optimale positie van een persluchtinjectielans niet noodzakelijkerwijs tussen twee boorgaten in ligt, zullen routinematige toepassingen van boogtradar bij in situ saneringen beperkt zijn.

Vervolgens is een veldproef uitgevoerd op een voormalig bedrijfsterrein in Brummen. Hierbij zijn radarmetingen voor, tijdens en na een persluchtinjectie uitgevoerd. Als gevolg van verschillende storende objecten is de kwaliteit van de radardata sterk nadelig beïnvloed. Aangezien daarnaast de klei- en leemhoudende bovengrond een sterke uitdemping van het radarsignaal met toenemende diepte veroorzaakt, kon met deze proef geen aantoonbare relatie worden gelegd tussen de aanwezigheid van perslucht en een verandering in het radarsignaal.

Gezien het grote diëlektrische contrast tussen lucht en water is het in theorie wel mogelijk om de lucht te kunnen waarnemen met grondradar. Een computermodellering toont aan dat, in ieder geval onder ideale omstandigheden, perslucht kan worden aangetoond met grondradar. Er ontstaan relevante veranderingen van de reflectiecoëfficiënten, die resulteren in verschillende radargrammen voor verschillende uitbreidingen en verzadigingen van de perslucht.

Verder onderzoek is echter nodig om de toepassingsmogelijkheden in de praktijk ook werkelijk aan te tonen.

Kartering van retentie/retardatiezones

Het literatuuronderzoek naar toepassingen van grondradar voor het in kaart brengen van verontreinigingssituaties (retentie/retardatiezones) geeft aan dat in de bodem en grondwater aanwezige LNAPL's een meetbare indicatie opleveren. Dit is echter niet altijd het geval en daar waar indicaties zijn gemeten betreft het meestal retentiezones. Door de complexe manier waarop verontreinigingen aan de bodem gebonden zijn en door de heterogeniteit van de bodem zelf zijn deze indicaties in het radarsignaal doorgaans zeer klein en worden deze niet altijd op dezelfde manier waargenomen.

Uit een vergelijking van diverse bodemonderzoeken (op met oliecomponenten verontreinigde locaties) met interpretaties van met conventioneel bodemonderzoek geijkte grondradaronderzoeken blijkt dat deze onderzoeken geschikt zijn om plaatsen aan te geven waar zich sterke verontreinigingen (waarschijnlijk retentiezones) bevinden. De horizontale en verticale omvang van de verontreinigingen worden, weliswaar indicatief, door de radaronderzoeken weergegeven. Voor de bepaling van de mate van verontreiniging en de verificatie van de radarinterpretatie moet nog conventioneel onderzoek worden uitgevoerd. Daarnaast is het vooralsnog raadzaam om ook andere uit historisch onderzoek verdachte plaatsen conventioneel te onderzoeken

Specifiek voor dit project uitgevoerde veldmetingen op Terschelling en de op deze data uitgevoerde frequentie-analyse leverden geen eenduidige resultaten die het hierboven gestelde kunnen bevestigen of ontkennen.

SUMMARY

GPR research cluster

(part of the research project 'Improvement of the position of the in situ bioremediation alternative by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory')

The GPR research cluster has been carried out within the framework of the research project 'Improvement of the position of in situ bioremediation alternative by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory', abbreviated below to 'I & D'. This project is subdivided into three clusters, i.e. 'oil', 'zoning' and 'air sparging'. As for the two latter elements, in particular, there is a distinct need for techniques for mapping zones where the soil contains LNAPLs or sparged air. The question has arisen as to whether Ground Penetrating Radar (GPR) can contribute to filling this need.

The concept underlying this is that GPR can distinguish between areas with different features. As the retention zone contains residuary oil, it is expected that GPR can distinguish this zone from the retardation zone. The same concept applies for the mapping of zones where the soil contains air as a result of air sparging.

Both the conclusion that there is still discussion about the application mentioned above, and the possible benefits offered by GPR in relation to conventional techniques (quick measurements, non-invasive, providing nearly continuous depth profiles or surface-covering depth information), gave rise to starting up the present GPR research cluster.

Goal

The goal of this research cluster is to study the opportunities that radar may offer for research and monitoring aspects relating to soil remediation.

To achieve this goal, the following items have been studied:

- the reproducibility of radar measurements;
- the possibility of monitoring the distribution of air in the soil during air sparging;
- checking whether it is possible to map a situation (retention/retardation zones) in the case of oil-product contaminations.

The investigation into the reproducibility of radar measurements was conducted using a literature study. For the research topics of air sparging and retention/retardation, the literature study was followed by field measurements and computer modellings and/or calculations.

Results

Reproducibility

GPR is sensitive to differences in water content of the unsaturated zone. Literature shows that, in practice, measurements made in dry subsoil produce a higher data quality for the potential detection of contaminants than the same measurements made at a site following a period of rainfall.

Frozen soil is also conducive to the data quality thanks to the reduced attenuation of the radar signal. If possible, this aspect may be taken into account when scheduling the fieldwork.

Furthermore, it should be stated that the expertise with which a GPR unit is used, the choice of antenna frequency, and the interpretative skills of the researcher, have an effect on the quality of the research results that is many times larger than the choice of a certain make of equipment.

Monitoring of sparged air

The literature studied shows that radar has not been used before for monitoring sparged air. What is known are some successful applications using tomographic radar measurements taken from boreholes. Because deep boreholes needed for borehole radar measurements are usually not available at remediation sites, and because the optimal position of an air-sparging lance is not necessarily located in-between boreholes, routine applications of borehole radar at in situ remediations will be limited.

Next, a field test was carried out at a former industrial site in Brummen. This involved the performance of radar measurements before, during and after air sparging. Due to various disturbing objects, the quality of the radar data has been strongly affected. As, moreover, the clayey and loamy topsoil strongly attenuates the radar signal, this test could not unambiguously demonstrate a association between the occurrence of sparged air and a change in radar signal.

Considering the sharp dielectric contrast between air and water, it must be possible, in theory, to observe the air with GPR. A computer modelling demonstrates that, at least under ideal conditions, sparged air can be shown by GPR. Relevant changes in the reflection coefficient arise, resulting in different radargrams for different expansions and concentrations of the sparged air. However, further research is required, to really demonstrate the applicability of the different techniques in the field.

Mapping of retention/retardation zones

The literature studied for GPR applications to map contaminant situations (retention/retardation zones) shows that LNAPLs in soil and groundwater constitute a measurable indication. This is not always the case, however, and where indications have been measured, it usually concerns retention zones. Due to the complex way in which contaminants are bound to the soil, and due to the heterogeneity of the soil itself, such indications in the radar signal tend to be very small, nor are they always observed in the same way.

A comparison between various traditional site assessments, based on discrete sampling and chemical analysis, and radar surveys shows that GPR is suitable for locating strongly hydrocarbon contaminated spots (probably retention zones). The horizontal and vertical extend of the contaminations are however represented only indicative by the radar surveys. For the determination of the degree of the contamination and for the verification of the radar interpretation, conventional site assessments will yet have to be conducted. For the time being, it is also advisable to use traditional techniques when assessing other sites that are suspect based on historical investigations.

Neither field measurements specifically performed for this project on the island of Terschelling, nor the frequency analysis made into these data, have yielded any unmistakable results that can confirm or deny what is stated above.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

In het kader van het onderzoeksproject 'Verbetering van de positie van de in situ biodegradatie-variant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie', hierna afgekort tot I & D, is de vraag ontstaan aan welke karakterisatie-aspecten grondradar kan bijdragen. Het I & D-project bestaat uit drie clusters: zonering, olie en perslucht. Met name bij de onderzoeksclusters perslucht en zonering is behoefte aan methodieken voor het in kaart brengen van zones in de bodem waar zich geïnjecteerde lucht, respectievelijk LNAPL's bevinden.

In het onderzoekscluster zonering wordt aandacht besteed aan het in kaart brengen van retentie- en retardatiezones. Hierbij rees de vraag of een onderscheid tussen deze zones met grondradar in kaart kan worden gebracht.

De achterliggende gedachte hierbij is dat grondradar onderscheid kan maken tussen gebieden met verschillende eigenschappen. Omdat in de retentiezone residuaire olie aanwezig is, leeft de verwachting dat grondradar deze zone kan onderscheiden van de retardatiezone.

Eenzelfde gedachtegang is tevens van toepassing voor het in kaart brengen van zones waar lucht in de bodem aanwezig is als gevolg van persluchtinjectie.

De behoefte aan technieken voor het in kaart brengen van geïnjecteerde lucht is groot.

Na een globale inventarisatie van de bovengenoemde toepassingen van grondradar bleek dat er geen eenduidigheid bestaat over de toepasbaarheid van grondradar bij het in kaart brengen van de verontreinigingssituatie en de aanwezigheid van lucht in de verzadigde zone (uitgaande van het concept van I & D), terwijl de techniek belangrijke voordelen zou kunnen bieden ten opzichte van conventionele onderzoeksmethoden. Bij deze voordelen moet worden gedacht aan de snelheid van de metingen, de vrijwel continue diepteprofielen, de driedimensionale informatie als meerdere parallelle profielen worden gemeten en de volledig geautomatiseerde data-aquisitie en verwerking.

Dit was de aanleiding voor het opstarten van het onderhavige onderzoek.

Ten behoeve van dit onderzoek is een samenwerkingsverband opgezet. Het samenwerkingsverband bestaat uit twee kennisinstituten met verschillende invalshoeken (NITG-TNO, Shell Research and Technology (GB)), een grondradarbedrijf (T&A Radar), eindgebruikers (Shell-RNCSN, NAM) en een adviesbureau ('Oranjewoud').

1.2 Doel en product van het onderzoek

Doel

Het onderzoek heeft tot doel de mogelijkheden te verifiëren die grondradar kan bieden voor monitoringsaspecten binnen het onderzoeksprogramma van I & D, zoals het in kaart brengen van een verontreinigingssituatie (retentie/retardatiezones) en de verdeling van lucht in de bodem tijdens een persluchtinjectie.

NB.: Met grondradarmetingen worden in deze rapportage metingen langs het aardoppervlak bedoeld: toepassingen met betrekking tot metingen vanuit en/of tussen boorgaten (boorgatradar) zijn beperkt bruikbaar voor saneringsdoeleinden. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat alleen tussen (voor saneringsmaatstaven diepe) boorgaten kan worden gemeten, zodat met boorgat-

radarmetingen alleen een beperkte bedekking van het onderzoeksterrein kan worden gerealiseerd. Ook het aanbrengen van nieuwe diepe boorgaten is in veel gevallen geen optie, omdat dit een risico inhoudt voor het ontstaan van nieuwe verspreidingspaden voor de verontreinigingen. Voor de volledigheid zijn in de literatuur gevonden boorgatradartoepassingen wel beschreven.

Product

In deze rapportage wordt aan de hand van een evaluatie van beschikbare literatuur, veldmetingen, een vergelijking van uitgevoerd radaronderzoek met bodemonderzoek (16 locaties) en modelberekeningen nagegaan wat de mogelijkheden en onmogelijkheden voor grondradar zijn bij het in kaart brengen van een verontreinigingssituatie (specifiek: de retentie- en retardatiezones) en de aanwezigheid van (pers)lucht in de bodem.

1.3 Samenwerkingsverband

Om het onderzoek zo effectief mogelijk te kunnen uitvoeren, en het draagvlak voor de resultaten te verbreden, is door 'Oranjewoud' contact gezocht met een vijftal partijen die ieder een eigen specifieke inbreng in het project hebben. De keuze van de participanten is niet toevallig. Om tot een evenwichtig product te komen, is inbreng nodig op diverse vlakken.

Het samenwerkingsverband bestaat uit twee kennisinstellingen met verschillende invalshoeken (NITG-TNO, Shell Research and Technology (GB)), een grondradarbedrijf (T&A), eindgebruikers (Shell RNCSN, NAM) en een adviesbureau ('Oranjewoud').

De motivatie voor de samenstelling van het samenwerkingsverband is hierna weergegeven.

Praktijk

Binnen het onderzoek is behoefte aan data waarbij grondradar ten behoeve van monitoringstechnieken reeds is toegepast. Gedacht wordt hierbij aan eindgebruikers die grondradaronderzoek hebben laten verrichten ten behoeve van het in kaart brengen van bijvoorbeeld verontreinigingssituaties. Daarnaast wordt gedacht aan een adviesbureau dat ruime ervaring heeft opgedaan met het in kaart brengen van verontreinigingssituaties. Tevens is er behoefte aan eindgebruikers die een klankbordfunctie verrichten.

Shell Nederland Verkoopmaatschappij B.V., afdeling RNCSN, is de enige eindgebruiker in Nederland die over een ruime hoeveelheid grondradardata beschikt. Shell RNCSN vervult binnen het consortium een klankbordfunctie.

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. is als adviserend orgaan veelvuldig bij grondradaronderzoek op verontreinigde locaties betrokken geweest.

De Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. heeft op een beperkt aantal locaties radaronderzoek laten uitvoeren. De NAM participeert met praktijkkennis en vervult een klankbordfunctie.

Theorie

Voor de benodigde theoretische onderbouwing is binnen het project behoefte aan erkende grondradarexperts. Dit is met name van belang voor een betrouwbaar eindproduct. Omdat binnen de grondradar geen eenduidigheid bestaat over de eerder genoemde toepassingen is het van wezenlijk belang dat de diverse stromingen zijn vertegenwoordigd in het project. Tevens is kennis over het gedrag van verontreinigingen, bodemonderzoek en het gedrag van perslucht in de verzadigde zone noodzakelijk.

Door de betrokkenheid van het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen - TNO, Shell Research and Technology Centre Thornton en Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. wordt voldaan aan de genoemde criteria.

Uitvoering van het grondradaronderzoek

Voor het uitvoeren van veldexperimenten is het nodig een participant aan het project toe te voegen die ervaring heeft met het uitvoeren van grondradaronderzoek en die beschikt over de benodigde kennis en apparatuur. Waarbij opgemerkt moet worden dat het belangrijk is dat de participant niet primair afhankelijk is van een eventueel positief resultaat aangaande het gebruik van grondradar in de bodemsanering.

T&A RADAR uit Amsterdam voldoet aan bovengenoemde voorwaarden.

1.4 Indeling van het rapport

In hoofdstuk 2 wordt beknopt ingegaan op de basisprincipes van grondradar en worden enkele voorbeelden behandeld van routinematige toepassingen.

Ook wordt een overzicht van de meest gebruikte grondradarapparatuur gegeven en wordt ingegaan op de reproduceerbaarheid van grondradarmetingen.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op het onderzoek naar de mogelijkheid om de aanwezigheid van (pers)lucht in de verzadigde zone met behulp van grondradar te detecteren.

Het onderzoek naar de mogelijkheden die grondradar biedt voor het in kaart brengen van verontreinigingen, zowel algemeen, als specifiek de retentie- en retardatiezone wordt in hoofdstuk 4 behandeld.

Tot slot wordt een beknopte woordenlijst gegeven, waarin een aantal uit de geofysica afkomstige vaktermen worden verklaard.

ACHTERGRONDINFORMATIE GRONDRADAR

2.1 Basisprincipes grondradar

Een radarsignaal is een elektromagnetische golf en is vergelijkbaar met bijvoorbeeld zichtbaar licht en radiostraling. Het woord RADAR is een afkorting voor: RADio Detection And Ranging.

Het voor grondradar gebruikte frequentiebereik bedraagt circa 25 MHz tot 500 MHz. Voor toepassingen als het bepalen van asfaltdikten en het bestuderen van wapeningsstaal worden hogere frequenties gebruikt (tot 1.200 MHz).

Aangezien de indringdiepte van het signaal bij toenemende frequentie sterk afneemt (slechts enkele cm bij 1.200 MHz), zijn deze hoge frequenties niet voor saneringstoepassingen geschikt.

In vacuüm verplaatst een radarsignaal zich met de lichtsnelheid. Op het moment dat het radarsignaal door de grond loopt, treden er een aantal veranderingen in het signaal op die door de eigenschappen van de grond worden bepaald; de radargolf krijgt een andere snelheid en dempt sneller uit dan in het vacuüm.

De demping van het signaal hangt samen met de elektrische geleidbaarheid van het medium, waarin de golf zich voortplant. Een radarpuls dempt exponentieel uit met de diepte z . Voor de sterkte A als functie van de diepte geldt bij een beginsterkte van A_0 :

$$A(z) = A_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (1)$$

De demping wordt bepaald door de constante α , die in matig tot slecht geleidende media (zoals verzadigde en onverzadigde grond) frequentie onafhankelijk is. α kan worden uitgedrukt als:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2)$$

waarin:

- σ is de elektrische conductiviteit;
- μ is de magnetische permeabiliteit;
- ε is de diëlektrische constante.

Door het dempingseffect zal het bij de ontvanger geregistreerde signaal vanaf een bepaalde diepte niet meer kunnen worden onderscheiden van ruis. Dit is de 'penetration depth'. Verder versterken heeft geen nut, omdat ook de ruis mee wordt versterkt.

De grond is niet homogeen van samenstelling. Dit betekent dat de radargolven overgangen tussen media met verschillende eigenschappen passeren. Net als bij licht wordt een gedeelte van het radarsignaal doorgelaten en een ander deel gereflecteerd.

Het gereflecteerde deel van het signaal hangt af van de verhouding van de diëlektrische constanten van de media.

Bij een overgang van medium 1 naar medium 2 geldt hiervoor:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

Zoals blijkt uit formule (3) hangt de sterkte van de reflectie af van het verschil in diëlektrische constante. Hoe groter het verschil, hoe sterker de reflectie. Ook moet er sprake zijn van een scherpe overgang. Een geleidelijke overgang tussen media met een verschillende ϵ zal geen reflectie veroorzaken.

Voor de afstand waarbinnen een overgang moet plaatsvinden om gedetecteerd te kunnen worden, is $\frac{1}{4}$ van de golflengte λ een goede schatting. Bij een bepaalde frequentie f (MHz) bedraagt deze afstand (in m) volgens Daniels [1986]:

$$\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \frac{75}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Hieruit blijkt dat de resolutie toeneemt bij toenemende frequentie.

Verzwakking van het radarsignaal

Doordat het radarsignaal zich in de gehele ondergrond uitbreidt (halfruimte), is er altijd sprake van een geometrische verzwakking (zoals ook bij geluid). Deze verzwakking is evenredig met r^2 (r de afstand van de bron). Bij constante voortplantingssnelheid is de verzwakking dus evenredig met tijd². Door het voorspelbare karakter van deze verzwakking kan een eenvoudige correctie worden toegepast (versterking kwadratisch met tijd). Het nadeel van het versterken van een verzwakt signaal is dat behalve het gewenste signaal ook de stoorsignalen (ruis enz.) worden versterkt. Dit betekent dat de signaal-ruisverhouding met toenemende meetdiepte slechter wordt.

Behalve deze systematische verzwakking wordt bij voortplanting door een medium ook energie van het radarsignaal omgezet in warmte. De mate van deze omzetting hangt af van de elektrische geleiding van het medium. Hoe groter de geleidbaarheid van het medium, hoe meer energie per m¹ wordt omgezet. Een gevolg hiervan is dat radar bij bevroren grond een vergroot dieptebereik kent: de geleiding van grond neemt immers sterk af bij bevroering. Om deze reden wordt grondradar vaak ingezet bij bijvoorbeeld gletsjeronderzoek, waarbij diepten worden bereikt die enkele factoren groter zijn dan bij vergelijkbare surveys in niet-bevroren grond.

Radarmetprocedure

Bij een radarsurvey wordt meestal gemeten met een tweetal antennes; een zendantenne en een ontvangstantenne. Meestal zijn de zender en de ontvanger onderling verbonden (gemonteerd op een karretje, sleetje, of op ski's; de onderlinge afstand is meestal in de orde van grootte van decimeters). Bij een meting wordt een radarpuls gedurende enkele nanoseconden (ns) uitgezonden, waarna de ontvanger de op de overgangen in de grond gereflecteerde signalen registreert. Een typische opnametijd voor de ontvanger is bijvoorbeeld 50 - 100 ns.

Door de zender-ontvangercombinatie te verplaatsen kan een profiel worden gemeten.

Bij langzaam lopen (2 - 5 km/uur) is het vaak mogelijk om bijvoorbeeld iedere 10 cm een meting uit te voeren. Het uitvoeren van de metingen is dus snel te realiseren. Ook worden de meetantennes vaak aan een auto/snowmobile en dergelijke bevestigd.

De metingen worden bij de meeste systemen opgeslagen op een laptopcomputer, waarbij de operator het opbouwen van het gemeten reflectieprofiel, het radargram, in 'real-time' kan volgen. Hierdoor komen noodzakelijke veranderingen in de meetprocedure vaak al tijdens het veldwerk zelf naar voren en kan direct op de situatie worden ingespeeld. Een voorbeeld van een radargram wordt weergegeven in figuur 1.

Fig. 1. Radargram gemeten met een 450 MHz antenne. De verticale as is de tijd/diepte-as.

CMP-meting

Een gemeten radargram heeft de tijd als verticale as. Om het radargram te kunnen omrekenen naar een diepteprofiel is het noodzakelijk om de voortplantingssnelheid van de golf in de verschillende lagen te kennen.

Hiervoor worden twee methoden routinematig toegepast:

- gebruik van een vaste snelheid voor het omrekenen van tijd naar diepte (de snelheid is bijvoorbeeld verkregen door eerdere ervaring in dezelfde grondsoort);
- het uitvoeren van een CMP-meting (Common MidPoint). Door vanuit een bepaald punt de afstand tussen de zender en ontvanger steeds groter te maken, wordt een radargram verkregen waarin horizontale grondlagen als hyperbolen worden weergegeven. Rekenkundig kan nu worden nagegaan bij welke snelheden bepaalde lagen worden 'rechtgetrokken'. Hiermee wordt een snelheids-diepteprofiel geconstrueerd, dat kan worden gebruikt om de tijd in het radargram om te rekenen naar diepte.

Wat voor informatie levert een radargram

Een radargram levert door middel van geregistreerde reflectiesterken informatie over overgangen in de ondergrond, maar het is geen 'foto': de verticale as is een tijdas. In de meeste gevallen is een specialist nodig om de in het radargram aanwezige informatie om te zetten naar een zo compleet mogelijk dieptebeeld van de ondergrond.

Om radargrammen beter 'leesbaar' te maken, worden veelal van alle metingen (de verticaal golvende lijnen in de figuur) de ruimte tussen de nullijn en de uitslagen naar rechts zwart gemaakt. Hierdoor wordt de relatie tussen de verschillende naast elkaar gelegen metingen duidelijker en worden de reflecties (de zwarte, vrijwel horizontaal lopende lijnen) zichtbaar.

Stoorsignalen

Niet alle signalen, die door de ontvanger worden geregistreerd, zijn afkomstig van het doel. Bij radarmetingen treden een aantal stoorsignalen op die soms rekenkundig kunnen worden weggefilterd, maar soms ook alleen door het ervaren oog van een radarspecialist kunnen worden herkend.

De volgende stoorsignalen kunnen worden onderscheiden:

- Direct wave (Airwave)
De eerste puls die bij de ontvanger binnenkomt is door de lucht (ca. 300.000 km/s) gereisd. Omdat de afstand tussen de zender en de ontvanger constant wordt gehouden, komt deze golf bij iedere meting in het profiel op hetzelfde moment aan.
- Groundwave
Meestal loopt de snelste weg in de ondergrond tussen de zender en ontvanger direct langs het aardoppervlak. Deze sterke golf komt, net als de direct wave, op een vast tijdstip aan.
- Ringing (WOW)
Geleidende voorwerpen in en op de ondergrond (b.v. metaalbrokken, maar ook slecht geconstrueerde radarantennes) kunnen als reactie op de uitgezonden radargolf zelf als secondaire zendantenne gaan dienen, waardoor een zich herhalend patroon bij de ontvanger wordt geregistreerd.
- Reflecties
Hoewel het de bedoeling van een radarmeting is om reflecties op te vangen, zullen er ook altijd ongewenste reflecties optreden die worden geregistreerd.
Als de reflecterende objecten (kelders, muren, kabels en leidingen) in de richting van de profiellijn liggen, zullen deze als een rechte lijn door het radargram lopen; de helling van deze lijn wordt bepaald door de hoek tussen het object en de profiellijn en door de snelheid van het medium (in lucht b.v. 30 ns/m). Vaak kunnen deze reflecties snel worden herkend en kunnen ze relatief eenvoudig worden weggefilterd.
Als de reflecties langs het gehele profiel op eenzelfde tijd aankomen (b.v. overkapping van een benzinstation of een oude kelder evenwijdig aan de profiellijn) wordt het lastiger. Deze storingen kunnen niet worden uitgefilterd en kunnen, in het geval dat ze niet worden herkend tijdens het veldwerk, een foutieve interpretatie van het radargram tot gevolg hebben.
Goede afscherming van de antennes (met radarabsorberend materiaal) en een zo uitgebreid mogelijk kennis van de veldomstandigheden voor aanvang van de metingen kunnen het reflectieprobleem beperken.
- Diffractie
Mocht het radarsignaal niet langs een grensvlak maar op een object worden gereflecteerd, dan zal een hyperbool in het radargram zichtbaar worden (diffractiehyperbolen). De top van de hyperbool geeft de plaats van het object aan. Diffractiehyperbolen geven informatie over

kabels en/of leidingen enzovoorts. Niet-continue lagen worden in het radargram geflankeerd door een halve diffractiehyperbool aan de randen. In principe zijn diffractiehyperbolen voor interpretatie zeer nuttige en gewenste kenmerken. Door aanwezigheid van objecten aan het aardoppervlak, of vele diffractoren in de ondergrond kan het radargram worden gedomineerd door diffractiehyperbolen, die de eventuele andere informatie overschaduwen. Deze hyperbolen kunnen worden omgerekend tot reflectiepunten (door migratie, een term die ook in de seismiek wordt gehanteerd).

- Ontvangst van andere (radar)signalen
Onvoldoende afgeschermdes antennes kunnen ook door andere zenders uitgezonden signalen in het ingestelde frequentiebereik opvangen. Dit zal verstoring in het meetsignaal opleveren. Hiertegen is geen remedie, wel zou het probleem kunnen worden onderkend door een meting uit te voeren zonder bronsignaal. Hiermee wordt het achtergrondsignaal geregistreerd en kan het probleem worden onderkend.

Een indicatie voor representatieve waarden van diverse elektromagnetische parameters is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Elektromagnetische eigenschappen voor verschillende media. De parameterwaarden geven veelal een orde van grootte aan. ϵ_r is de relatieve diëlektrische constante, σ is de elektrische conductiviteit, v is de elektromagnetische golfsnelheid en A is de materiaal-eigen demping.

materiaal	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	A (dB/m)
lucht	1	0	0,3	0
water (gedistilleerd)	80	0,01	0,033	0,002
water (zoet)	80	0,5	0,033	0,1
water (zout)	80	3000	0,01	1000
zand (droog)	3 - 5	0,01	0,15	0,01
zand (verzadigd)	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
silt	5 - 30	1 - 100	0,09	1 - 100
klei	5 - 40	2 - 1000	0,07	1 - 100
LNAPL	2 - 4	0,3	0,17	0,3
DNAPL (Per = PCE)	2,3	$5,6 \cdot 10^{-9}$		

2.2 Overzicht beschikbare radarsystemen

Grondradar

Er zijn vele grondradarsystemen op de markt. In het voor bodemonderzoek interessante frequentiebereik van circa 20 - 400 MHz wordt de markt momenteel gedomineerd door 3 systemen:

- pulseEkko van Sensors & Software (Canada);
- SIR (subsurface interference radar) van GSSI (Geophysical Survey Systems Inc, Verenigde Staten);
- RAMAC/GPR van Malå geoscience (Zweden).

Boorgatradar

Twee fabrikanten leveren ook een systeem waarmee vanuit boorgaten radarmetingen kunnen worden uitgevoerd, namelijk:

- RAMAC/LI van Malå geoscience (Zweden). Met dit systeem kan worden gemeten in boorgaten van minimaal \varnothing 0,056 m tot op een diepte van 300 m.

- Sensors & Software heeft recentelijk (januari 1997) een operationeel boorgatradarsysteem op de markt gebracht, waarmee in boorgaten \varnothing 0,03 m en groter tot op een diepte van 30 m kan worden gemeten. De beschikbare frequenties bedragen 50, 100 en 200 MHz.

Folders met de technische specificaties van deze radarsystemen zijn opgenomen als bijlage A.

2.3 Reproduceerbaarheid grondradarmetingen

2.3.1 *Invloed van het vochtgehalte van de grond*

Grondradar is zeer gevoelig voor de aanwezigheid van water in de onverzadigde zone en zal dus sterk reageren op veranderingen in het vochtgehalte en de pF-curve van de ondergrond. Dit betekent dat eenzelfde profiel, gemeten na een droge en na een natte periode, een verschillende respons geeft. De stratigrafie van de ondergrond wordt nog wel vergelijkbaar weergegeven, maar de sterkte van het signaal en het radargram verandert, waardoor kenmerken van de opbouw duidelijker, of minder duidelijk zichtbaar kunnen worden.

De effecten hiervan zijn te vergelijken met het maken van een foto met verschillende belichtingen: de resulterende foto's geven beide hetzelfde beeld weer, maar er zijn verschillen in de te onderscheiden details.

Het hierboven geschetste beeld wordt bevestigd door de literatuur:

- Grumman et al. [1995] geeft aan dat de kans op detectie van organische verbindingen wordt vergroot door het meten onder zo droog mogelijke omstandigheden, liefst in tijden die voorafgegaan zijn door een periode met weinig neerslag.
- Daniels et al. [1995] hebben grondradarmetingen verschillende malen in het jaar herhaald (januari, augustus, oktober, december). De door hen gemeten radargrammen zijn weergegeven in figuur 2: hierin is duidelijk te zien dat de radargrammen aanzienlijk kunnen verschillen. Figuur 3 toont een uitvergroting van de reflectie van de grondwaterspiegel, gemeten op vier tijdstippen. Ook hier zijn duidelijk de verschillen tussen de metingen te zien. De data uit de droge periode (augustus) gaven volgens hen het beste resultaat.
- Het beeld dat de veranderingen vooral worden veroorzaakt door de verschillen in het vochtgehalte in de onverzadigde zone wordt bevestigd door Roberts et al. Zij merken een goede reproduceerbaarheid op bij in natte perioden uitgevoerde radarmetingen (oktober, december, januari).
Ook merken zij op dat metingen op een bevroren ondergrond (met hierdoor een hoge weerstand, en zodoende minder demping) betere data opleveren dan metingen over een ontdooide bodem.
- Bovengenoemde auteurs baseren zich op praktijkresultaten en geven de voorkeur aan droge omstandigheden voor optimaal resultaat.
Monier-Williams [1995] komt op theoretische gronden tot een andere conclusie: de mogelijkheid tot detectie van een LNAPL-verontreiniging met grondradar wordt bevorderd door een indringend regenfront.

Correctie van radargrammen voor verschillen in vochtgehalte van de profielen

In de literatuur worden *geen* mogelijkheden genoemd om te corrigeren voor verschillende vochtgehalten.

Fig. 2. Eenzelfde radarprofiel, gemeten op 4 verschillende tijdstippen in het jaar.

Fig. 3. De reflecties van de grondwaterspiegel van de 4 metingen uit figuur 2 zijn hier naast elkaar geplaatst om het verschil goed te kunnen zien.

2.3.2 *Invloed onderlinge verschillen beschikbare apparatuur*

In de literatuur wordt bijna geen melding gemaakt van de verschillen en/of overeenkomsten van radargrammen die zijn opgenomen met verschillende apparaten.

Nguyen et al. [1997] melden dat twee op dezelfde locatie verzamelde datasets (de eerste gemeten in juni 1996 met een GSSI-SIR-2 systeem en de tweede gemeten in oktober 1996 met een GSSI-SIR-10 systeem) een grote mate van consistentie vertonen.

Ieder grondradarapparaat kan worden uitgerust met een veelvoud van antennes met ieder een eigen frequentiespectrum. Door verschillen in ontwerp tussen de merken zullen de antenne-eigenschappen verschillen. Hierdoor is het niet mogelijk om een radargram met verschillende grondradarsystemen exact te reproduceren.

Aangenomen wordt dat, bij deskundig hanteren van de gebruikte radarapparatuur en de bijbehorende processingsoftware, het merk van de gebruikte apparatuur wel invloed heeft op de vorm (uiterlijk) van de metingen, maar geen invloed heeft op de kwaliteit van de metingen.

2.3.3 *Conclusies reproduceerbaarheid grondradarmetingen*

Grondradar is gevoelig voor verschillen in het vochtgehalte van de onverzadigde zone.

Uit de literatuur blijkt dat in de praktijk metingen in een droge ondergrond een betere data-kwaliteit opleveren voor de potentiële detectie van verontreinigingen dan dezelfde metingen uitgevoerd op een locatie na een periode van regenval.

Ook bevroren grond is, door de verminderde demping van het radarsignaal, bevorderlijk voor de datakwaliteit.

Als de projectplanning hiervoor ruimte overlaat, kan hiermee rekening worden gehouden bij de planning van het veldwerk.

Verder kan worden gesteld dat de deskundigheid waarmee een grondradarapparaat wordt gebruikt, de keuze van de antennefrequentie en de interpretatievaardigheden van de onderzoeker een vele malen groter effect hebben op de kwaliteit van het onderzoeksresultaat dan de keuze voor een bepaald merk apparatuur.

Go/no-go

Verder onderzoek naar de reproduceerbaarheid van grondradarmetingen wordt in dit stadium van het onderzoek niet zinvol geacht. Het kan echter niet worden uitgesloten dat dit in een volgende fase van het onderzoek toch zinvol blijkt te zijn.

ONDERZOEKSPUNT PERSLUCHTINJECTIE

3.1 Aanleiding en doel van het onderzoek

Bij persluchtinjectie ontstaan zones met hoge luchtverzadiging (luchtkussens, bellenbanen) onder de grondwaterspiegel. Deze zones bepalen de invloedsstraal van een persluchtinjectielans. Bij het gebruik van persluchtinjectie (pli) is het van wezenlijk belang dat de verspreiding van lucht in de verzadigde zone in kaart kan worden gebracht. Hiervoor bestaan momenteel slechts enkele indirecte methodieken, zoals verandering van de grondwaterstand, ERT (electrical resistance tomography) en enkele andere methodieken [CUR/NOBIS, 1996]. Dit knelpunt werd als urgent onderzoeksvraagstuk vastgelegd tijdens het IAS-First International Symposium on In Situ Air-sparging for Site Remediation in Las Vegas (25 oktober 1996, roundtable discussion R. Hinchee, M. Marley, R. Johnson, D. Bass, R. Brown). De behoefte aan technieken voor het in kaart brengen van geïnjecteerde lucht is groot.

Op het symposium werd het vermoeden bevestigd dat rondom een pli-lans hoge verzadigingen aan lucht aanwezig kunnen zijn. Tevens werd het vormen van airpockets onder op microschaal slecht doorlatende lagen als probleem erkend. Voor het dimensioneren van het saneringssysteem is het van belang te kunnen meten hoe groot de invloedsstraal van een persluchtinjectie is.

Door het grote contrast tussen lucht en water kan de grootte van een luchtkussen in theorie goed met behulp van grondradar worden vastgesteld en zou kunnen worden nagegaan hoe perslucht zich gedraagt in de ondergrond.

Er is een aantal redenen aan te geven waarom grondradar een geschikt instrument zou zijn om de perslucht in de verzadigde zone in kaart te brengen:

- Er is een groot contrast tussen de diëlektrische constante van een zand/water en een zand/lucht mengsel. Grondradar reageert op dit contrast.
- Het is mogelijk om zeer snel (binnen enkele minuten) een profiellijn te meten. Dit maakt het mogelijk om de optredende veranderingen te monitoren.
- Het is niet noodzakelijk om boringen te verrichten. Hierdoor hoeven geen verstorende gaten te worden aangebracht die de persluchtverspreiding kunnen beïnvloeden en mogelijk nieuwe verspreidingspaden voor de verontreiniging openen.

Het onderzoek bestaat uit een literatuuronderzoek, indicatieve veldmetingen (in Brummen) en modelberekeningen. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze deelonderzoeken behandeld.

Op basis van de resultaten van het uitgevoerde onderzoek wordt nagegaan of grondradar van belang kan zijn bij het vaststellen van de invloedsstraal bij persluchtinjectie. Definitie van belang: er bestaat een aantoonbare relatie tussen de aanwezigheid van perslucht onder de grondwaterspiegel en een verandering in het radarsignaal.

Wanneer het belang is aangetoond, wordt voorgesteld om in een tweede fase van het onderzoek een pli-proef te monitoren met een grondradar.

3.2 Literatuuronderzoek

Er is weinig literatuur over het monitoren van persluchtinjecties met behulp van grondradar. In totaal zijn slechts drie verwijzingen in de richting van deze toepassing ontdekt:

- Sensors & Software (1997) noemt in de folder voor hun pulseEKKO 100 borehole radarsysteem (zie bijlage A) het monitoren van persluchtinjectie als mogelijke toepassing. Het bedrijf heeft echter geen ervaring met deze toepassing.
- Finci et al. [1997] beschrijven in hun notitie 'Use of borehole radar for air sparging operations monitoring (Note #806)' de voorlopige resultaten van hun nog lopend onderzoek. Hierbij zijn met behulp van tomografische methoden met een RAMAC boorgatradarmetingen voor en tijdens een persluchtinjectieproef uitgevoerd. Zij slaagden erin de driedimensionale verspreiding van lucht in de grond in kaart te brengen. Hiermee is de invloedstraal van de persluchtinjectie bepaald.
Voor het onderzoek zijn een aantal 'company sensitive en patent pending' methoden gebruikt. Bovendien loopt het onderzoek momenteel nog en wordt het onderzoek uitgevoerd voor de USAF. Dit betekent dat de gebruikte methodiek momenteel, en waarschijnlijk ook in de toekomst, niet vrij beschikbaar is.
- Gilson et al. beschrijven in 'Near surface applications of borehole radar, Sensors & Software PEMD #126' een bijna tegengestelde toepassing. Hierbij wordt de toename van het vochtgehalte tijdens een slurry-injectieproef in kaart gebracht.

Concluderend kan worden gesteld dat er geen literatuur bekend is waarin de aanwezigheid van perslucht in de verzadigde zone door middel van grondradarmetingen wordt vastgesteld.

Het feit dat tomografische boorgatradarmetingen positieve resultaten kunnen leveren voor vergelijkbare toepassingen kan als indicatie worden gezien dat radarmetingen vanaf het oppervlak ook succesvol kunnen zijn.

3.3 Veldproef in Brummen

3.3.1 Inleiding onderzoek Brummen

Door T&A RADAR is in juni 1996 een grondradaronderzoek uitgevoerd op een locatie aan de Zutphensestraat 139 te Brummen. De onderzoekslocatie bestaat uit het terrein van een voormalige metaalwarenfabriek. De bodem is hier verontreinigd met onder andere oplosmiddelen (VOCI, met name trichlooretheen) en wordt momenteel in situ gesaneerd met behulp van persluchtinjectie.

Het grondradaronderzoek is uitgevoerd in het kader van een NOBIS-project naar het gedrag van perslucht bij een in situ sanering. Er zijn antennefrequenties van 110 en 225 MHz gebruikt.

Het doel van de metingen is om met behulp van grondradar de veranderingen in de ondergrond als gevolg van de geïnjecteerde perslucht (op een diepte van 6,0 - 7,0 m-mv) te monitoren. Ook is getracht de verandering van de grondwaterspiegel met de tijd te volgen.

Het rapport van het onderzoek is opgenomen als bijlage B.

3.3.2 Resultaten en conclusies onderzoek Brummen

Door T&A Radar zijn de onderstaande resultaten en conclusies gerapporteerd. Hierbij moet worden vermeld dat volgens de overige radarspecialisten in het consortium de in deze tekst getrokken conclusie:

"De test op de locatie in Brummen heeft de mogelijkheid aangetoond om veranderingen onder invloed van een in situ perslucht injectiesysteem met behulp van grondradar te monitoren."

te enthousiast is verwoord. Door de slechte kwaliteit van de radargrammen (er bleken veel storingsbronnen op de locatie aanwezig te zijn) is het niet mogelijk om dit met zekerheid te stellen. De veranderingen tussen de verschillende radargrammen kunnen ook veroorzaakt zijn door stoorsignalen.

In totaal werden op de onderzoekslocatie vier radarprofielen gelopen met zowel de 225 MHz als de 110 MHz antenne (voor locatie zie bijlage B). Deze profielen werden om 11.00 uur (nul-situatie), 14.00 uur, 15.30 uur en om 17.00 uur gelopen om het effect van de persluchtinjectie te monitoren. De resulterende grondradarprofielen zijn weergegeven in de bijlagen van het rapport (zie bijlage B).

De persluchtinjectie werd gestart om 12.00 uur.

De testsituatie op het terrein van een voormalige metaalwarenfabriek te Brummen is niet ideaal voor een test met grondradar. Door obstakels in de vorm van puin, funderingen, struikgewas en bomen bleek het van tevoren geplande grid moeilijk te lopen. In de ondergrond zijn veel storende invloeden in de vorm van metalen platen, baksteen, puin en kabels enzovoorts aanwezig. Dit alles had een nadelige invloed op de kwaliteit van de radargegevens.

De effecten van de persluchtinjectie op de grondwaterspiegel zijn met de 225 MHz antenne niet waargenomen, doordat het diepte penetrerend vermogen niet toereikend was om de grondwaterspiegel op een diepte van 3,6 m minus maaiveld te monitoren.

De leem- en kleihoudende bovengrond heeft een dempend effect gehad op het diepte penetrerend vermogen van de 225 MHz antenne. De gewenste penetratiediepte is met de 225 MHz antenne niet gehaald. Wellicht dat de verontreiniging met VOCl en de verhoogde conductiviteit hierbij ook van invloed is geweest.

De 110 MHz antenne had wel voldoende penetrerend vermogen om de bodemopbouw in kaart te brengen en de effecten van de persluchtinjectie te monitoren. De veranderingen onder invloed van de persluchtinjectie zijn op de 110 MHz radarprofielen zichtbaar. Op de profielen is de invloed van de 'luchtbel' te zien door een toename van het aantal reflectoren rond het persluchtinjectiefilter en door een toename in amplitude van de reflectoren.

De test op de locatie in Brummen heeft de mogelijkheid aangetoond om veranderingen onder invloed van een in situ persluchtinjectiesysteem met behulp van grondradar te monitoren.

Een volgende test zal echter op een ook voor in situ saneringen geschiktere locatie uitgevoerd dienen te worden.

De klei- en leemlenzen in de ondergrond hadden een nadelige invloed op het diepte penetrerend vermogen van de 225 MHz antenne.

3.4 **Modellering grondradar voor persluchtmonitoring**

3.4.1 *Inleiding modellering*

De in Brummen door T&A radar gemeten radargrammen hebben een slechte kwaliteit. Door de aanwezigheid van sterke storingsbronnen is het niet goed mogelijk om de effecten van de persluchtinjectie eenduidig in de radargrammen te zien. De veranderingen tussen de verschillende radargrammen kunnen ook veroorzaakt zijn door stoorsignalen.

Omdat noch aan de hand van het literatuuronderzoek, noch aan de resultaten van het in Brummen uitgevoerde veldwerk duidelijkheid over de mogelijkheden om met grondradar perslucht uit te karteren is verkregen, zijn in het kader van het onderzoek door NITG-TNO modelberekeningen uitgevoerd.

In samenwerking met een persluchtdeskundige is een representatief ondergrondmodel opgesteld, waarvoor met behulp van een 2-D raytracingpakket van Sensors & Software radargrammen zijn berekend.

Met behulp van het softwarepakket zijn een aantal varianten van de mogelijke verdeling van lucht in de ondergrond doorgerekend.

Het rapport van de modellering is opgenomen als bijlage C. De resultaten en conclusies van dit rapport staan ook vermeld in de hiernavolgende paragraaf (zie 3.4.2).

3.4.2 *Resultaten en conclusies modellering*

De modellering geeft aan dat in principe de perslucht kan worden getraceerd in de ondergrond: er ontstaan relevante veranderingen van reflectiecoëfficiënten die resulteren in verschillende radargrammen voor verschillende uitbreidingen en verzadigingen van de ondergrond met perslucht.

De toepasbaarheid van grondradar voor het monitoren van perslucht zal echter in het algemeen beperkt zijn door de beperkte penetratie die met grondradar kan worden bereikt. Alleen in situaties met een hoge elektrische weerstand van de ondergrond kan een redelijke penetratie worden bereikt.

In de praktijk betekent dit dat de toepasbaarheid beperkt is tot gebieden waarin met name zanden met een laag lutumgehalte voorkomen. Voor een volgende testlocatie voor het toepassen van grondradar dient dan ook aan deze conditie te worden voldaan.

Het is duidelijk dat alleen al door de top van de verbreiding van de geïnjecteerde lucht te karteren met de continue radarmetingen aan het oppervlak, een belangrijke bijdrage wordt geleverd aan de kennis over het verspreidingsgedrag van perslucht in de bodem en daarmee over de effectiviteit die kan worden bereikt met deze reinigingstechniek.

3.5 **Conclusies onderzoekspunt perslucht**

Noch het literatuuronderzoek, noch het in Brummen uitgevoerde veldwerk tonen aan dat er een aantoonbare relatie bestaat tussen de aanwezigheid van perslucht onder de grondwaterspiegel en een verandering in het grondradarsignaal.

De uitgevoerde modellering geeft aan dat in principe perslucht met grondradar kan worden getraceerd in de ondergrond: er ontstaan relevante veranderingen van reflectiecoëfficiënten die resulteren in verschillende radargrammen voor verschillende mate van uitbreiding en verzadiging van de perslucht.

Gezien het grote diëlektrische contrast tussen lucht en water is het in theorie wel mogelijk om de lucht te kunnen waarnemen met grondradar.

Voor tomografische boogtradar metingen is de relatie wel aangetoond [Finci et al., 1997]. Zijn onderzoek loopt echter nog en is grotendeels niet openbaar (onderzoek voor USAF). Hierbij dient niet uit het oog te worden verloren dat met deze methode alleen informatie wordt verzameld over het vlak tussen twee boorgaten.

Omdat de voor boogtradar metingen benodigde boorgatdiepte vaak bij saneringen ontbreekt, en omdat de optimale positie van een persluchtinjectielans niet noodzakelijkerwijs tussen twee boorgaten in ligt, zullen routinematige toepassingen van boogtradar bij in situ saneringen beperkt zijn. Bij het aanbrengen van extra boorgaten is er bovendien risico voor het creëren van nieuwe voorkeursstroombanen voor lucht en verontreinigende stoffen.

Go/no-go-beslissing voor vervolgonderzoek

Omdat door de modellering van perslucht aangetoond is dat grondradar van belang kan zijn bij het vaststellen van de invloedsstraal bij persluchtinjectie (definitie van belang: er bestaat een aantoonbare relatie tussen de aanwezigheid van perslucht onder de grondwaterspiegel en een verandering in het radarsignaal) wordt voorgesteld om voor dit onderzoekspunt door te gaan met de volgende fase en een persluchtinjectieproef uit te voeren op een geschikte locatie.

De toepasbaarheid van grondradar voor het monitoren van perslucht zal echter in het algemeen beperkt zijn door de beperkte penetratie die met grondradar kan worden bereikt. De toekomstige test voor het toepassen van grondradar dient te worden uitgevoerd in een gebied met een hoge elektrische weerstand van de ondergrond.

HOOFDSTUK 4

ONDERZOEKSPUNT VERONTREINIGINGEN (RETENTIE/RETARDATIE)

4.1 Inleiding

De toepassing van grondradar staat beschreven in CUR-rapport 182 'Geofysische technieken voor grondonderzoek' opgesteld door CUR-commissie B 63 [CUR, 1996]. In het rapport wordt met name ingegaan op geotechnische toepassingen van grondradar. De publicatie van CUR-commissie B 63 geeft geen duidelijkheid over de mogelijkheden en onmogelijkheden van grondradar voor onderzoek naar bodem- en grondwaterverontreinigingen.

In de praktijk wordt grondradar, naast gebruik voor de in het CUR-rapport beschreven toepassingen, reeds met wisselend succes ingezet om bodemverontreinigingen in kaart te brengen. De resultaten van dat onderzoek worden weergegeven in de vorm van verontreinigingscontouren, waarbij geen onderscheid wordt gemaakt tussen grond- en grondwaterverontreiniging.

Vanuit het perspectief van zonering is het wellicht mogelijk dat de toepassingsmogelijkheden van grondradar worden gekoppeld aan het al dan niet aanwezig zijn van puur product.

Door een groep theoretici wordt de toepasbaarheid van grondradar bij het in kaart brengen van bodemverontreiniging in twijfel getrokken. Een andere groep kent deze twijfel niet. Duidelijk is dat toepassingsmogelijkheden en onmogelijkheden voor bodemonderzoek nog niet deugdelijk zijn gerapporteerd. Specifieke validatieproeven ontbreken.

Het toepassen van de methodiek voor zonering, waarbij de verontreinigingssituatie nog verder wordt gedifferentieerd naar een retentie- en retardatiezone is momenteel nog niet mogelijk.

Het doel van dit onderzoekspunt is om na te gaan of:

- A een aantoonbare relatie kan worden gelegd tussen de waargenomen/berekende anomalieën in de radardata en de retentie/retardatiezone in een verontreiniging;
- B de met behulp van radarmetingen bepaalde verontreinigingscontouren vergelijkbaar zijn of overeenkomen met de bij conventioneel onderzoek gevonden verontreinigingscontouren.

In 4.2 wordt ingegaan op de theoretisch achtergronden van het verspreiden van bodemverontreinigingen. Hierbij wordt eerst het principe van imbibitie en drainage geïntroduceerd, waarna het concept van retentie en retardatie wordt beschreven. Ook wordt ingegaan op de manier waarop olieverontreinigingen zich in de grond kunnen bevinden.

Punt A is onderzocht door het uitvoeren van een literatuuronderzoek (zie 4.3). Voor punt B is dit niet voldoende. De bedrijven, die met behulp van grondradar bodemverontreinigingen in kaart brengen, geven geen informatie over de door hen gebruikte techniek.

Omdat ook de resultaten van zulke onderzoeken in het algemeen niet openbaar zijn en een theoretische onderbouwing ontbreekt, is er onduidelijkheid over de mogelijkheden en de beperkingen van de gehanteerde 'huisseigen' methodiek(en).

Om toch een uitspraak te kunnen doen over de bruikbaarheid van deze onderzoeksmethode is in het kader van het onderhavige onderzoek een evaluatie uitgevoerd waarbij de onderzoeksresultaten van zestien locaties, waarop zowel radaronderzoek als conventioneel onderzoek is uitgevoerd, zijn vergeleken. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in 4.4.

Ook zijn door het consortium proefmetingen uitgevoerd op een voor grondradar geschikt geachte locatie (Terschelling) met een bekende verontreinigingssituatie. Hierbij is nagegaan of de in de literatuur gevonden aanwijzingen voor de aanwezigheid van een bodemverontreiniging in de radargrammen zichtbaar zijn. Het resultaat van dit onderzoek is weergegeven in 4.5. De conclusies en aanbevelingen worden in 4.6 besproken.

4.2 Theorie imbibitie en drainage bij bodemverontreinigingen

Imbibitie en drainage

De theorie van imbibitie en drainage is afkomstig uit de mijnbouwwetenschappen en is gebaseerd op capillaire krachten en op wetting en non-wetting eigenschappen van vloeistoffen ten opzichte van een poreus medium. Poreus materiaal heeft een 'adhesievoorkeur' voor één van de vloeistoffen die zich in de nabijheid van zijn oppervlak bevindt. Deze vloeistof is de wetting vloeistof.

De bodem is een poreus medium en zuigt de wetting vloeistof langs de wanden van de gronddeeltjes in de poriën. Het drukverschil in een porie tussen de non-wetting en de wetting vloeistof is de capillaire druk. Het drukverschil manifesteert zich als een bolvormig contactoppervlak tussen de vloeistoffen en is omgekeerd evenredig met de straal van de porie. In grote poriën is de capillaire druk kleiner dan in kleine poriën.

Het verdringen van een non-wetting vloeistof door een wetting vloeistof is imbibitie. De verzadiging van de non-wetting vloeistof kan door imbibitie worden teruggebracht tot de restverzadiging, waarbij de non-wetting vloeistof niet meer stroomt maar in de vorm van druppels in de wetting vloeistof is achtergebleven.

Bij drainage verdringt de non-wetting vloeistof de wetting vloeistof. Ook de verzadiging van de wetting vloeistof kan worden teruggebracht tot restverzadiging, waarbij de wetting vloeistof niet meer stroomt maar aanwezig is als een filmpje langs de gronddeeltjes.

Een imbibitiefrent groeit in de poriën waar de capillaire druk het grootst is, dat wil zeggen langs de kleinste poriën; een drainagefront groeit in de poriën waar de capillaire druk het kleinste is, dat wil zeggen langs de grootste poriën.

Partitie

Naast de beschrijving van het vloeistofgedrag op de meer macroscopische schaal van bodemlagen en de meer mesoscopische schaal van capillairen is ook het vloeistofgedrag op moleculaire schaal van belang. Op moleculaire schaal bestaan de bodemvloeistoffen (olie, water en lucht) niet langer uit één fase maar uit een mengsel van afzonderlijke componenten. Het gedrag van de vloeistoffen wordt daarbij bepaald door het gezamenlijke effect van de bijdragen van de afzonderlijke componenten.

Het moleculaire gedrag wordt erdoor gekenmerkt dat de componenten niet uitsluitend in de oorspronkelijke fase aanwezig blijven, maar zich over alle aanwezige bodemfasen verdelen. Dit proces heet partitie.

Voor partitie is bij een bodemverontreiniging met olie het onderscheid tussen de retentie- en de retardatiezone van belang. In de retentiezone is naast een vaste fase en een waterfase ten minste een oliefase aanwezig. Daarnaast kan een luchtfase aanwezig zijn. De oliefase treedt meestal op als de leverancier van oliecomponenten en is dan bepalend voor de concentraties in de overige fasen. De vaste fase (sorptiefase) vormt dan een 'sink'.

In de retardatiezone is geen oliefase aanwezig en bestaat het bodemsysteem boven de grondwaterspiegel uit drie fasen en beneden de grondwaterspiegel uit twee fasen. In retardatiesys-

temen treedt de vaste fase (sorptiefase) vaak op als leverancier van oliecomponenten. De vaste fase is dan een 'source'.

Bij de biologische sanering met perslucht speelt vooral de zuurstofuitwisseling een belangrijke rol. Ook de zuurstofuitwisseling wordt op moleculair niveau bepaald door partitie. De perslucht is de 'source'; het reducerend vermogen van de bodem vormt de 'sink'. In de bodem kan onderscheid worden gemaakt tussen zuurstofrijke zones (aëroob) en zuurstofarme zones (anaëroob).

Bodemverontreiniging met olie

Olie, die in of op de bodem terecht komt, verplaatst zich onder invloed van de zwaartekracht door de onverzadigde zone en verdringt daarbij water en/of lucht. In een systeem met olie, water en lucht is water in eerste instantie de wetting vloeistof. De gronddeeltjes vullen derhalve een zo groot mogelijk deel van hun oppervlak met water. Voor de onverzadigde zone betekent dit dat ieder gronddeeltje omgeven is met een filmpje van water.

Voor een gronddeeltje met een waterfilmpje is vervolgens olie een wetting vloeistof en lucht een non-wetting vloeistof. De natte gronddeeltjes vullen op hun beurt een zo groot mogelijk deel van hun oppervlak met olie. De maximale hoeveelheid olie, die op deze wijze tegen de zwaartekracht in kan worden vastgehouden, is de restverzadiging en wordt ook wel retentiecapaciteit genoemd.

Als de hoeveelheid olie, die in de bodem infiltreert, groter is dan de retentiecapaciteit van de onverzadigde zone bereikt het oliefront het grondwaterniveau. Afhankelijk van de druk op het 'indringingspunt' kan de olie een eindje daarin doordringen (drainage), maar zal deze daarna als een drijfslag uitspreiden over de grondwaterspiegel.

De grondwaterstand in Nederland fluctueert voortdurend. Wanneer de grondwaterspiegel daalt, gaat de olie in de drijfslag mee. In het systeem met olie en water is olie een non-wetting vloeistof en de verdringing van water door olie bij dalende grondwaterstand is dus een drainageproces. Olie verdringt het water eerst waar de capillaire druk minimaal is, dat wil zeggen in de grootste poriën. Wanneer een groot volume olie volgt, ontstaat een drainagefront waarbij ook het water in de kleinere poriën wordt verdrongen. Het water dat door de olie wordt ingesloten, bevindt zich als een filmpje rond de gronddeeltjes en op de contactpunten tussen de deeltjes.

Wanneer de grondwaterspiegel weer stijgt, stijgt de drijfslag mee. Het verdringen van olie door water is een imbibitieproces en het water verdringt de olie dus het eerst op plekken waar de capillaire druk maximaal is, dat wil zeggen in de kleinste poriën. In de grotere poriën kan olie worden ingesloten door het opdringende water. Hierbij worden niet alleen afzonderlijke olie-druppels gevormd, maar kunnen ook groepen poriën met olie worden afgesloten van andere poriën met olie.

Door het gecombineerde proces van drainage bij dalende grondwaterstand en van imbibitie bij stijgende grondwaterstand ontstaat een smeerzone waarin olie in grotere poriën is ingesloten.

Op moleculaire schaal treedt door partitie uitwisseling op van oliecomponenten tussen de verschillende bodemfasen. Met name de beter oplosbare componenten verspreiden zich daarvoor met het grondwater en de meer vluchtige verbindingen met de bodemlucht. De oliefase verandert hierdoor van samenstelling.

Vanuit de water- of luchtfase treedt sorptie op aan de vaste fase van de bodem. Door deze sorptie nemen de concentraties in de water- en luchtfase af en stijgen de concentraties in de vaste fase. Zodra de aangevoerde concentraties in het water of de lucht afnemen, keert het sorptieproces om, waarbij de vaste fase oliecomponenten afstaat aan het langsstromende water of de langsstromende lucht.

Samenvattend kan een bodemverontreiniging met olie worden beschreven aan de hand van zones waarin het gedrag van olie door verschillende processen wordt beheerst. Dit betreft drie retentiezones (1, 2 en 3) waarin olie als afzonderlijke fase aanwezig is en twee retardatiezones (4 en 5) waarin olie niet als afzonderlijke fase voorkomt:

1. een 'lekzone' waarin de olie zich heeft verplaatst naar de grondwaterspiegel;
2. een drijf laag op de grondwaterspiegel;
3. een smeerlaag onder de grondwaterspiegel waar olie door fluctuerende grondwaterstanden ingesloten kan zijn geraakt in grotere poriën;
4. een (retardatie)zone onder de grondwaterspiegel waar oplosbare oliecomponenten door grondwatertransport zijn terechtgekomen;
5. een (retardatie)zone boven de grondwaterspiegel waar vluchtige en oplosbare componenten door luchtstroming en watertransport zijn terechtgekomen.

4.3 Literatuurstudie grondradar en verontreinigingen

4.3.1 Inleiding literatuurstudie

De literatuurstudie voor het onderzoekspunt bodemverontreinigingen is opgezet om de volgende vraagstelling te kunnen beantwoorden:

- Is grondradar in staat om te reageren op veranderingen in de ondergrond door de aanwezigheid van verontreinigende stoffen, en zo ja, is het mogelijk om de verontreinigingssituatie (retentie/retardatiezone, concentraties e.d.) af te leiden uit grondradarmetingen?

Omdat dit onderzoek is voortgekomen uit het I & D-project is de aandacht vooral gericht op (L)NAPL-verontreinigingen en wordt bij het in kaart brengen van de verontreinigingssituatie vooral aandacht besteed aan het identificeren van de retentiezone en de retardatiezone.

Het onderzoek besloeg de gebruikelijke geofysische vakliteratuur (tijdschriften + boeken), alsmede de proceedings van de volgende internationale conferenties:

SAGEEP 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997;
GPR 1992, 1994, 1996;
SEG 1993, 1994, 1995, 1996.

Een lijst met de meest interessante titels van de voor dit onderzoek geraadpleegde literatuur is opgenomen in de literatuurlijst.

Voor de beschrijving zijn de verontreinigingen opgedeeld in twee groepen:

- Verontreinigingen waarvan algemeen geaccepteerd is dat ze met grondradar kunnen worden opgespoord:
 - Vaste stoffen/ionen (zie 4.3.2).
- Verontreinigingen die mogelijk met grondradar zouden kunnen worden opgespoord:
 - LNAPL's (Light Non-Aqueous Phase Liquids (zie 4.3.3);
 - DNAPL's (Dense Non-Aqueous Phase Liquids (zie 4.3.4).

In 4.3.5 wordt ingegaan op in de toekomst te verwachten ontwikkelingen en lopend onderzoek.

De conclusies van het literatuuronderzoek worden in 4.3.6 gegeven.

4.3.2 *Vaste stoffen/ionen*

Het gebruik van grondradar voor het opsporen van vaste stoffen (eigenlijk verstoorde grondstructuren door vergraven) en verhoogde ionenconcentraties (zout water, percolaat enz.) is een routinematige toepassing die voornamelijk op interpretatie van radargrammen is gebaseerd.

Vaste stoffen (b.v. huisvuil, grond enz.)

Kutrubes et al. [1992] lokaliseren de grenzen van een stortplaats door de identificatie van onderstaande aspecten in de radargrammen:

- ontbreken van continue reflectie (kenmerkend voor natuurlijke bodemlagen);
- onregelmatige reflectoren;
- diffractiehyperbolen (kenmerkend voor kleine reflectoren: b.v. vaten e.d.);
- een sterke verzwakking van het radarsignaal (de hoge geleidbaarheid door de aanwezigheid van goed geleidend materiaal en/of ionen zorgt ervoor dat in de verontreinigingspluim meer energie wordt omgezet in warmte dan ernaast).

Ionon (b.v. zout water, percolaat)

Door de aanwezigheid van ionen in het grondwater neemt de elektrische weerstand van de bodem af, hierdoor neemt de demping van het radarsignaal toe. Dit betekent dat zones in het grondwater met een sterke demping kunnen wijzen op een sterk verhoogd ionengehalte.

Het omrekenen van de mate van demping, via geleidbaarheid naar een ionenconcentratie zou in theorie voor een homogene ondergrond mogelijk moeten zijn, maar is door de vele, vaak sterk wisselende, onbekende bodemparameters praktisch niet mogelijk.

Het radargram kan wel worden gebruikt om gebieden aan te geven met potentieel verhoogde ionengehalten, maar voor 'harde' uitspraken zullen altijd aanvullende analyses en/of geleidbaarheidsmetingen noodzakelijk blijven.

4.3.3 *LNAPL's*

LNAPL's verspreiden zich over het algemeen als volgt:

Vanaf het aardoppervlak sijpelt de vrijgekomen LNAPL door de onverzadigde zone omlaag tot op de volcapillaire zone. Omdat de vloeistof lichter is dan water wordt er een smeerzone met puur product in de poriën (retentiezone) gevormd op het freatische vlak. Volgens Redman et al. [1994] kan 80 - 90 % van het oorspronkelijk aanwezige poriënwater in deze zone vervangen zijn door LNAPL.

Door fluctuaties in de grondwaterspiegel wordt de LNAPL uitgesmeerd, zodat er ook puur product in de poriën onder de grondwaterspiegel aanwezig kan zijn (retentiezone). Door diffusie en advectief transport van de opgeloste fractie kan de stof zich verder in het grondwater verspreiden (retardatiezone). In de onverzadigde zone blijft een residuaire verontreiniging (retentiezone) achter.

Volgens aan aantal onderzoekers ontstaat er boven de drijfslaag een gasfase van (een deel van) de vluchtige componenten van de LNAPL (retardatiezone). Deze damp verandert het natuurlijk aanwezige vochtprofiel (pF-curve) doordat het water wordt verdrongen.

Al deze bovengenoemde zones kunnen door de verschillen in diëlektrische constante in theorie door grondradar meetbare anomalieën opleveren. Uit de literatuur is een aantal op radargrammen zichtbare fenomenen bekend die worden verklaard door de aanwezigheid van één van de bovengenoemde zones van een LNAPL-verontreiniging. De gevonden fenomenen zijn:

- *Veranderde reflecties in de verontreinigde grond boven de grondwaterspiegel*

Olhoeff [1986] neemt waar dat er een schaduwzone (*verminderde reflecties*) aanwezig is in de radargrammen van de onverzadigde zone (zie fig. 4). Dit is een van de meest geobserveerde fenomenen in de literatuur en wordt in verband gebracht met de aanwezigheid van een 'drijfslaag'; in de termen van dit onderzoek: de retentiezone rond de grondwaterspiegel.

Theorie

Barber et al. [1994] berekenden de reflectie van radargolven aan dunne zones met een hoge verzadiging met LNAPL. Hierbij werd uitgegaan van een simpel model van 100 % verzadiging in de 'drijfslaag' en 0 % daarbuiten.

Bij een frequentie van 100 MHz blijkt een drijfslaag een detecteerbare reflectie te veroorzaken als de dikte groter is dan 90 cm. Bij 500 MHz bedraagt de minimum detectiedikte 18 cm, bij 900 MHz 8 cm.

Praktijk

Metingen in het laboratorium en het veld van Barber et al. [1994] toonden aan dat deze reflectie in de praktijk niet goed kan worden gemeten, omdat de 'drijfslaag' niet scherp begrensd is; dit bevestigt het beeld dat in de praktijk een smeerzone wordt aangetroffen. Door de in de praktijk optredende minder grote contrasten wordt er geen duidelijke reflectie waargenomen.

Fig. 4. Voorbeeld van een 'schaduwzone' in de reflecties van de onverzadigde zone door de aanwezigheid van een verontreiniging.

- *Verandering van de reflectiesterkte van het freatische vlak*

Grumman et al. [1995] vinden een *verminderde reflectiesterkte* onder de grondwaterspiegel. Zij verklaren dit als volgt: door de aanwezigheid van de retentiezone rond de grondwaterspiegel, een uitgesmeerde LNAPL-'drijfslaag' rond de grondwaterspiegel, wordt de sterke reflectie van het grondwater minder sterk en 'wazig'.

Dit wordt mede veroorzaakt door het feit dat de componenten, waaruit de LNAPL is opgebouwd qua elektrische eigenschappen, meer op droog zand dan op water lijken.

Ook Benson [1995] en Barber et al. [1994] namen deze verminderde reflectiesterkte waar en relateerden het aan een uitgesmeerde 'drijfslaag'. Doordat de overgang naar het grondwater minder scherp wordt, is de reflectie minder duidelijk.

In tegenstelling tot het bovenstaande vinden Campbell et al. [1996] een *verhoogde reflectiesterkte* onder de drijflaag. Zij verklaren het verschil, doordat zij in een situatie werkten waar veel vocht in de bodem aanwezig was. Doordat dit water verplaatst is door de gasfase (retardatiezone) van de vluchtige componenten van de LNAPL (deze hebben een ca. 20 maal lagere diëlektrische constante dan water) werd het diëlektrische contrast (en zodoende de reflectiesterkte) tussen de grond boven en onder de grondwaterspiegel groter dan in de niet-verontreinigde grond.

- *Veranderde aankomsttijd van de reflectie van het freatische vlak*

Een LNAPL-'drijflaag' heeft een hogere snelheid voor radargolven dan de omringende niet-verontreinigde grond. Hierdoor wordt de reflectie van het grondwater onder een drijflaag vroeger verwacht dan in een niet-verontreinigde situatie. Het gewicht van de 'drijflaag' drukt het freatisch vlak mogelijk ook omlaag: dit effect vertraagt de aankomst van de reflectie.

Door deze tegenwerkende effecten, en het feit dat de vertraging/vervroeging meestal klein is (één tot enkele nanoseconden), worden in de literatuur tegenstrijdige waarnemingen vermeld. B.V.: Campbell et al. [1996] en DeRyck et al. [1993] vinden *vertraging* en Maxwell et al. [1995] vinden *vervroeging*.

- *Versmeren van reflecties onder het freatische vlak*

Benson [1995] neemt een 'versmeren' van de reflecties onder de grondwaterspiegel waar en relateert deze aan een verhoogd koolwaterstoffengehalte (de retardatiezone onder de grondwaterspiegel, zie fig. 5).

Fig. 5. Voorbeeld van het 'versmeren' van de reflecties en een toename van de reflecties onder de grondwaterspiegel door de aanwezigheid van een verontreiniging.

- *Veranderingen van reflecties onder de grondwaterspiegel*

Benson [1995] neemt een toename van de reflecties onder de grondwaterspiegel waar. Dit wordt verklaard door de hoge weerstand van opgeloste koolwaterstoffen (retardatiezone), waardoor de demping van het radarsignaal vermindert (zie fig. 5).

Nash et al. [1997] nemen schaduwzones waar, waarbij de *reflecties onder de grondwaterspiegel sterk gedempt* zijn en gebruiken deze om een verontreiniging met kerosine en dergelijke uit te karteren. Er wordt echter geen conventioneel onderzoek beschreven dat de zo gevonden contouren bevestigt. De demping wordt door hen verklaard met een toename van de geleiding ten gevolge van de aanwezigheid van een 35 jaar oude koolwaterstoffenverontreiniging.

Genoemde beweringen lijken in tegenspraak. Door toevoegen van koolwaterstoffen (goede isolatoren!) aan het grondwater wordt in het ene geval een toename en in het andere geval een afname van de geleidbaarheid waargenomen. Er zijn echter twee publicaties (één over een praktijkgeval en één over de achterliggende theorie) die hiervoor een verklaring bieden:

Gajdos et al. [1995] nemen in laboratoriumexperimenten waar dat, terwijl olie een isolator is, de elektrische weerstand van een zand/oliemengsel bij toenemend oliegehalte eerst afneemt en pas bij een gehalte van meer dan 11 massa% toeneemt.

Monier-Williams [1995] geeft een theoretische verhandeling over de effecten op de schijnbare geleidbaarheid σ_a door de aanwezigheid van LNAPL in de verzadigde zone. Hij stelt:

"A bulk decrease in σ_a may be attributed to aqueous depletion in the vadose zone due to dynamic displacement, allowing drainage through reduction in aqueous surface tension and altered wetting properties"....." A bulk increase in σ_a may occur due to enhancement of aqueous connectivity and surface conductance".

De mate waarin deze effecten optreden, zijn afhankelijk van het watergehalte, de samenstelling van het grondwater, de korrelverdeling, de sortering, de samenstelling van de matrix, de effectieve porositeit, de temperatuur en de specifieke eigenschappen van de (componenten van de) LNAPL's, zodat zowel een toename als een afname van σ_a kan optreden. Ook is het mogelijk dat de effecten elkaar opheffen.

LNAPL verontreinigingscontouren

Door Nguyen et al. [1997] zijn uitgebreide grondradarmetingen gecombineerd met andere geofysische methoden (IP, EM). Door uitkarteren van zichtbare schaduwzones zijn verontreinigingscontouren gemaakt. De zo gevonden contouren vertonen volgens Nguyen 'enige ruimtelijke samenhang' met de bij conventioneel onderzoek gevonden contouren.

Deze resultaten zijn behaald door gebruik te maken van een grote menskracht- en materiaalinzet, waarbij processing en interpretatie van de resultaten nog niet in een routinematige stadium zijn.

Nguyen is optimistisch over de potentie van deze methode voor routinematige toepassing en merkt op dat alleen op basis van grondradarmetingen, vanwege de geologische heterogeniteit van de bodem, geen uitsluitsel kan worden gegeven over de verontreinigingssituatie op een locatie.

4.3.4 *DNAPL's*

DNAPL's verspreiden zich over het algemeen als volgt:

Vanaf het aardoppervlak sijpelt de vrijgekomen DNAPL door de onverzadigde zone omlaag tot op de volcapillaire zone. Omdat de vloeistof zwaarder is dan water wordt er geen drijfslag ge-

vormd op het freatische vlak, maar migreert de vloeistof verder omlaag. Dit gebeurt niet in een aaneengesloten front, maar als 'vingers'; dunne kanalen die minder weerstand bieden tegen verticale stroming dan de omringende grond. Via deze kanalen stroomt de vloeistof omlaag tot hij een slechter doorlatende laag tegenkomt. Hierop vormt zich een 'poel' met een hoge verzadiging met DNAPL (retentiezone). De poel groeit totdat hij een ander verticaal kanaal tegenkomt. Hier vervolgt de DNAPL zijn weg omlaag en herhaalt het proces zich.

Omdat de onderkant van de poelen niet ondoorlatend is, maar alleen minder goed doorlatend, kan een deel van de DNAPL in de loop van de tijd omlaag migreren. Langs de verticale kanalen, en ter plaatse van de poelen blijft uiteindelijk slechts een residuaire verontreiniging achter (retentiezones). Deze residuaire verontreiniging kan volgens Brewster et al. [1994] (ontleend aan [Kueper et al., 1992]) 1 - 15 % van het poriënvolume bedragen.

Brewster et al. [1994] hebben de reflectiecoëfficiënt voor verschillende verzadigingen van een bepaald soort zand (Borden-zand) als functie van de PCE-verzadiging berekend. Hun grafiek is opgenomen als figuur 6. Uit deze grafiek blijkt dat bij geringe verzadigingen (enkele procenten) de reflectiecoëfficiënt zeer klein is, zodat te verwachten is dat alleen sterk met DNAPL verzadigde poelen een meetbare grondradaranomalie voor deze retentiezone zullen opleveren.

Fig. 6. Reflectiecoëfficiënt als functie van de PCE (= per) verzadiging voor 'Borden'-zand, berekend uitgaande van het Feng-Sen-model.

Door Brewster et al. [1992, 1994 en 1995] zijn proeven beschreven waarbij een gecontroleerde injectie van een DNAPL (PCE) in de grond met grondradar (en diverse andere technieken) is gemonitord. Doordat de mogelijkheid gebruikt is om referentiemetingen uit de voeren vóór de injectie was het mogelijk om de veranderingen in de radargrammen te bepalen. Hierbij zijn de volgende aspecten waargenomen:

- ontstaan van DNAPL-poelen (toename van reflectiesterkte aan de top van de poel): volgens Brewster et al. [1995] is de reflectiesterkte bijna recht evenredig met het product van DNAPL-verzadiging en de dikte van de poel;
- velocity pull-up: door de toegenomen snelheid van de radargolf (ten gevolge van de aanwezigheid van PCE) komt de reflectie van de aquitard eerder aan dan in de nulsituatie. De snelheidstoename door de DNAPL-aanwezigheid kan 30 % bedragen (gemeten via normal-moveout meting);
- toename van de reflectiesterkte door aanwezigheid residuaire verontreiniging;

- het driedimensionale verplaatsingsbeeld van PCE in de ondergrond kon door de monitoring worden gevolgd.

Brewster geeft aan dat het zonder kennis van de nulsituatie zeer moeilijk is om bovengenoemde aspecten te herkennen en te kunnen relateren aan DNAPL-aanwezigheid.

Redman et al. [1992] monitoren met behulp van 21 ingegraven TDR-sondes (time domain reflectometry) de veranderingen in diëlektrische constante met de diepte en de tijd tijdens een experiment waarbij DNAPL in de grond indringt.

Het blijkt dat de grootste veranderingen optreden gedurende de eerste honderden uren van het experiment (tijdens het vormen van de retentiezones; de voorkeursstroombanen en poelen). Na langere tijd is bijna alle DNAPL omlaag gemigreerd en blijft alleen de residuaire verontreiniging (relatief lage verzadiging) achter, waardoor de verschillen in diëlektrische constante veel kleiner worden.

Dit experiment toont een belangrijke tekortkoming van de detectiemogelijkheid van een DNAPL-verontreiniging met behulp van grondradar: het uit de onderzoeken van Brewster et al. [1992, 1994 en 1995] bekende grote contrast van de DNAPL-poelen met de omringende grond is slechts tijdelijk aanwezig. De door de uiteindelijk achterblijvende residuaire verzadiging veroorzaakte anomalie is veel kleiner dan de initiële anomalie.

4.3.5 *Recent onderzoek/lopend onderzoek*

Recent onderzoek maakt ook gebruik van de frequentie-afhankelijkheid van de diëlektrische constante en frequentie-afhankelijke demping.

Fechner et al. [1996] realiseren zich dat de frequentie-afhankelijkheid van de complexe diëlektrische constante bepalend is voor de vorm van een gereflecteerde radarpuls. Zij berekenen de golfvorm voor een aantal reflecties en vinden duidelijke verschillen in de vorm van de reflectie voor verschillende invalshoeken van de EM-golf.

Deze techniek is nog niet verder uitgewerkt.

Liu et al. [1997] gebruiken vereenvoudigde borehole radartomografie om de verschuiving van de 'centerfrequency' van het radarsignaal als functie van het gevolgde pad door de ondergrond in kaart te brengen. Hierdoor kan een beeld worden gemaakt van de 'mate van demping' van de grondlagen. Deze techniek is nog niet verder uitgewerkt, maar kan in theorie zowel retentiezones als retardatiezones in kaart brengen.

Finci et al. [1997] kondigen aan dat zij verwachten in de toekomst door een nieuw antenneontwerp en binnen hun bedrijf ontwikkelde software overgangen in diëlektrische constante van '10 - 5' te kunnen gaan waarnemen.

Zij claimen met deze nog niet-bestaande hulpmiddelen verontreinigingen in een concentratie van 10 - 40 ppb te kunnen gaan waarnemen én identificeren tot een diepte van circa 12 m.

Als zij hierin slagen (de resultaten van een praktijktest worden binnenkort verwacht), is er sprake van een belangrijke doorbraak. Ten tijde van het verschijnen van het opstellen van dit rapport hebben zij nog geen resultaten beschikbaar om hun beweringen te kunnen onderbouwen.

Nguyen et al. onderzoeken momenteel de toepassingsmogelijkheden van diverse geofysische methoden in de bodemsanering. Voor het bodemonderzoek richt de aandacht zich op de detectie van mogelijke bronnen, mogelijke verspreidingsroutes en bedreigde objecten. Grondradar blijkt hiervoor een belangrijk hulpmiddel te zijn.

Voor de toepassingen van geofysica bij sanering worden tests uitgevoerd naar de mogelijkheid om persluchtinjectie te monitoren en om het bereikte saneringsresultaat te meten.

De onderzoekers concluderen dat met geofysische methoden, met name grondradar, succesvol snelle niet-destructieve onderzoeken in sterk bebouwde gebieden kunnen worden uitgevoerd. Als voordelen ten opzichte van conventionele onderzoeksmethoden worden de grote vlakdekking en de detectie van andere objecten en structuren (mogelijke verspreidingsroutes) in de bodem gezien. Door de ontwikkeling van een data-analysepakket wordt de subjectiviteit bij de interpretatie van de grondradardata verminderd.

4.3.6 *Conclusies literatuuronderzoek verontreinigingen*

Uit het uitgevoerde literatuuronderzoek blijkt het volgende:

Detecteerbaarheid

In bodem en grondwater aanwezige NAPL-verontreinigingen, ionen in het grondwater en vaste stoffen kunnen een door grondradar meetbare anomalie opleveren. Dit is echter niet altijd het geval. Gebleken is dat bijna alle in de literatuur gevonden anomalieën retentiezones betreffen.

De anomalie wordt in het geval van LNAPL's veroorzaakt door een samenspel van complexe processen die elkaar kunnen versterken of opheffen. Om deze reden worden in de literatuur vaak tegengestelde effecten waargenomen (bijvoorbeeld: toename respectievelijk afname van de reflectiesterkte), of worden bepaalde mogelijke anomalieën in het geheel niet waargenomen.

De in het geval van DNAPL's gevonden anomalieën zijn gerelateerd aan een hoge verzadiging aan DNAPL die kenmerkend zijn voor de beginfase van een DNAPL-verontreiniging. In de loop van de tijd nemen de verzadigingen en daarmee de effecten af. De anomalie zal hierdoor kleiner worden.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de meeste door verontreinigingen veroorzaakte afwijkingen in de radargrammen gevonden zijn door vergelijking met 'nulmetingen' (in het geval van DNAPL's), of door voorkennis over de verontreinigingssituatie, waarbij ervan wordt uitgegaan dat een afwijking in het radargram ter plaatse van een bekende verontreiniging wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van die verontreiniging.

- De in de radargrammen zichtbare, aan verontreinigingen toegeschreven aspecten zijn niet uniek te koppelen aan een verontreiniging, maar kunnen evengoed veroorzaakt zijn door veranderingen in de samenstelling van de grond (b.v. sortering e.d.).

Mogelijkheden om verontreinigingscontouren te maken

Een van de 'kanshebbers' voor het uitkarteren van een verontreiniging is het optreden van een schaduwzone in de radargrammen bij een LNAPL-smeerzone (retentiezone). Dit wordt herhaaldelijk, maar lang niet in alle gevallen, waargenomen. De met behulp van de schaduwen gevonden begrenzingen vertonen soms 'enige ruimtelijke samenhang' [Nguyen et al., 1997] met de bij conventioneel onderzoek gevonden contouren. In veel andere gerapporteerde gevallen [b.v. Nash et al., 1997] ontbreken verificatiemogelijkheden.

- Door het ontbreken van een voor verontreinigingen 'unieke' eigenschap, die de specifieke eigenschappen van verontreinigingen in radargrammen kan onderscheiden van de heterogene bodemeigenschappen, zijn er tot nog toe geen publicaties die de grondradarmetingen zonder voorkennis van de verontreinigingssituatie of aanvullende informatie aantoonbaar relateren aan een bodem/grondwaterverontreiniging. Desondanks bestaat bij veel onderzoekers optimisme over de mogelijkheden van grondradar bij verontreinigingsonderzoek.

4.4 **Evaluatie grondradaronderzoeken voor de opsporing van brandstofverontreinigingen**

4.4.1 *Inleiding*

In deze paragraaf worden de resultaten van enkele tot nu toe uitgevoerde grondradaronderzoeken naar de verspreiding van brandstofverontreinigingen geëvalueerd.

De voorliggende evaluatie bestaat uit een vergelijking van de resultaten van grondradaronderzoeken met conventioneel bodemonderzoek en beoogt na te gaan in hoeverre met grondradar bodemverontreinigingen in beeld kunnen worden gebracht en gezoneerd (ingedeeld in retentie- en retardatiezones).

Aangezien met grondradar eigenlijk alleen ervaringen bestaan met het onderzoeken van verontreinigingen met brandstofcomponenten, beperkt de evaluatie zich ook tot locaties van tankstations en mijnbouwlocaties voor olie- en gaswinning.

De gegevensbladen met daarop de 'technische gegevens' van de verontreinigingssituaties, zoals die met het conventionele onderzoek en met het radaronderzoek zijn bepaald, zijn opgenomen in bijlage D.

4.4.2 *Achtergrondinformatie*

Bij deze vergelijking is het van belang te beseffen dat conventioneel bodemonderzoek fundamenteel verschilt van radaronderzoek. Bij conventioneel bodemonderzoek worden de verontreinigingen zelf waargenomen door middel van geurwaarnemingen, olie-op-watertest, PID-metingen en worden grond- en grondwatermonsters in laboratoria specifiek geanalyseerd op de aanwezigheid van vooraf gekozen verontreinigende componenten.

Hoewel ook hierbij storende invloeden van belang kunnen zijn, zijn de technieken al dermate ontwikkeld dat hiervoor kan worden gecorrigeerd of dat deze storingen in ieder geval bekend worden gemaakt.

Grondradar als methodiek voor de opsporing van brandstofcomponenten is een techniek die pas enkele jaren commercieel wordt toegepast en volgens de radarbedrijven nog steeds een sterke mate van ontwikkeling doormaakt. Het fundamentele verschil met conventioneel bodemonderzoek is dat volledig gebruik wordt gemaakt van een indirecte techniek. Kort samengevat komt het erop neer dat een elektromagnetische golf de bodem in wordt gezonden en dat in de bodem gereflecteerde signalen aan het oppervlak weer worden geregistreerd. Feitelijk is de sterkte en frequentieverdeling van het signaal en de tijd tussen het verzenden en ontvangen van het signaal de enige informatie die wordt gemeten. Doordat dit op plaatsen vlak bij elkaar (vaak iedere 10 à 15 cm met onderlinge lijnafstanden van 2 m) wordt gemeten, ontstaat een omvangrijke dataset waaruit eigenschappen van de onderliggende bodem kunnen worden afgeleid.

Bekend is de toepassing van de radartechniek voor het in beeld brengen van de bodemopbouw en het opsporen van vaste objecten in de bodem. De manier, waarop verontreinigingen in beeld kunnen worden gebracht, is niet algemeen bekend. Een Nederlands bedrijf heeft hiervoor echter een methodiek ontwikkeld en hiervoor een patent aangevraagd. Het bedrijf geeft verder geen informatie over de principes van deze methodiek. Het is echter duidelijk dat de metingen met gangbare radarapparatuur kunnen worden uitgevoerd. Het 'geheim' zit in de softwarematige bewerking van de radardata.

In deze evaluatie wordt niet ingegaan op de gehanteerde methodiek, maar alleen op de resultaten van de onderzoeken.

Het betreffende bedrijf geeft aan dat olie-achtige componenten kunnen worden gedetecteerd tot concentraties van 200 à 500 mg/kg in grond en 10 à 50 µg/l in grondwater, waarbij geen onderscheid tussen de twee fasen kan worden gemaakt. Naast minerale olie en vluchtige aromaten (benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen) reageert de methode ook op PAK en vluchtige gechlloreerde koolwaterstoffen.

De rapportage van de onderzoeksresultaten wordt gegeven in kleurentekeningen per dieptelaag. Deze kleuren geven geen absolute verontreinigingsconcentraties, maar geven een 'kans op verontreiniging'. Ieder radaronderzoek is daarom 'geijkt' door middel van resultaten van beschikbaar gesteld conventioneel bodemonderzoek, waarbij de werkelijke concentraties zijn vastgesteld en waarbij is nagegaan in hoeverre het gemeten signaal niet wordt beïnvloed door diverse op de locatie aanwezige storende objecten, zoals luifels, tanks en leidingen. Desondanks zijn in de meeste rapportages geïnterpreteerde verontreinigingscontouren aangegeven.

Er zijn ook andere bedrijven die grondradar als opsporingsmethode hanteren. Deze bedrijven richten zich echter minder op het opsporen van dergelijke olieverontreinigingen, maar meer op de gangbare toepassingen van radaronderzoek. Eén van deze bedrijven heeft op verzoek wel een poging gedaan om met radar verontreinigingen op te sporen. Dit onderzoek (zie bijlage D, gegevensblad 16) is ook in deze evaluatie opgenomen.

4.4.3 *Methodiek en werkwijze*

De evaluatie is gebaseerd op de vergelijking van radaronderzoeken met resultaten van conventionele bodemonderzoeken.

Manier van vergelijking

De vergelijking is op drie verschillende manieren gedaan. Ten eerste is (voor de meeste locaties) een vergelijking op detailniveau uitgevoerd. Hierbij is per locatie voor alle geanalyseerde grond- of grondwatermonsters nagegaan hoe sterk het radarsignaal op dat punt op de betreffende diepte is. Omdat plaatsbepaling tijdens onderzoeken niet altijd volstrekt nauwkeurig is en radarsignalen moeilijk exact aan één punt te relateren zijn, zijn ook de radarsignalen van de punten boven, onder en tot 1 m rondom het boorpunt in de vergelijking meegenomen.

De tweede manier is een vergelijking van verontreinigingsvlekken als geheel. Hierbij is nagegaan of de met radar aangetoonde vlekken ook conventioneel zijn aangetoond en omgekeerd. De exacte plaats van de kernen is hierbij niet zozeer meegenomen; de vergelijking richt zich op de omvang van de vlekken, het dieptetraject waarin deze zich bevindt en de maximale radarsignalen versus de zintuiglijke waarnemingen en geanalyseerde maximale concentraties in grond en grondwater en de diepte waarop deze maxima zich bevinden.

De vergelijking van de verontreinigingssituatie van de gehele locatie met de resultaten van het radaronderzoek is de derde manier van vergelijking. Hierin wordt een korte beschrijving, samenvatting en toelichting gegeven en wordt een meer algemene conclusie gegeven over de overeenkomsten tussen het radaronderzoek en het conventionele bodemonderzoek. Dit levert vaak aanvullende informatie, omdat alle locaties en vergelijkingen bijzonderheden bevatten en die moeilijk op de twee kwantitatieve vergelijkningsniveaus zijn op te nemen.

Zonering

Om de vraagstelling te beantwoorden of onderscheid meetbaar is tussen retentie- en retardatiezones zijn de radarsignalen eveneens getoetst aan de olie-op-watertests. Hierbij wordt als aanname gehanteerd dat zowel een positieve uitslag van de olie-op-watertest als een olieconcentratie groter dan 200 mg/kg (opgegeven detectiegrens voor radar) kenmerkend is voor de retentiezone.

Vergelijkbaarheid verschillende locaties

Om zoveel mogelijk eenheid te verkrijgen in de beschrijving van de verontreinigingssituaties en de vergelijkingen zijn alle evaluaties door dezelfde adviseur bodemonderzoek uitgevoerd.

Beperkingen

In deze evaluatie zijn lang niet alle aspecten meegenomen die van belang zouden kunnen zijn op de interpretatie van de radardata, omdat het doel van de evaluatie hiermee voorbij gestreefd zou worden. Alleen de data die direct van belang zijn om de interpretatie van de radardata te vergelijken met de conventioneel vastgestelde verontreinigingssituatie is derhalve in beschouwing genomen.

Dit betekent dat naast de sterkte van de radarsignalen alleen concentraties van verontreinigende stoffen (minerale olie, vluchtige aromaten, chloride), zintuiglijke waarnemingen (geurwaarneming en olie-op-watertest) en bodemgegevens (bodemsompositie inclusief bijmengingen, drogestofgehalte, grondwaterstand, zuurgraad en elektrisch geleidingsvermogen) zijn geïnventariseerd.

Als uitgangspunt voor de werkelijke situatie is de conventioneel aangetoonde verontreiniging gehanteerd, tenzij hieraan getwijfeld kan worden. Hoewel algemeen bekend is dat ook bodemonderzoek de situatie niet altijd goed weergeeft, is toch gekozen om de bodemonderzoeken als referentie te laten dienen omdat dit in tegenstelling tot radaronderzoek een algemeen geaccepteerde werkwijze is.

Een andere beperking is de hoeveelheid beschikbare data van bodemonderzoek. In tegenstelling tot de radardata, die vrijwel vlakdekkend is, zijn uit bodemonderzoeken alleen gegevens op enkele punten beschikbaar. De vergelijking op detailniveau kan daarom alleen op plaatsen worden gemaakt waar radaronderzoek is uitgevoerd en een boring of peilbuis is geplaatst. Op diverse locaties is radaronderzoek alleen ter plaatse van vloeistofdichte bestrating uitgevoerd, terwijl daar slechts enkele boringen en/of peilbuizen staan. De overlap aan gegevens is daarom vaak gering.

Voor het onderzoek naar de mogelijkheden van radar om een onderscheid te kunnen maken in retentie- en retardatiezones wordt onder andere gebruik gemaakt van de olie-op-watertests. Voor veel onderzoeken zijn deze niet uitgevoerd of gerapporteerd. Aangezien ook niet overall analyses op minerale olie in de grond zijn uitgevoerd, zijn deze vergelijkingsmogelijkheden daarom slechts beperkt.

Locaties

Voor deze vergelijking zijn uit de beschikbare onderzoeken 16 bruikbare onderzoeken geselecteerd. Het betreft allemaal locaties waarop met grondradar en met bodemonderzoek op de conventionele wijze de verontreinigingssituatie in beeld is gebracht.

Het overgrote deel van de beschikbaar gestelde locaties zijn tankstations, in twee gevallen betreft het mijnbouwlocaties waar naar olie en/of gas is geboord. Op alle locaties zijn verontreinigingen met brandstofcomponenten aanwezig. Op diverse locaties zijn ook andere nevenverontreinigingen aanwezig.

Op één na alle radaronderzoeken van deze evaluatie zijn door hetzelfde radarbedrijf uitgevoerd. Dit betreft het bedrijf dat een methodiek voor de opsporing van organische verontreinigingen heeft ontwikkeld en hiermee al de nodige ervaring heeft opgedaan.

Eén van de locaties (zie bijlage D, gegevensblad 16) is tevens door een ander radarbedrijf uitgevoerd. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit bedrijf beduidend minder ervaring heeft met deze toepassing van grondradar.

Bij de evaluatie van enkele onderzoekslocaties blijven nog diverse onduidelijkheden bestaan. Hierbij zijn met het radaronderzoek plaatsen met verontreiniging aangegeven waar geen

conventioneel onderzoek is uitgevoerd. Om de vergelijking ook hier mogelijk te maken, zijn voor die locaties waar dit mogelijk is (waar vloeistofdichte bestrating aanwezig is die kan worden doorboord) aanvullende boringen en peilbuizen geplaatst, bemonsterd en geanalyseerd.

4.4.4 Resultaten

Presentatie van resultaten

In bijlage D is per locatie een gegevensblad opgenomen. Op dit blad zijn de uit de onderzoeken geïnventariseerde relevante gegevens verzameld. Ieder gegevensblad bestaat uit vier delen, te weten:

- Algemene informatie over de locatie, het radaronderzoek, de bodemonderzoeken en een toelichting over de context waarin de verschillende onderzoeken zijn uitgevoerd. Hierin is ook aangegeven met welke voorkennis van de verontreinigingssituatie het radaronderzoek is uitgevoerd.
- Korte beschrijving, samenvatting en conclusie van de vergelijking.
- Detailinformatie op boorpuntniveau. Hierin zijn de beschikbare analysegegevens (soms ook alleen zintuiglijke waarnemingen) direct naast de sterkte van de radarsignalen gezet. Van de radarsignalen is niet alleen de sterkte ter plaatse van het boorpunt zelf, maar ook boven, onder en direct naast het boorpunt weergegeven
- Informatie per verontreinigingsvlek. Voor iedere verontreinigingsvlek zijn de omvang, boven- en onderbegrenzing en de maximale signaalsterkte met diepte van het radaronderzoek en de maximale concentratie, eveneens met diepte, met conventioneel onderzoek vergeleken.

De laatste twee delen beogen een objectief beeld te geven van de vergelijking. Het laatste gedeelte, de informatie per verontreinigingsvlek, kan hieraan echter niet geheel voldoen, omdat het bepalen van de omvang en dieptetraject van de radardata en van het bodemonderzoek een interpretatie blijft. Voor zover mogelijk zijn hier de in de rapporten genoemde getallen weergegeven.

Het tweede deel, de korte beschrijving en samenvatting, is onoverkomelijk enigszins subjectief van aard. Behalve een samenvatting is hierin ook aanvullende informatie opgenomen.

Samenvatting en bespreking van de resultaten

In tabel 2 zijn enkele gegevens van de locaties indicatief samengevat.

De volgende aspecten zijn hierin opgenomen:

- het aantal met zowel radar als conventioneel aangetoonde verontreinigingsvlekken, de alleen met radar aangetoonde vlekken en de alleen met conventioneel bodemonderzoek aangetoonde vlekken; hierbij zijn de vlekken weggelaten die niet met beide methoden zijn onderzocht;
- het aantal retentiezones die met radar zijn aangetoond en het totale aantal aanwezige retentiezones;
- de relaties tussen de twee soorten onderzoek. Voor de sterkte op detailniveau is gebruik gemaakt van de detailinformatie op boorpuntniveau. De relatie in de sterkte op vlek niveau en het dieptetraject is afgeleid uit de informatie per verontreinigingsvlek. Hierbij zijn de relaties gerubriceerd als 'slecht' voor ontbrekende relaties of 'afwijkend' voor grote afwijkingen in het dieptetraject, 'matig' als significant veel afwijkingen voorkomen en 'redelijk' als de afwijkingen beperkt of incidenteel zijn en gebruikt kunnen worden om verontreinigingsvlekken aan te tonen. De kwalificatie 'goed' is gehanteerd als er een duidelijke relatie bestaat.

Tabel 2. Samenvatting van de resultaten.

locatie	aangetoonde vlekken				relaties tussen radar en bodemonderzoek			aanwezige retentiezones	
	radar en conventioneel	alleen conventioneel	alleen radar	totaal	sterkte op detailniveau	sterkte op vlek niveau	dieptetraject	conventioneel aangetoond	met radar aangetoond
Aalsmeer	3	0	1	4	slecht	redelijk	afwijkend	2	2
Alkmaar	0	0	2	2	redelijk	slecht	n.v.t. ¹⁾	0	0
Almkerk	1	0	3	4	slecht	matig/slecht	n.v.t. ¹⁾	1	1
Haarlem	0	1	0	1	slecht	onbekend ²⁾	n.v.t. ¹⁾	-	-
Leidschendam	2	0	2	4	slecht	matig/redelijk	afwijkend	1	1
Leusden	1 ³⁾	0	0	1	matig	redelijk	afwijkend	3	3
Oirschot	1	0	1	2	slecht	redelijk	goed	1	1
Rhoon	2	0	1	3	slecht	matig	matig	1	1
Rijen	1	0	0	1	slecht	redelijk	afwijkend	1	1
Rijsenhout	1	1	2	4	slecht	matig	n.v.t. ¹⁾	1	0
Soest	3	0	0	3	redelijk	goed	matig	3	3
Somerse	0	0	0 ⁴⁾	0	redelijk	redelijk	n.v.t. ¹⁾	0	0
Tilburg	1	0	2	3	matig	matig/redelijk	goed	1	1
Tjuchem	3	0	1	4	slecht	redelijk	n.v.t. ¹⁾	3	3
Tusschenklappen 1	2	0	1	3	slecht	matig	matig	1	1
Tusschenklappen 2	2	0	1	3	matig	matig	n.v.t. ¹⁾	1	1
totaal	23	2	17	42				20	19

- 1) niet van toepassing, omdat vergelijking niet mogelijk is;
- 2) om hierover een uitspraak te kunnen doen zijn onvoldoende gegevens beschikbaar;
- 3) de met radar als 5 vlekken geïnterpreteerde verontreiniging is tijdens bodemonderzoek als 1 vlek beschouwd;
- 4) het radaronderzoek maakt hier wel melding van 3 vlekken, maar geeft tevens aan dat dit waarschijnlijk uiterst geringe verontreinigingen betreft.

Verontreinigingsvlekken

In tabel 2 is af te lezen dat vrijwel alle verontreinigingsvlekken en ook op één na alle retentiezones met grondradar zijn aangetoond. De mate van verontreiniging, zoals die met grondradar is aangetoond, is in één geval 'goed' en in één geval 'slecht' te noemen. Voor de meeste locaties is de relatie tussen het radarsignaal en de concentraties 'matig' of 'redelijk' genoemd. Dit betekent dat in vrijwel de helft van de gevallen het radaronderzoek niet bruikbaar is om de verontreinigingssituatie te beschrijven.

Aangezien slechts in twee gevallen een verontreiniging met radar niet is aangetoond, is de methode wel geschikt om plaatsen aan te geven waar verontreinigingen aanwezig *kunnen* zijn (zoals het radarbedrijf dat de meeste onderzoeken heeft uitgevoerd zelf ook aangeeft). Een gebleken probleem hierbij is dat het dieptetraject en de plaats waar de verontreiniging het sterkste is door het radaronderzoek regelmatig niet goed wordt aangegeven en daarmee de verificatie door middel van bodemonderzoek bemoeilijkt.

Een ander nadeel van radaronderzoek is dat relatief vaak een 'kans op verontreiniging' wordt aangegeven, terwijl in meer dan een derde van de gevallen geen verontreiniging aanwezig is. Bij conventioneel bodemonderzoek met radaronderzoek als (aanvullende) voorinformatie wordt hierdoor regelmatig meer onderzoek uitgevoerd dan nodig zou zijn.

Retentiezones

Op basis van de gegevens in tabel 2 lijkt radar op het eerste gezicht een geschikte methode om de retentiezone aan te tonen. Op geen enkele locatie kan echter worden aangetoond dat de radar specifiek op de retentiezone reageert. Zeker op boorpuntniveau valt het op dat op plaatsen waar een oliefilm of een drijfslag is aangetroffen slechts in circa de helft van de gevallen een

significants verhoogd radarsignaal is gemeten. Het tegengestelde, met radar aantonen dat er geen retentiezone aanwezig is, kan niet goed worden onderzocht. De reden hiervoor is dat geen van de conventionele bodemonderzoeken gericht is op het in kaart brengen van retentiezones. De intensiteit van de handboringen, de olie-op-watertests en de grondanalyses is te klein om conclusies over de afwezigheid van deze zones op te kunnen baseren.

Omdat uiteraard wel enig inzicht in de verontreinigingssituatie ontstaat, kan hierover toch iets worden opgemerkt.

De derde getallenkolom uit tabel 2 (alleen met grondradar aangetoonde vlekken) geeft aan dat regelmatig met radar 'verdachte zones' zijn aangetoond waar met conventioneel onderzoek geen verontreinigingen (retentie- of retardatiezones) zijn vastgesteld.

Dat wil zeggen dat binnen de bovengenoemde onzekerheid van het onderzoek redelijkerwijs kan worden geconcludeerd dat de uit radarsignalen bepaalde indicaties voor verontreinigingen niet specifiek (alleen) door retentiezones worden veroorzaakt.

4.4.5 *Conclusies evaluatie grondradaronderzoeken voor de opsporing van brandstofverontreinigingen*

Uit de evaluatie komen de volgende algemene conclusies naar voren:

1. met grondradar zijn bodemverontreinigingen met brandstofcomponenten in beeld gebracht;
2. niet alle als verontreiniging geïnterpreteerde radarsignalen kunnen met conventioneel onderzoek als verontreiniging (retentie- en/of retardatiezone) worden aangetoond;
3. niet alle conventioneel aangetoonde verontreinigingen zijn met grondradar gedetecteerd;
4. de interpretatie van radarsignalen is niet altijd op alle plaatsen mogelijk in verband met storingen tijdens de metingen;
5. de door radaronderzoeken aangegeven verticale begrenzingsen wijken regelmatig af van de conventioneel vastgestelde situatie; zowel voor de bovenbegrenzing als voor de onderbegrenzing wordt vaak een beduidend grotere diepte aangegeven;
6. de relatie tussen de sterkte van de radarsignalen en de aangetoonde concentraties is uiterst variabel;
7. er is geen eenduidige relatie aangetoond tussen de retentiezone en de radarsignalen. Of deze relatie inderdaad niet bestaat kan niet worden vastgesteld, omdat de onderzoeken uit deze evaluatie niet zijn uitgevoerd met als doel het vaststellen van retentiezones.

De eerste conclusie is positief. Hierbij moeten echter ook direct alle andere conclusies in beschouwing worden genomen. Dit betekent dat gebruik van alleen grondradar, zonder inzet van andere (conventionele) methoden, niet afdoende is. De methode is geschikt om plaatsen aan te geven waar zich waarschijnlijk de sterkste verontreinigingen bevinden en geeft een indicatie van de horizontale en verticale omvang. De mate van verontreiniging en de verificatie van de radarinterpretatie moet nog met conventioneel onderzoek worden gedaan. Daarnaast is het voorsnog raadzaam om ook andere uit historisch onderzoek verdachte plaatsen conventioneel te onderzoeken.

Om deze conclusies in het juiste perspectief te kunnen zien, moet ook worden opgemerkt dat 'conventionele bodemonderzoek' weliswaar algemeen wordt geaccepteerd, maar niet altijd de verontreinigingssituatie juist weergeeft.

4.5 **Veldmetingen 'Terschelling': grondradar en bodemverontreinigingen**

4.5.1 *Inleiding*

Op en nabij een met organische stoffen verontreinigde locatie op Terschelling zijn door T&A Radar in maart 1997 grondradarmetingen uitgevoerd met het doel na te gaan of de verontreiniging met radarmetingen meetbaar of zichtbaar is. Het betreft hier een drijfslag (LNAPL),

waarvan de verbreiding is vastgesteld aan de hand van een aantal handboringen. De organische verontreiniging drijft op de grondwaterspiegel, die zich op een diepte van ongeveer 0,5 m-mv bevindt. De grond bestaat uitzandig materiaal.

Profielmetingen zijn uitgevoerd met een pulseEKKO 1000 systeem langs een zevental korte (< 10 m) profiellijnen. De metingen zijn uitgevoerd met antennefrequenties van 450 en 900 MHz; langs één profiel zijn tevens opnamen met 225 MHz uitgevoerd. Naast profielmetingen zijn op twee locaties CMP-sonderingen uitgevoerd met 450 en 900 MHz antennes.

Naast een visuele inspectie van de radarbeelden en snelheidsanalyses van CMP-metingen door T&A Radar heeft NITG-TNO de mogelijke invloed nagegaan van de verontreiniging op de frequentiespectra van de radaropnamen.

Het rapport van het grondradaronderzoek is opgenomen als bijlage E en het rapport van het onderzoek naar de mogelijke verandering in de frequentiespectra is opgenomen als bijlage F.

4.5.2 *Resultaten en conclusies veldmetingen Terschelling*

Op basis van de veranderingen in het reflectiepatroon van drie profielen kan het volgende worden geconcludeerd: er is in twee profielen (profiel 3 en 6) enige correlatie en in profiel 4 geen correlatie met de tot nu toe bekende resultaten van het verkennend bodemonderzoek met betrekking tot de aanwezige verontreiniging. De waargenomen aspecten (zwakke horizontale reflecties) zijn zo zwak, dat ze zonder voorkennis van de verontreinigingssituatie niet in verband zouden zijn gebracht met een LNAPL-verontreiniging.

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde snelheidsmetingen kan het volgende worden geconcludeerd: boven de grondwaterspiegel zijn aanwijzingen gevonden voor een verschil in elektromagnetische golfsnelheid tussen de verontreinigde grond en de schone grond, wat veroorzaakt kan zijn door de aanwezige verontreiniging. Onder de grondwaterspiegel zijn geen aanwijzingen gevonden voor een onderscheid in elektromagnetische golfsnelheid tussen schone en verontreinigde grond. Deze 'gevonden aanwijzingen' zijn echter zo zwak, dat zij zonder voorkennis van de verontreinigingssituatie niet in verband zouden zijn gebracht met een LNAPL-verontreiniging.

Op basis van de analyses van de frequentiespectra van geselecteerde traces langs de radarprofiellijnen kan het volgende worden geconcludeerd: de frequentiespectra tonen geen significante verschillen tussen verontreinigde en schone delen van de profielen. Een toename van de aanwezigheid van hogere frequenties in de radarreflecties in de verontreinigde zones is niet waargenomen.

4.6 **Conclusies onderzoekspunt retentie/retardatie**

Ten behoeve van dit onderzoekspunt is een aantal deelonderzoeken uitgevoerd:

- literatuuronderzoek;
- vergelijking van radaronderzoek met bodemonderzoek;
- veldmetingen op een met LNAPL verontreinigde locatie op Terschelling;
- analyse van de frequentiespectra van op Terschelling gemeten data.

De resultaten en conclusies voor deze deelonderzoeken zijn al eerder in dit hoofdstuk behandeld.

In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre de oorspronkelijke vragen voor dit onderzoekspunt verontreinigingen zijn beantwoord.

Deze vragen zijn:

- A Kan een aantoonbare relatie worden gelegd tussen de waargenomen en/of berekende anomalieën in de radardata en de verschillende te onderscheiden zones in een verontreiniging (b.v. retentie/retardatiezone).
- B Zijn de met behulp van radarmetingen bepaalde verontreinigingscontouren vergelijkbaar met, of komen ze overeen met de bij conventioneel onderzoek gevonden verontreinigingscontouren.

Literatuuronderzoek

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat vraag A slechts deels beantwoord kan worden en dat geen duidelijkheid verschaft kan worden over vraag B:

- Uit de beschikbare literatuur blijkt dat bijna alle indicaties voor verontreinigingen, die uit radar-signalen zijn afgeleid veroorzaakt worden door retentiezones.
- Helaas blijkt ook dat door de complexe manier waarop verontreinigingen in de bodem aanwezig kunnen zijn, deze indicaties niet altijd, en niet altijd op dezelfde manier worden waargenomen.
- Bovendien zijn de indicaties in het radarsignaal vaak zeer klein ten opzichte van de signaalveranderingen door de geologische of bodemkundige heterogeniteit van de bodem.
- Het hoofdprobleem bij het herkennen van bodemverontreinigingen met grondradar is dat er **geen unieke eigenschappen** bekend zijn in de literatuur die een verontreinigingsanomalie van bijvoorbeeld een lithologische anomalie kunnen onderscheiden.

Vergelijking van radaronderzoek met bodemonderzoek

Uit de evaluatie blijkt dat vraag A en B slechts deels beantwoord kunnen worden:

- Grondradarmetingen zijn geschikt om plaatsen aan te geven waar zich waarschijnlijk sterke verontreinigingen bevinden en om een indicatie te geven van de horizontale en verticale omvang. Voor de bepaling van de mate van verontreiniging en de verificatie van de radarinterpretatie moet nog conventioneel onderzoek worden uitgevoerd. Daarnaast is het vooralsnog raadzaam om ook andere uit historisch onderzoek verdachte plaatsen conventioneel te onderzoeken

Veldmetingen Terschelling + frequentie-analyse

Het op Terschelling uitgevoerde veldwerk en de frequentie-analyse van deze data leverde geen resultaten op waarmee vraag A en B bevestigd of ontkend kunnen worden.

Go/no-go-momenten

Het voor het onderzoekspunt verontreinigingen uitgevoerde onderzoek heeft de onzekerheid over de toepassing van grondradar bij bodemonderzoek niet kunnen wegnemen.

Bij dit onderzoek is met een 'retentie- en retardatie'-bril gekeken naar bodemverontreinigingen en grondradar. Uit de literatuur blijkt dat bijna alle in radargrammen waargenomen verontreinigingsindicaties gerelateerd zijn aan het voorkomen van een retentiezone.

Uit de literatuur, en uit de radarmetingen op Terschelling, blijkt dat deze indicaties niet zonder meer bij iedere radarmeting kunnen worden aangetroffen en worden herkend.

De evaluatie van reeds uitgevoerde radaronderzoeken voor het bepalen van de verontreinigings-situatie leverde soms wel een relatie tussen de retentiezone en de radarsignalen, maar deze relatie kan niet eenduidig worden genoemd.

Omdat echter noch het conventionele bodemonderzoek, noch het in het verleden uitgevoerde radaronderzoek specifiek gericht is op het herkennen van retentiezones, is het niet mogelijk gebleken om de relaties tussen verontreinigingsindicaties en retentiezones eenduidig vast te kunnen leggen.

Uit de literatuur blijkt dat de meest belovende richting voor vervolgonderzoek op het gebied van grondradar en bodemverontreinigingen toegespitst zal zijn op het aantonen van retentiezones. De resultaten van de uitgevoerde evaluatie en de metingen op Terschelling geven geen aanleiding om dit beeld bij te stellen.

De hoofdproblemen bij het aantonen van retentiezones met grondradar zullen zijn dat er **geen unieke eigenschappen** bekend zijn in de literatuur die een verontreinigingsanomalie van bijvoorbeeld een lithologische anomalie kunnen onderscheiden en dat door de complexe manier waarop verontreinigingen in de bodem aanwezig kunnen zijn, deze indicaties niet altijd, en niet altijd op dezelfde manier, worden waargenomen.

Samenvattend kan worden gesteld dat, indien radarmetingen worden uitgevoerd op een locatie waar retentiezones aanwezig zijn:

- deze soms wel, maar niet altijd in het radargram tot uiting komen;
- de door retentiezones veroorzaakte veranderingen in het radarsignaal mogelijk niet door de waarnemer worden opgemerkt;
- de door retentiezones veroorzaakte veranderingen in het radarsignaal vaak niet te onderscheiden zijn van veranderingen die door de ruimtelijk-variabele samenstelling van de ondergrond worden veroorzaakt;
- indien in het radargram verontreinigingsindicaties worden aangetroffen, dit op de aanwezigheid van een retentiezona wijst.

Bij deze conclusies moet worden opgemerkt dat het algemeen geaccepteerde 'conventionele bodemonderzoek' ook niet altijd de verontreinigingssituatie juist weergeeft. Grondradar als onderzoeksmethode bij milieuonderzoek kan belangrijke voordelen leveren ten opzichte van conventioneel onderzoek en is momenteel nog sterk in ontwikkeling. Aangezien de vooruitgang in de conventionele onderzoeksmethoden verhoudingsgewijs minder snel gaat, is het denkbaar dat grondradaronderzoek in de toekomst een mate van zekerheid kan leveren die vergelijkbaar is met de zekerheid van bodemonderzoek.

Een **go-beslissing** lijkt hier op zijn plaats, zeker gezien de voortgang in de ontwikkeling van grondradar en de goede kansen die dit lijkt te bieden. Over de nadere invulling van het onderzoeksprogramma wordt een discussie zinvol geacht.

VERKLARENDE WOORDENLIJST GRONDRADAR

Airwave

De golf bij grondradar die door de lucht van de zender naar de ontvanger loopt. Deze golf verplaatst zich met een snelheid van 0,3 m/ns.

Anomalie

Afwijking, onregelmatigheid. Deze term wordt in de geofysica gebruikt voor de signaalverandering die in de metingen optreedt door de aanwezigheid van het te detecteren object of de te detecteren eigenschap.

Bright spot

Reflectie met ongewoon hoge sterkte.

CMP

Common MidPoint meting.

Diëlektrische constante

Grootheid die aangeeft in welke mate ladingen kunnen worden gescheiden in een medium.

DiffRACTIE

Als een golf een object tegenkomt dat kleiner is dan $\frac{1}{4}$ van de golflengte van het signaal wordt de golf niet gereflecteerd, maar verstrooid.

DiffRACTIEHYPERBOOL

In de radargrammen zichtbare hyperbool die door diffractie aan een kabel, steen of iets dergelijks is veroorzaakt.

DNAPL

Dense Non Aqueous Phase Liquid: een vloeistof zwaarder dan water die zeer slecht met water mengt, bijvoorbeeld tri en per. In de grond zakken deze stoffen door dichtheidsstroming vaak diep weg.

Elektromagnetische straling

Zichtbaar licht, radiogolven, gammastraling, radargolven enzovoorts.

EM

Afkorting voor ElektroMagnetische metingen. Hierbij wordt met behulp van een zendspoel en een ontvangspoel aan het aardoppervlak door middel van elektromagnetische inductie een beeld verkregen van de elektrische geleiding van de ondergrond; heeft niets te maken met elektromagnetische golven, zoals radargolven en licht.

Filteren

Het bewerken van de gemeten data met (softwarematige) filters waarmee getracht wordt storingssignalen te verwijderen en de signaal-ruisverhouding te verbeteren. Filteren maakt een belangrijk deel uit van een geofysisch onderzoek.

Geofysica

De natuurkunde van de aarde: houdt zich bezig met de fysische eigenschappen van de aarde. De geofysica probeert door middel van het meten van fysische eigenschappen van de ondergrond een beeld van de opbouw en samenstelling van de aarde op te stellen.

GPR

Afkorting voor Ground Penetrating Radar (Nederlandse term: grondradar).

Interpreteren

Het afleiden van gegevens over de opbouw en de ligging van objecten uit meetgegevens of diepteprofielen. Het interpreteren van ruwe, of slechts gedeeltelijk bewerkte data is een specialistisch werk. In de data kunnen allerlei stoorsignalen aanwezig zijn die door de leek niet herkend worden en die tot een foutieve interpretatie kunnen leiden.

Inverteren

Term uit de geofysica die het omrekenen van geofysische metingen naar een diepteprofiel behelst.

IP

Induced Polarization: door elektrochemische processen in de bodem duurt het enige tijd voordat de grond reageert op het aanleggen/verwijderen van een elektrisch veld. Door de verandering van de elektrische spanning te meten, kunnen eigenschappen van de bodem worden onderzocht.

LNAPL

Light Non Aqueous Phase Liquid: een vloeistof lichter dan water die zeer slecht met water mengt, bijvoorbeeld olie en kerosine. In de grond neigen deze stoffen tot het vormen van drijflagen op de grondwaterspiegel.

Migreren

Het in een profiel rekenkundig 'terugschuiven' van diffracties naar het punt waar zij veroorzaakt zijn.

NAPL

Algemene term voor vloeistoffen die zeer slecht met water mengen (Non Aqueous Phase Liquid).

Permittiviteit (relatieve)

Andere term voor diëlektrische constante.

Radargram (tijdsectie)

Weergave van radarmetingen langs een profiel door de geregistreerde reflecties naast elkaar te plaatsen. Horizontaal staat in het radargram de positie langs de profiellijn uitgezet, verticaal de reflectiesterkte als functie van de tijd.

Reflectie

Het terugkaatsen van een deel van een uitgezonden signaal. Bij grondradarmetingen wordt reflectie veroorzaakt door verschillen in diëlektrische constante in de ondergrond.

Ringing (wow)

Elektrisch geleidende voorwerpen (b.v. een stuk ijzer) in de buurt van de antennes van de grondradar kunnen ongewild als antenne gaan dienen tijdens een radarmeting. Het resulterende regelmatige stoorsignaal staat bekend als wow of ringing.

Seismiek

Geofysische meettechniek waarbij de bodemopbouw in kaart wordt gebracht door het meten van reflecties van geluidsgolven. Door het gebruik van reflecties zijn er tussen seismiek en grondradar veel analogieën, zowel in de veldtechnieken als in de processing en interpretatie. Doordat verschillende fysische eigenschappen worden gemeten (seismiek: dichtheidsverschillen, grondradar: verschillen in diëlektrische constante) en beide methoden gevoelig zijn voor andere soorten storingsbronnen zijn er toch belangrijke verschillen tussen beide methoden.

Tijdsectie (radargram)

Weergave van radarmetingen langs een profiel door de geregistreerde reflecties naast elkaar te plaatsen. Horizontaal staat in de tijdsectie de positie langs de profiellijn uitgezet, verticaal de reflectiesterkte als functie van de tijd.

Tomografie

Een methode om een beeld te krijgen van een object door middel van metingen door het object heen. Bij radartomografie worden meestal metingen uitgevoerd tussen twee boorgaten, met de zendantenne in één boorgat en de ontvangstantenne in het andere boorgat.

Wow (ringing)

Elektrisch geleidende voorwerpen (b.v. een stuk staal) in de buurt van de antennes van de grondradar kunnen ongewild als antenne gaan dienen tijdens een radarmeting. Het resulterende regelmatige stoorsignaal staat bekend als wow of ringing.

LITERATUUR

Barber, W.B. en R. Morey, 1994.

Radar detection of thin layers of hydrocarbon contamination.

Proceedings of the 5th international conference on ground penetrating radar, Kitchener, Ontario, 1994.

Benson, A.K., 1995.

Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities.

Journal of applied Geophysics 33, 1995.

Brewster, M.L., A.P. Annan en J.D. Redman, 1992.

Ground penetrating radar monitoring of DNAPL migration in a sandy aquifer.

Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.

Brewster, M.L. en A.P. Annan, 1994.

Ground penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar.

Geophysics, Vol 59, No 8, augustus 1994.

Brewster, M.L., A.P. Annan, J.P. Greenhouse, B.H. Kueper, G.R. Olhoeft, J.D. Redman en K.A. Sander, 1995.

Observed migration of a controlled DNAPL release by geophysical methods.

Ground water, Vol 33, No 6, 1995.

Campbell, D.L., J.E. Lucius, K.J. Ellefsen en M. Deszcz-pan, 1996.

Monitoring of a controlled LNAPL spill using ground penetrating radar.

Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Keystone, Colorado, 1996.

CUR, 1996.

Geofysische technieken voor grondonderzoek.

CUR-rapport 182, Gouda, februari 1996.

CUR/NOBIS, 1996.

Biosparging and bioventing. Expert support system.

CUR/NOBIS-rapport 95-1-13, Gouda, oktober 1996.

Daniels, J.J., 1986.

Fundamentals of ground penetrating radar.

In: Investigations in geophysics no. 5: geotechnical and environmental geophysics, society of exploration geophysicists, 1986.

Daniels, J.J., R. Roberts en M. Vendl, 1995.

Ground penetrating radar for the investigation of liquid contaminants.

Journal of applied Geophysics 33, 1995.

- DeRyck, S.M., J.D. Redman en A.P. Annan, 1993.
Geophysical monitoring of a controlled kerosene spill.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, San Diego, California, 1993.
- Fechner, T. en U. Yaramanci, 1996.
Influence of complex dielectric properties on the characteristics of radar reflections.
European Journal of environmental and engineering geophysics 1, 1996.
- Finci, A.G., M. van Benthem en R. Goldflam, 1997.
Use of borehole radar for air sparging operations monitoring.
(Note #806), 1997.
- Gajdos, V. en V. Král, 1995.
Influence of hydrocarbon pollution to soil conductivity.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Orlando, Florida, 1995.
- Gilson, E.W., J.D. Redman, J. Pilon en A.P. Annan.
Near surface applications of borehole radar.
Sensors & Software PEMD #126.
- Grumman Jr, D.L. en J.J. Davies, 1995.
Experiments on the detection of organic contaminants in the vadose zone.
Journal of environmental and engineering geophysics, Vol 0, No 1, 1995.
- Kueper, B.H., S. Feenstra, M.O. Rivett en J.A. Cherry, 1992.
A series of controlled field experiments to study DNAPL behaviour: implications for site remediations.
Hazmat international, hazardous materials and environmental management conference, 1992.
- Kutrubes, D.L., K. DuBois en T. Fenner, 1992.
GPR at a superfund (Hazardous waste) site, Vermont, New Hampshire, USA.
Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.
- Liu, L. en Y. Quan, 1997.
GPR attenuation tomography for detecting DNAPLS.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Reno, NV, USA, 1997.
- Maxwell, M. en J. Schmock, 1995.
Detection and mapping of a LNAPL plume using GPR: A case study.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Orlando, Florida, 1995.
- Monier-Williams, M., 1995.
Properties of light non-aqueous phase liquids and detection using commonly applied shallow sensing techniques.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Orlando, Florida, 1995.

Nash, M.S., E. Atekwana en W.A. Sauck, 1997.
Geophysical investigation of anomalous conductivity at a hydrocarbon contaminated site.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Reno, NV, USA, 1997.

Nguyen, V.T., M.J. Quick, A.S. Eriksen, S. Booth, D. van der Roest, A. Wagebaert, W. AL-Nuamy, M. Nakhkash, D. Zhang en Y. Huang, 1997.
An evaluation of geophysical techniques to measure sub-surface hydrocarbon contamination at a disused fuel distribution depot.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Reno, NV, USA, 1997.

Olhoeft, G.R., 1986.
Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity.
Proceedings of the NWWA/API conference Petroleum hydrocarbons in ground water-prevention, detection and restoration, Houston, TX, 1986.

Redman, J.D. en A.P. Annan, 1992.
Dielectric permittivity monitoring in a sandy aquifer following the controlled release of a DNAPL.
Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.

Redman, J.D., S.M. DeRyck en A.P. Annan, 1994.
Detection of LNAPL pools with GPR: theoretical modelling and surveys of a controlled spill.
Proceedings of the 5th international conference on ground penetrating radar, Kitchener, Ontario, 1994.

Roberts, R., J.J. Daniels en M. Vendl.
Seasonal variations and ground penetrating radar data repeatability.
SEG Proceedings E/G1.2.

Geraadpleegde literatuur

Baumgardt, D., Z. Der, J. Carney, M. Maxon en A. Bell, 1995.
Geological/geophysical modeling of seismic/GPR tomographic imaging for environmental applications.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Orlando, Florida, 1995.

Benson, A.K., 1992.
Integrating ground penetrating radar and electrical resistivity data to delineate groundwater contamination.
Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.

Börner, F., M. Gruhne en J. Schön, 1993.
Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range.
Geophysical prospecting Vol 41, No 1, januari 1993.

Collins, M.E., 1992.

Soil taxonomy: a usefull guide for the application of ground penetrating radar.

Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.

Endres, A.I. en J.D. Redman, 1993.

Modelling the electrical properties of porous rocks and soils containing immiscible fluids.

Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, San Diego, California, 1993.

Feenstra, S. en J.A. Cherry, 1988.

Subsurface contamination by dense non-aqueous phase-liquid (DNAPL) chemicals.

Proceedings of the international Groundwater Symposium, Halifax, Nova Scotia, 1988.

Fruhwith, R.K. en R. Schmöller, 1996.

Some aspects on the estimation of electromagnetic wave velocity.

Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, Sendai, Japan, 1996.

Hänninen, P., 1992.

Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations.

Geological survey of Finland, Bulletin 361, 1992.

Jol, H.M., 1995.

Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity.

Geophysical prospecting 43, 1995.

Knoll, M.D., R. Knight en E. Brown, 1995.

Can accurate estimates of permeability be obtained from measurements of dielectric properties?

Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Orlando, Florida, 1995.

Lawton, D.C., H.M. Jol en D.G. Smith, 1994.

Ground penetrating radar surveys for near-surface characterisation: examples from the Canada Creosote site, Calgary, 1994.

Proceedings of the 5th international conference on ground penetrating radar, Kitchener, Ontario, 1994.

Mazáč, O., L. Benex, I. Landra en A. Maskova, 1986.

Determination of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods.

In: Investigations in geophysics no. 5: geotechnical and environmental geophysics, society of exploration geophysicists, 1986.

Nicollin, F. en W. Kofman, 1994.

Ground penetrating radar sounding of a temperate glacier; modelling of a multilayered medium.

Geophysical prospecting Vol 42, No 7, 1994.

- Nobes, D.C. en M.J. Armstrong, 1994.
Delimitation of a landfill leachate plume using shallow electromagnetic and ground penetrating radar surveys.
Technical program, expanded abstracts with author's biographies, SEG, Los Angeles, 1994.
- Olhoeft, G.R., 1985.
Low-frequency electrical properties.
Geophysics, Vol 50, No 12, 1985.
- Olhoeft, G.R., 1987.
Electrical properties from 10^{-3} to 10^9 Hz.
Physics and chemistry, proceedings of the 2nd international symposium on the physics and chemistry of porous media, Ridgefield, CT, 1987.
- Olhoeft, G.R., 1992.
Geophysical detection of hydrocarbon and organic chemical contamination.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, 1992.
- Olhoeft, G.R. en D.E. Capron, 1994.
Petrophysical causes of electromagnetic dispersion.
Proceedings of the 5th international conference on ground penetrating radar, Kitchener, Ontario, 1994.
- Olhoeft, G.R., 1994.
Geophysical observation of geological, geophysical and geochemical heterogeneity.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Boston, Massachusetts, 1994.
- Overmeeren, R.A. van, 1992.
Georadar: een nieuwe geofysische techniek voor grondwaterverkenning.
H₂O, 1993.
- Overmeeren, R.A. van, 1994.
Georadar for hydrogeology.
First Break Vol 12, No 8, augustus 1994.
- Overmeeren, R.A. van, 1996.
Radar facies of unconsolidated sediments in the Netherlands: a radar stratigraphic interpretation method for geohydrology.
Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, Sendai, Japan, 1996.
- Peters Jr, L., M. Poirier en M. Barnes, 1992.
General ground penetrating radar (GPR) concepts.
Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.

- Porokhovoï, S., J. du Mouza en M. Reiter, 1996.
Dielectric properties of polluted soils as a potential tool to detect low level organic pollution in unsaturated soils.
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Keystone, Colorado, 1996.
- Powers, M.H. en G.R. Olhoeft 1996.
Modeling the ground penetrating radar response of leaking, buried pipes.
Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, Sendai, Japan, 1996.
- Redman, J.D., E.W. Gilson, M. Kunert, J. Pilon en A.P. Annan, 1996.
Borehole radar for environmental applications: selected case studies.
To be presented at GPR'96, Sendai, Japan, 1996.
- Roest, P.B. van der, A. Baan en D.J.S. Brassler, 1995.
Grondradar effectief instrument bij het lokaliseren van bodemverontreiniging.
Bodem, nr. 3, augustus 1995.
- Roest, P.B. van der, D.J.S. Brassler, A.P.J. Wagenbaert en P.H. Stam, 1996.
Investigating hydrocarbon contamination using ground penetrating radar.
Hazwaste World Superfund XVII, Washington, oktober 1996.
- Roest, P.B. van der, D.J.S. Brassler, A.P.J. Wagenbaert en P.H. Stam, 1997.
Zeroing in on hydrocarbons.
Environmental protection, mei 1997.
- Saarenketo, S., 1996.
Electrical properties of water in soils.
Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, Sendai, Japan, 1996.
- Siggins, A.F., 1992.
Limitations of shallow cross-hole radar investigations.
Proceedings of the Fourth international conference on ground penetrating radar, Rovaniemi, Finland 1992, Geological survey of Finland, Special paper 16.
- Soininen, H. en H. Vanhala, 1996.
Mapping oil contamination in glacial sediments by the spectral induced polarization method
Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems, Keystone, Colorado, 1996.
- Sutinen, R., 1992.
Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar.
Geological survey of Finland, Bulletin 358, 1992.
- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff en D.A. Keys, 1986.
Applied Geophysics, Cambridge university press, 1986.

- Theimer, B.D., D.C. Nobes en B.G. Warner, 1993.
A study of the geoelectric properties of peatlands and their influence on ground penetrating radar surveying.
Geophysical prospecting Vol 42, No 3, april 1993.
- Tillard, S., 1994.
Radar experiments in isotropic and anisotropic geological formations (granites and schists).
Geophysical prospecting Vol. 42, No 6, 1994.
- Ulrych, T.Y., 1994.
In search of plumes, a ground penetrating radar odyssey in Brazil.
Technical program, expanded abstracts with author's biographies, SEG, Los Angeles, 1994.
- Vanhala, H., H. Soininen en I. Kukkonen, 1992.
Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment.
Geophysics, Vol 57, No 8, 1992.
- Vanhala, H. en H. Soininen, 1995.
Laboratory techniques for measurement of spectral induced polarization response of soil samples.
Geophysical prospecting Vol 43, No 5, 1995.
- Wensink, W.A., 1993.
Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1 - 3000 MHz.
Geophysical prospecting 41, 1993.
- Young, J.D.R. en L. Peters jr, 1996.
A brief history of gpr fundamentals and applications.
Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, Sendai, Japan, 1996.

BIJLAGE A

**TECHNISCHE SPECIFICATIES VAN VEEL GEBRUIKTE GROND-
RADARELEMENTEN EN BOORGATRADARSYSTEMEN**

BIJLAGE B

**RAPPORT: 'BODEMRADARONDERZOEK TER MONITORING VAN EEN
IN-SITU PERSLUCHTINJECTIESYSTEEM'
(T&A RADAR, PROJECTNUMMER 0696-GPR324\BRO, JULI 1996)**

BIJLAGE C

**RAPPORT: 'GRONDRADARMODELLERING VOOR PERSLUCHTMONITORING'
(NITG-TNO, TNO-RAPPORT NITG 97-257-B, NOVEMBER 1997)**

BIJLAGE D

GEGEVENSBLADEN EVALUATIE GRONDRADARONDERZOEKEN

BIJLAGE E

**RAPPORT: 'RETENTIE/RETARDATIE: BODEMRADARONDERZOEK AAN DE
HEERENWEG TE TERSCHELLING'
(T&A RADAR, PROJECTNUMMER T&A-NOBIS GPR2, MEI 1997)**

BIJLAGE F

**RAPPORT: 'FREQUENTIE-SPECTRA VAN GEORADARMETINGEN UITGEVOERD
OP EEN VERONTREINIGDE LOCATIE OP TERSCHELLING'
(NITG-TNO, TNO-RAPPORT NITG 97-63 (B), MAART 1997)**