

SV-416

Elektrische weerstandstomografie voor het
opsporen van DNAPL's

eindrapportage

B.J.M. Goes (TNO-NITG)
J.A.C. Meekes (TNO-NITG)
P.A.A. Verhaagen (Grontmij)
H. Booi (Provincie Drenthe)
M. Stolzenburg (Gemeente Utrecht)

mei 2003

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

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 SKB.

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, "©"Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's", mei 2003, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

SKB 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 SKB 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 SKB 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 SKB.

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, "©"Electrical resistance tomography for the tracing of DNAPL's", May 2003, SKB, Gouda, The Netherlands."

Liability

SKB 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 SKB 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 SKB and/or the contributors.

Titel rapport

Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's

Eindrapportage

SKB rapportnummer

SV-416

Project rapportnummer

SV-416

Auteur(s)

B.J. M. Goes
J.A.C. Meekes
P.A.A. Verhaagen
H. Booi
M. Stolzenburg

Aantal bladzijden

Rapport: 48
Bijlagen: 46

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

TNO – Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (B.J.M. Goes, 030-2564868)
Grontmij Advies & Techniek BV (P.A.A. Verhaagen, 030-6344617)
Gemeente Utrecht Bureau Bodem (M. Stolzenburg, 030-2864715)
Provincie Drenthe-productgroep Bodem (H. Booi, 059-2365874)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

In het ERT-DNAPL project zijn op verontreinigde locaties in Utrecht en Drenthe geo-elektrische metingen uitgevoerd van boorgat naar boorgat (ERT). De grote voordelen van ERT-metingen, ten opzichte van geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak, zijn: dat de metingen een betere resolutie hebben en dat de metingen ook op locaties kunnen worden uitgevoerd met bijvoorbeeld een verhard oppervlak of met kabels en leidingen in de ondergrond.

De techniek is ingezet om een verontreiniging op te sporen die een hoge elektrische weerstand heeft; Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's). DNAPL's vormen vaak dunne laagjes op slecht doorlatende sedimenten en zijn lastig met conventionele methoden op te sporen. ERT zal in de praktijk met name interessant zijn op locaties waar DNAPL's aanwezig kunnen zijn en waar sprake is van een saneringsnoodzaak. De inzet van ERT kan eenvoudig worden gespiegeld aan een reductie van de saneringskosten die wordt bereikt.

Bij de metingen zijn verschillende opstellingen gebruikt die voor een deel uit de vakliteratuur komen en voor een deel zelf zijn ontwikkeld. De metingen met de zelf ontwikkelde meetopstelling geven de beste resultaten. Op locatie Utrecht is één en op locatie Drenthe zijn drie DNAPL-zones opgespoord. De resultaten zijn bevestigd met grondwatermonsters.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

DNAPL, Elektrische Weerstandstomografie
gechloreerde koolwaterstoffen

Vrije trefwoorden:

literatuuronderzoek, modellering
veldmetingen

Titel project

Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's

Projectleiding

TNO-NITG (B.J.M. Goes,
030-2564868)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Electrical resistance tomography for the tracing of DNAPL's

Final report

SKB report number

SV-416

Project report number

SV-416

Author(s)

B.J. M. Goes
J.A.C. Meekes
P.A.A. Verhaagen
H. Booi
M. Stolzenburg

Number of pages

Report: 48
Appendices: 46

Executive organisation(s) (Consortium)

TNO – Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (B.J.M. Goes, 030-2564868)
Grontmij Advies & Techniek BV (P.A.A. Verhaagen, 030-6344617)
Gemeente Utrecht Bureau Bodem (M. Stolzenburg, 030-2864715)
Provincie Drenthe-productgroep Bodem (H. Booi, 059-2365874)

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

The ERT-DNAPL project involved the conduction of geo-electrical measurements between boreholes (ERT) at contaminated sites in Utrecht and Drenthe. The great advantages of ERT measurements in relation to geo-electrical measurements taken at the surface are that measurements have greater resolution and can also be carried out at sites that may have paved surfaces or cables and pipes in the subgrade.

The technique is used to trace contamination that has a high level of electrical resistance - Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs). DNAPLs frequently form thin layers on impermeable sediments and are difficult to trace with conventional methods. In practice, ERT will be particularly interesting at sites where DNAPLs may be present and where remediation may be required. The use of ERT can be set against the reduction achieved in remediation costs.

Various measurement set-ups were used, some taken from professional literature and some developed independently. Measurements taken with the measurement set-ups that we developed independently produced the best results. One DNAPL zone was detected at the Utrecht site and three DNAPL zones were detected at the Drenthe site. The results were confirmed with groundwater samples.

Keywords**Controlled terms:**

DNAPL, Electrical Resistance Tomography, chlorinated hydrocarbons

Uncontrolled terms

literature research, modelling
field measurements

Project title

Electrical resistance tomography for the tracing of DNAPL's

Projectmanagement

TNO-NITG (B.J.M. Goes, 030-2564868)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

VOORWOORD

Het onderzoek naar bodemverontreiniging heeft zich de laatste decennia ontwikkeld tot een volwassen vakgebied. Op basis van het onderzoek worden beslissingen genomen over de noodzaak en de urgentie van bodemsaneringen. Het resultaat van de bodemsaneringen, meer in het bijzonder grondwatersaneringen met gechloreerde koolwaterstoffen, is in veel gevallen echter teleurstellend. Saneringsdoelstellingen worden niet bereikt en er is regelmatig sprake van kostenoverschrijdingen. Een belangrijke oorzaak hiervoor is een verkeerd ontwerp van de saneringsmaatregelen. De plaatsing van filters in de bodem blijkt niet te kloppen met situering van de verontreinigingen. In veel gevallen worden de brongebieden van verontreiniging niet effectief aangepakt. Aangezien het ontwerp van deze maatregelen een directe afgeleide is van de resultaten van het bodemonderzoek, kan men zich afvragen of de kwaliteit van het onderzoek voldoende is. Een mogelijke alternatieve onderzoekstechniek is de inzet van elektrische weerstandstomografie (ERT) voor het in beeld krijgen van bronzones van verontreinigingen. In relatie tot gechloreerde koolwaterstoffen (VOCI) manifesteren deze bronzones zich soms in de vorm van DNAPL's (Dense non aqueous phase liquids).

De twee aanleidingen voor het opstarten van het project ERT-DNAPL zijn:

1. Bij het ontwerp van bodemsanerings- of beheersmaatregelen van locaties waar mogelijk DNAPL's aanwezig zijn, kan ERT bijdragen aan het lokaliseren van deze DNAPL's;
2. De eerste resultaten van de techniek in de Verenigde Staten zijn veelbelovend. Het is echter de vraag of de techniek ook succesvol kan zijn in de Nederlandse situatie, rekening houdend met economische en geologische randvoorwaarden.

Het project is een samenwerking tussen 4 partners. Eén partner bezit geo-elektrische apparatuur en kennis van geofysische technieken (TNO-NITG), één partner heeft boortechnieken, monster technieken en veel ervaring met bodemsaneringen (Grontmij) en twee partners hebben verontreinigde locaties binnen hun grenzen (Gemeente Utrecht en Provincie Drenthe).

In dit rapport wordt het volgende behandeld: literatuuronderzoek naar ERT-studies, modellering met verschillende ERT-opstellingen, demonstratie van ERT op twee locaties en vergelijking van ERT met andere bekende technieken om DNAPL's en de daarbij behorende bronzones op te sporen.

mei 2003

INHOUD

		SAMENVATTING.....	VI
		SUMMARY.....	XII
		BEGRIPPENLIJST.....	XVIII
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Aanleiding en probleemstelling	1
	1.2	Doelstellingen onderzoek.....	1
	1.3	Consortium samenstelling.....	2
	1.4	Aanpak van het onderzoek en opbouw rapport.....	2
Hoofdstuk	2	EIGENSCHAPPEN VAN DNAPL'S EN ACHTERGROND ELEKTRISCHE TOMOGRAFIE	3
	2.1	Eigenschappen van DNAPL's	3
	2.2	Inleiding geo-elektrische weerstand en geo-elektriek	5
	2.2.1	Inleiding geo-elektrische weerstand	5
	2.2.2	Inleiding geo-elektriek	6
	2.3	Elektrische Weerstandstomografie	6
Hoofdstuk	3	HET ERT-MEETPROGRAMMA	9
	3.1	Inleiding.....	9
	3.2	ERT-onderzoeken uit de literatuur	9
	3.3	De meetopstelling	9
	3.3.1	Afstand tussen de elektrodes.....	9
	3.3.2	Afstand tussen de boorgaten	10
	3.4	Locaties van de boorgaten en meetvlakken.....	10
	3.5	Elektroden meetopstellingen.....	11
	3.5.1	Inleiding.....	11
	3.5.2	Crosshole dipool-dipool opstellingen	11
	3.5.3	Circulating dipool-dipool opstelling.....	13
	3.5.4	Crosshole tripool-pool opstellingen	13
	3.5.5	Quadru pool opstelling (Wenner)	13
	3.6	Geometrische factor.....	14
	3.7	Controlemetingen.....	14
	3.8	Snelheid van de metingen en het maximum aantal metingen.....	15
	3.9	Verwerking van de geo-elektrische data – inversie.....	15
	3.10	Resultaten van de modellering.....	15
Hoofdstuk	4	DEMONSTRATIEMETINGEN UTRECHT EN DRENTHE.....	17
	4.1	Inleiding.....	17
	4.1.1	Hoe de ERT figuren te interpreteren	17
	4.1.2	Bemonstering grondwater	17
	4.2	Demonstratie Utrecht	18
	4.2.1	Locatiekeuze en beschrijving locatie Utrecht	18
	4.2.2	Resultaten oppervlakte geo-elektriek locatie Utrecht	20
	4.2.3	ERT op locatie Utrecht.....	20
	4.3	Demonstratie Drenthe.....	27
	4.3.1	Locatiekeuze en beschrijving	27
	4.3.2	ERT op locatie Drenthe.....	29

Hoofdstuk	5	VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE DNAPL- OPSPORINGSTECHNIEKEN	37
	5.1	Monsters	37
	5.1.1	Grondwatermonsters	37
	5.1.2	Bodemmonsters	37
	5.2	Sonderingen.....	38
	5.3	Monsters - semi-3D.....	38
	5.3.1	Partitioning Interwell Tracer Test	38
	5.3.2	Dynamisch monitoren	38
	5.4	Geofysica	39
	5.5	Toelichting bij tabel met DNAPL opsporingstechnieken.....	39
	5.6	Het gebruik van DNAPL opsporingstechnieken in bodemonderzoek	39
	5.6.1	De plaats van semi 3D technieken in het bodemonderzoek	39
	5.6.2	Verschillende semi-3D technieken vergeleken	40
	5.6.3	De economie van ERT	40
Hoofdstuk	6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	43
	6.1	Conclusies	43
	6.2	Aanbevelingen	45
		LITERATUUR	47
BIJLAGE	A	MODELLERING	
		BIJLAGE A1 Toelichting Modelling	
		BIJLAGE A2 Modellen A, B, C En D (Utrecht)	
		BIJLAGE A3 Modelleren met model A (Utrecht)	
		BIJLAGE A4 Modelleren met model B (Utrecht)	
		BIJLAGE A5 Modelleren met model C (Utrecht)	
		BIJLAGE A6 Modelleren met model D (Utrecht)	
		BIJLAGE A7 Modelleren met verschillende boorgatafstanden (Utrecht)	
		BIJLAGE A8 Modelleren voor locatie Drenthe	
BIJLAGE	B	OVERZICHTEN UITGEVOERD VELDWERK	
		BIJLAGE B1 Overzicht uitgevoerd veldwerk op locatie Utrecht	
		BIJLAGE B2 Overzicht uitgevoerd veldwerk op locatie Drenthe	
BIJLAGE	C	NAUWKEURIGHIED VAN METINGEN	
		BIJLAGE C1 Nauwkeurigheid van de metingen op locatie Utrecht	
		BIJLAGE C2 Nauwkeurigheid van de metingen op locatie Drenthe	
BIJLAGE	D	GEO-ELEKTRISCHE PROFIELEN VANAF HET OPPERVLAK (UTRECHT)	
BIJLAGE	E	ERT-METINGEN DRENTHE	
		BIJLAGE E1 ERT-metingen Drenthe Ondiep (Meekes en CDD)	
		BIJLAGE E2 ERT-metingen Drenthe diep (Meekes en CDD)	
BIJLAGE	F	FOTO'S VELDWERK	
		BIJLAGE F1 Foto's ERT-veldwerk Utrecht (maart 2002)	
		BIJLAGE F2 Foto's ERT-veldwerk Coevorden, Drenthe (juni 2002)	

SAMENVATTING

Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's

Achtergrond DNAPL-verontreiniging en doelstellingen onderzoek

Op een groot aantal locaties in Nederland zijn in de bodem Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's) aanwezig. Vrijwel alle DNAPL's bevatten toxisch stoffen en kunnen in de bodem een aanzienlijk risico vormen voor de volksgezondheid en het milieu.

DNAPL's zijn vloeistoffen waarvan de dichtheid groter is dan water. Tevens hebben deze vloeistoffen een geringe oplosbaarheid in water. Als gevolg van deze eigenschappen kunnen DNAPL's zich snel (verticaal) verspreiden in de bodem. De verspreiding van DNAPL's in de bodem valt meestal stil bij het tegenkomen van een minder goed doorlatende laag, bestaande uit bijvoorbeeld klei of leem. Op deze minder goed doorlatende laag ontwikkelt zich dan een zogenaamde zinklaag. Een bekend voorbeeld van stoffen die zich gedragen als DNAPL's zijn gechlorideerde koolwaterstoffen (VOCI).

Het lokaliseren van bronzones met DNAPL's is één van de belangrijkste knelpunten bij de aanpak van verontreinigde locaties. Hierdoor kan de dimensionering van de sanerings- of beheersmaatregelen verkeerd zijn met als mogelijk gevolg een verdergaande verspreiding van verontreinigingen (bijvoorbeeld PER en TRI) in het grondwater. Het afdoende karteren van de bronzone van een bodemverontreiniging met behulp van conventionele puntmetingen is meestal financieel niet haalbaar. Recent zijn andere nieuwere karakterisatiemethoden zoals 'dynamisch monitoren' en 'partitioning interwell tracer test' onderzocht. In de praktijk worden deze methodes tot nu toe echter nauwelijks gebruikt vanwege de kosten en/of de lange tijdsduur.

Electrical Resistivity Tomography (ERT; geo-elektrische metingen tussen boorgaten) is een nieuwe, met name in de Verenigde Staten ontwikkelde meetmethodiek die het mogelijk maakt puur product DNAPL ruimtelijk te detecteren en te monitoren in de ondergrond. De toepassing van deze techniek in dit onderzoek is gebaseerd op de zeer hoge specifieke elektrische weerstand van DNAPL's. Deze techniek is in Nederland nog niet eerder toegepast.

De doelstellingen van het SKB project 'ERT-DNAPL' zijn:

1. De haalbaarheid van ERT voor het lokaliseren van DNAPL's aantonen onder typische Nederlandse omstandigheden door op twee verschillende locaties ERT-metingen uit te voeren;
2. Het vergelijken van ERT met wat er bekend is over andere DNAPL-opsporingsmethoden;
3. Het nader vaststellen onder welke voorwaarden ERT zinvol kan worden ingezet voor het in kaart brengen van de bronzone.

Het project is uitgevoerd in 4 fasen:

1. Literatuur onderzoek en modellering met verschillende ERT-meetopstellingen;
2. Demonstratie ERT op locatie Utrecht;
3. Demonstratie ERT op locatie Drenthe;
4. Het vergelijken van ERT met andere DNAPL-opsporingstechnieken.

Achtergrond ERT

Bij een geo-elektrische meting wordt met behulp van een accu en twee stroomelektrodes een stroom in de grond gebracht, waarna het potentiaalverschil over twee potentiaalelektrodes wordt gemeten. ERT metingen zijn geo-elektrische metingen tussen boorgaten, waarin kabels met ieder 24 elektrodes zijn aangebracht. Onderstaand figuur is een dwarsdoorsnede (x-z) met een geschematiseerde ERT-opstelling voor het opsporen van DNAPL's. Het figuur laat twee actieve stroomelektrodes zien, terwijl tegelijkertijd het potentiaalverschil over een ander elektrodepaar wordt gemeten. Een individuele ERT-meting gebruikt dus 4 elektroden; 2 stroom- en 2 span-

ningselektroden. Het meetschema is een lijst met op iedere regel een individuele meting die voldoet aan een bepaalde elektroden meetopstelling. Een verzameling spannings- en stroommetingen kan vervolgens worden omgerekend (geïnverteerd) naar een afbeelding met weerstanden van de bodem. Het resultaat is een 2D profiel met de werkelijke elektrische weerstand van de ondergrond tussen 2 boorgaten over het dieptetraject waar de elektrodes hangen (zie figuur S1.).

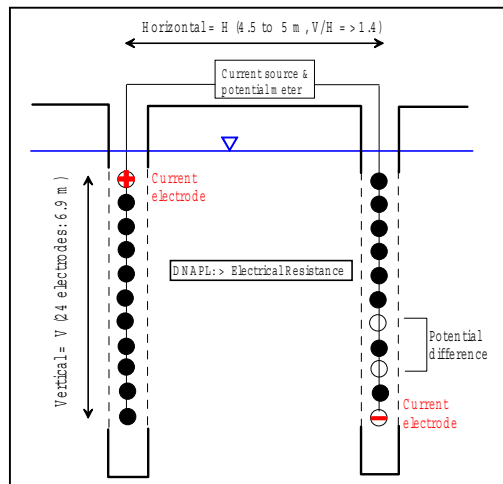


Fig. S1. 2D profiel met de werkelijke elektrische weerstand van de ondergrond tussen 2 boorgaten.

Geo-elektrische detectie van DNAPL's gebeurt op basis van de verhoging van de specifieke elektrische weerstand van de grond bij de aanwezigheid van puur product DNAPL. De dikte van de op te sporen DNAPL-lagen kan variëren van enkele cm's tot enkele dm's. De DNAPL's 'liggen' mogelijk op slecht doorlatende kleiige lagen die juist een lage elektrische weerstand hebben. De klei heeft dus een soort contra-effect op de gemeten elektrische weerstand van de DNAPL-bronzone. Aan DNAPL's gerelateerde grondwaterverontreinigingen (bijvoorbeeld PER en TRI) zijn niet direct waarneembaar in de afbeeldingen van de elektrische weerstand, omdat deze, voor zover bekend, niet leiden tot een verandering van de elektrische weerstand. Wel kunnen afbraakproducten van de DNAPL's leiden tot een verlaging van de elektrische weerstand. De afbraakproducten zijn namelijk voor een deel ionisch oplosbaar in water.

In dit rapport worden de volgende kenmerken van de ERT-metingen behandeld:

1. De onderlinge afstand tussen de elektrodes van de voor het ERT-DNAPL-project gemaakte tomografie kabels. De afstand is relatief klein (0.30 m) om een zo hoog mogelijke resolutie te krijgen;
2. De verhouding tussen de lengte van het deel van het boorgat, waarin de elektrodes hangen (verticaal = V) en de afstand tussen de boorgaten (horizontaal = H). Uit de literatuur, de modellering en de demonstratiemetingen blijkt dat deze verhouding ~ 1.4 of groter moet zijn om de elektrische weerstand midden tussen de boorgaten met ERT goed in beeld te kunnen brengen;
3. De onderlinge posities van de vijf ERT-boorgaten op de meetlocaties. Er is gekozen voor een trapezium vorm;
4. Inversie of rekenmethoden om de werkelijke weerstand van de ondergrond te berekenen uit de gemeten schijnbare weerstanden. De twee in dit onderzoek gebruikte inversiemethoden geven sterk vergelijkbare resultaten;
5. De verschillende elektrode-opstellingen die een meetschema kunnen vormen (zie volgende pagina).

Volgens de vakliteratuur is het bepalen van het beste meetschema een slecht opgelost probleem. Daarom is er in de modelleringen en bij de metingen op de twee demonstratielocaties veel aandacht besteed aan het vergelijken van verschillende elektroden meetopstellingen. Uiteindelijk zijn er drie elektroden opstellingen geschikt gebleken:

1. De speciaal voor dit onderzoek ontwikkelde 'Meekes' elektroden meetopstelling die op beide testlocaties de beste resultaten geeft. In deze opstelling zijn beide stroomelektrodes zodanig gepositioneerd dat de stroom zeer schuin door het vlak tussen de boorgaten loopt. De gedachte hierachter is dat hoe verticaler de stroomelektrodes staan hoe sterker de stroombanen beïnvloed worden wanneer er horizontale DNAPL-lagen (hoge elektrische weerstand) tussen de boorgaten liggen;
2. De veel in het buitenland gebruikte 'circulating dipool-dipool' elektroden meetopstelling die op locatie Drenthe ook redelijk goede resultaten oplevert. Echter, midden tussen de boorgaten neemt de resolutie van deze meetopstelling duidelijk af. Op locatie Utrecht waren de resultaten met deze opstelling onvoldoende;
3. De ERT-boorgatmeetopstelling. De boorgatmetingen zijn handig om de via inversie verkregen ERT-weerstanden van de ondergrond langs het boorgat te controleren. De met de boorgatmetingen gemeten weerstanden representeren namelijk direct, zonder inversie, de weerstand van de ondergrond.

Demonstratiemetingen op locaties Utrecht en Drenthe

Figuur S2. presenteert de resultaten van de ERT-meetvlakken waaruit grondwatermonsters zijn genomen voor locatie Utrecht. In de ERT-profielen op locatie Utrecht zijn één grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands-anomalie. Grondwatermonsters hebben aangetoond dat de grote zone is veroorzaakt door pure DNAPL's. De kleine weerstands-anomalie heeft een andere oorzaak; waarschijnlijk grover sediment. De DNAPL ligt niet, zoals van te voren verwacht werd, bovenop de slecht doorlatende laag, maar hieronder in een over het algemeen goed doorlatend zand pakket. Bij de ophanden zijnde sanering van de locatie zijn de gegevens gebruikt voor het dimensioneren van de onttrekkingsystemen. Figuur S3 geeft een semi-3D beeld van alle 7 meetvlakken voor locatie Utrecht.

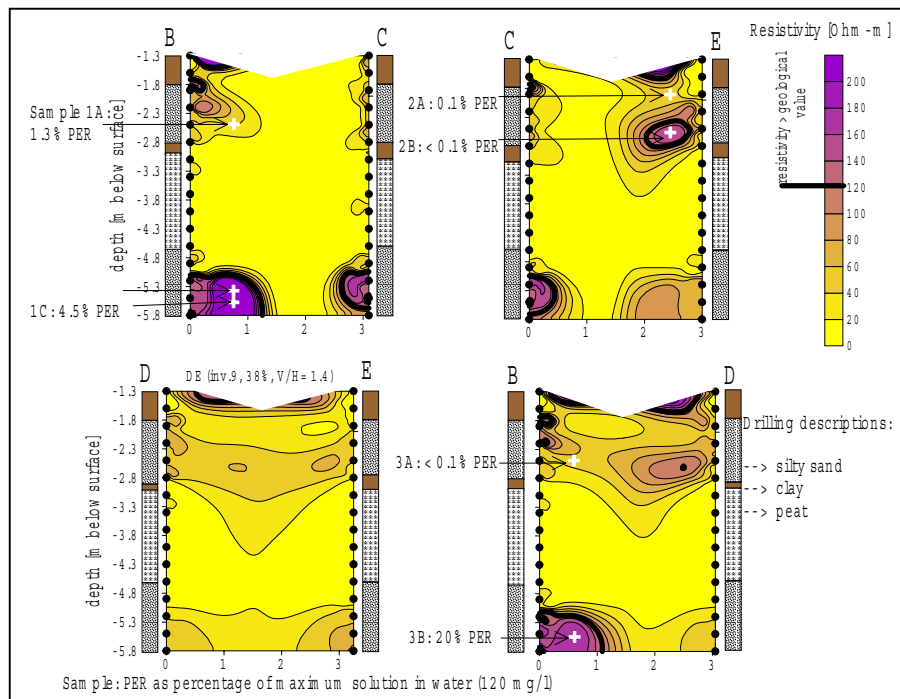


Fig. S2. ERT-meetvlakken voor locatie Utrecht.

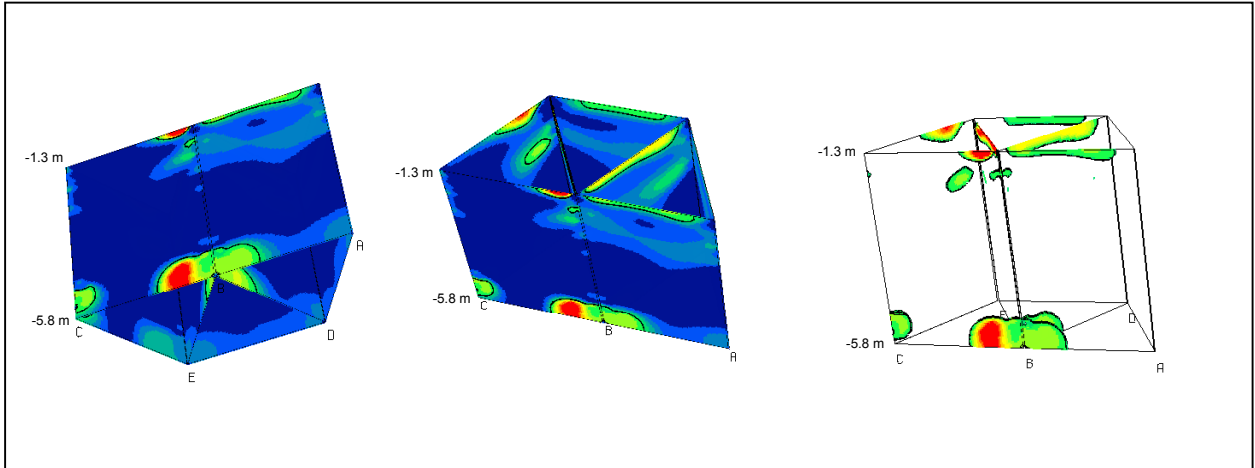


Fig. S3. Semi-3D beeld van alle 7 meetvlakken voor locatie Utrecht.

Figuur S4 presenteert de resultaten van de ERT-metvlakken waaruit grondwatermonsters zijn genomen voor locatie Drenthe. In de ondiepe (2.55-9.45 m-mv) ERT-profielen op locatie Drenthe zijn twee grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands anomalie. DNAPL-bronzones werden vooraf ook verwacht op deze diepte (0-10 m-mv), maar de locatie van zinklagen was onbekend. Alle grondwatermonsters, inclusief de referentiemonsters, hebben zulke hoge PER-percentages (15 tot 166%) dat ze duiden op de nabijheid van DNAPL-zinklagen. Drie van de vier grondwatermonsters met de extreem hoge PER-gehalten (117-150%) komen ieder uit één van de drie zones met een hoge weerstand. De zones representeren dus DNAPL-bronzones. Het hoogste PER-percentage (166%) is echter een halve meter onder één van de zones met een verhoogde weerstand gemeten. Omdat de weerstand van de ondergrond op het monsterpunt niet bijzonder hoog is, is het zeer waarschijnlijk dat de extreem hoge DNAPL-verontreiniging in dit watermonster gevoed is door de hierboven gelegen DNAPL-bronzone. Figuur S5 geeft een semi-3D beeld van alle 7 meetvlakken voor locatie Drenthe.

Het feit dat er in Drenthe grotere weerstands anomalieën zijn gemeten (150-400 Ohm-m) dan op locatie Utrecht (120-250 Ohm-m) is in overeenstemming met de veel hogere PER-verzadigingspercentages in het grondwater op locatie Drenthe (>100%) dan op locatie Utrecht (5-20%). In de diepe ERT-profielen (17.2-24.1 m-mv) op locatie Drenthe zijn, in tegenstelling tot de hypothese voor het veldwerk, geen aanwijzingen voor DNAPL-bronzones aangetroffen.

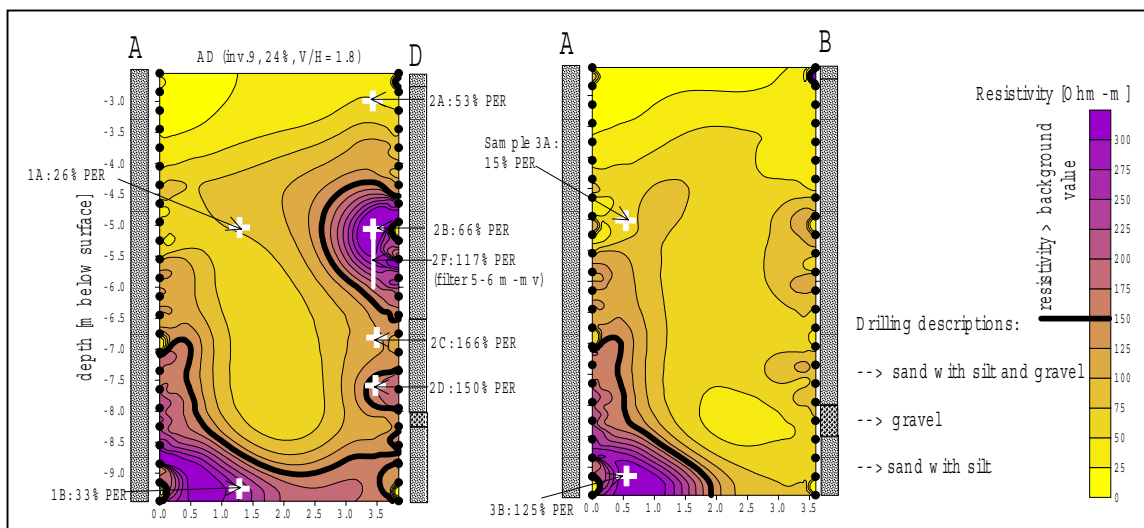


Fig. S4. ERT-metvlakken voor locatie Drenthe.

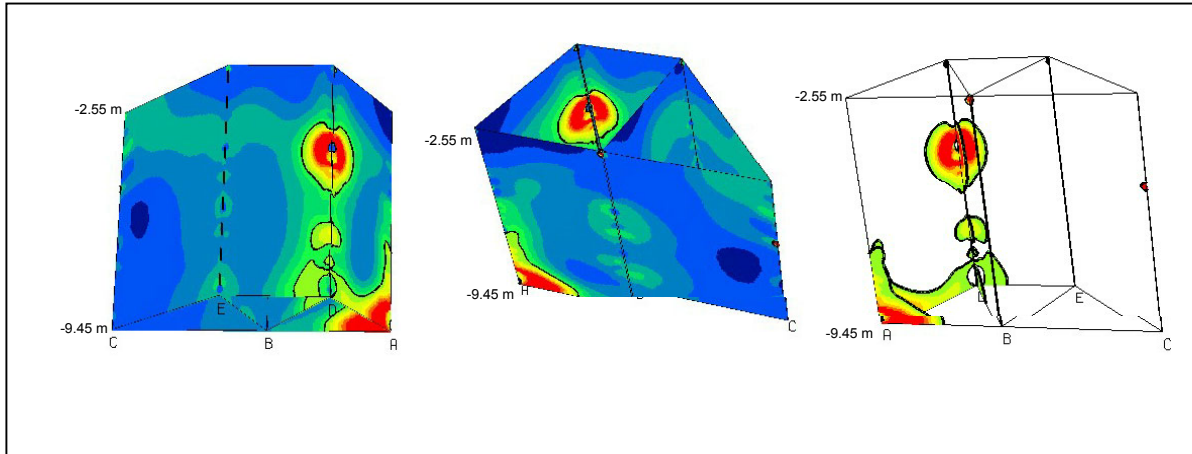


Fig. S5 Semi-3D beeld van alle 7 meetvlakken voor locatie Drenthe.

Conclusies en aanbevelingen

Er is aangetoond dat ERT goed werkt voor de opsporing van DNAPL's in veel voorkomende typen Nederlandse ondergrond (water verzadigd: zand, silt, klei, veen en licht grindig zand). Ook bij verontreinigde locaties met in de bodem veel infrastructuur (kabels, leidingen, beton, kruipruimtes, etc. werkt ERT goed. Op locaties met sediment met een hoge elektrische weerstand (bijvoorbeeld sterk grindig sediment) of waar gebiedsvreemde objecten (bijvoorbeeld vaten) op dezelfde diepte zitten als de meetkabels zal ERT niet goed werken. Bij de voor dit onderzoek gebruikte elektrode-afstand van 0.3 m varieert de resolutie van ~ 0.15 m direct langs de boorgaten tot ~ 0.5 m midden tussen de boorgaten. De resultaten van de ERT-metingen zijn zeer belangrijk gebleken voor het goed dimensioneren van de in-situ saneringsmaatregelen op de locatie te Utrecht. De dimensionering van persluchtinjectie op locatie Drenthe wordt aangepast naar aanleiding van de resultaten van de ER-metingen.

ERT is volgens de expertmeting de enige beschouwde semi-3D techniek met perspectief om op grotere schaal ingezet te worden. Deze conclusie is gebaseerd op: de hoge ruimtelijke resolutie, de korte meettijd en de mogelijkheid de richtprijs omlaag te brengen.

In de huidige situatie, met name bij ondiepe verontreinigingen ($< \sim 10$ m-mv), kan ERT niet financieel concurreren met een conventioneel bodemonderzoek dat tot doel heeft de omvang van de verontreiniging te bepalen. Dit moet ook niet worden nagestreefd aangezien dan veelvuldig zal worden geconstateerd dat ERT geen meerwaarde heeft (geen DNAPL's aanwezig). ERT wordt pas interessant wanneer uit eerder onderzoek is gebleken dat er sprake is van een saneringsnoodzaak en wanneer er DNAPL's aanwezig kunnen zijn. De inzet van ERT kan eenvoudig worden gespiegeld aan een reductie van de saneringskosten die worden bereikt. Met name op locaties waar DNAPL's zich relatief ongehinderd verticaal kunnen verspreiden is de meerwaarde van ERT groot. Wanneer er sprake is van een heterogene bodemopbouw, zoals tijdens dit project op locatie Utrecht, kan ERT ook een meerwaarde hebben.

Om de ERT-meetijd drastisch te verkorten zouden er meerdere geo-elektrische metingen tegelijkertijd kunnen worden uitgevoerd; een zogenaamde meerkanaalsmeting. Bij een meerkanaalse geo-elektrische meting worden over twee elektrodes een stroom in de grond gebracht, terwijl over meerdere elektrodeparen tegelijkertijd het potentiaalverschil wordt gemeten.

Wanneer het, in verband met een mogelijke versnelde verticale verspreiding van verontreiniging, bezwaarlijk is volkomen filters te plaatsen dan kunnen de elektrodes op een mogelijke alternatieve manier worden aangebracht. Hierbij kan gedacht worden aan PVC-buizen zonder filters met

ronde elektrodes op de peilbuizen. Een andere mogelijkheid is wellicht een speciale sondering (CPT) waarbij een stang/kabel met elektrodes de grond in wordt gedrukt.

Wanneer DNAPL's in-situ gesaneerd worden dan kunnen met behulp van ERT-verschilmetingen de afname in de elektrische weerstand en hiermee de afname van de concentraties, gemonitord worden.

SUMMARY

Electrical Resistivity Tomography to detect DNAPL'

Background DNAPL pollution and aims of study

In the Netherlands, and elsewhere in industrialised areas, there are many polluted sites that contain Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's). Most DNAPL's contain highly toxic substances and can, when present in the soil, form a considerable threat to the public health and the environment. DNAPL's are liquids with a density higher than water and a low solubility in water. Due to these attributes DNAPL's can spread very fast (vertically) in the subsoil. The spreading of DNAPL's usually stops at less permeable layers such as clay or loam. On these less permeable layers so called DNAPL source zones can develop. A well-known example of substances that behave as DNAPL's are chlorinated hydrocarbons.

The detection of source zones with DNAPL's is one of the major bottlenecks in dealing with polluted sites. When the location of the source zones is not known the layout of remediation or control measures can be wrong with as a possible consequence the continuing spreading of pollutants (e.g. PCE and TCE) in the groundwater. Effective mapping of the source zone of groundwater pollution with traditional 1D techniques (samples) is often financially not feasible. Recently new DNAPL detection methods as 'dynamic monitoring' and 'partitioning interwell tracer test' have been studied. In practice these methods are hardly used (in the Netherlands) due to the costs and/or the long duration of these methods.

Electrical Resistivity Tomography (ERT; geo-electrical measurements between boreholes) is a new technique that has primarily been developed in the U.S.A. The technique can detect and monitor pure DNAPL's in the subsoil. The application of ERT is based on the high specific electrical resistivity of DNAPL's. The technique has not been applied in the Netherlands before this study.

The aims of the SKB project 'ERT-DNAPL' are:

1. To demonstrate the applicability of ERT for the detection of DNAPL's under typical Dutch circumstances by executing ERT measurements at two different test sites.
2. To compare ERT with other DNAPL detection methods.
3. To determine under which conditions ERT can successfully be applied to map DNAPL source zones.

The project had been executed in 4 phases:

1. Literature study on ERT and modelling with various ERT measurement configurations
2. Apply ERT at a site in Utrecht
3. Apply ERT at a site in Drenthe
4. Compare ERT with other DNAPL detection methods

Background ERT

A geo-electrical measurement is executed by introducing a current into the ground with the aid of a battery and two current electrodes while the potential difference is being measured between two potential electrodes. ERT measurements are geo-electrical measurements between boreholes that contain multi-electrode (24) cables. The figure below presents a 2D profile (x-z) of a schematic ERT layout for the detection of DNAPL's. The figure shows two active current electrodes while at the same time the potential difference is being measured between another pair electrodes. So one ERT measurement uses 4 electrodes: 2 current- and 2 potential electrodes. An ERT measurement schedule is a list with on each line a measurement that follows a certain electrode configuration. The potential difference and the current strength can be recalculated (inverted) into the resistivity of

the subsoil. The outcome is a 2D profile with the real electrical resistivity of the subsoil between two boreholes over the depth section at which the electrodes are located (figure S1).

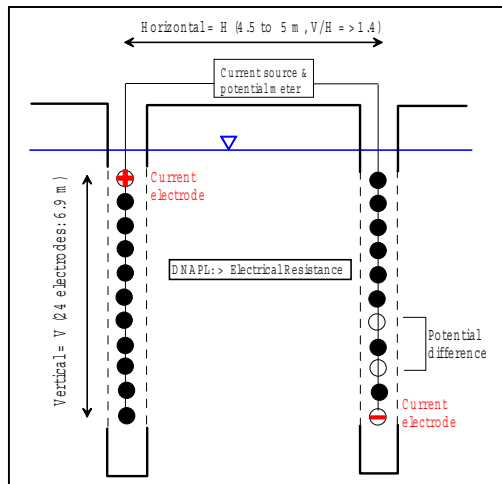


Fig. S1. 2D profile real electrical resistivity of the subsoil between two boreholes.

Geo-electrical detection of DNAPL's is done on the basis of the increase of the specific electrical resistivity of the soil when pure DNAPL's are present. The thickness of the DNAPL layers that need to be detected can vary from several cm's to several dm's. The DNAPL source zones are possibly located on low permeable clay layers that have a low electrical resistivity. So the clay has a kind of counter-effect on the measured electrical resistivity of the DNAPL source zone. DNAPL related groundwater pollution (e.g. PCE and TCE) will not be visible in 2D electrical resistivity images because this pollution does not, as far as known, lead to a significant change of the electrical resistivity. Degradation products of DNAPL's can lead to a local reduction in the electrical resistivity. These degradation products are namely partly ionic soluble in water.

In the main report the following attributes of ERT measurements are discussed:

1. The mutual distance between the electrodes of the especially for this project made tomography cables. The chosen distance is relatively small (0.30 m) in order to achieve a high resolution.
2. The ratio between the length of the section of the borehole that contains the electrodes (vertical= V) and the distance between the boreholes (horizontal= H). From literature, modelling and the field measurements it was concluded that this ratio should be at least ~ 1.4 in order to provide a good image of the electrical resistivity between the boreholes.
3. The mutual positions of the 5 ERT borehole at the two test sites. A trapezium shape was chosen.
4. The inversion or calculation method to calculate the real resistivity of the subsoil from the apparent resistivities. The two inversion methods that have been tried in this study gave strongly comparable results.
5. Different electrode configurations (see below)

According to the geophysical literature the 'best' measurement schedule (a list of four-electrode positions to be addressed by the resistivity meter) remains a poorly resolved problem. For this reason much attention has been paid to the comparison of various electrode configurations during the modelling exercise and the two field measurements. In the end it was concluded that three electrode configurations are useful:

1. The especially for this project developed 'Meekes' electrode configuration provided the best results at both field sites. In this configuration both current electrodes are positioned in such a way that the current has to flow very oblique through the plane between the boreholes. The

idea behind this configuration is that the more vertical the current electrodes are positioned the stronger the current flow lines are influenced when horizontal DNAPL source zones (high electrical resistivity) are present between the boreholes.

2. The in case studies from literature much used 'circulating dipole-dipole' electrode configuration provided fairly good results at test site Drenthe. Still, in the middle between the boreholes the resolution clearly decreases. At test site Utrecht the results with this configuration were disappointing.
3. The ERT 'well log' electrode configuration. The well log ERT measurements proved to be useful for the verification of the through inversion obtained electrical resistivities from the subsoil near the borehole. The resistivities obtained with the ERT 'well log' table represent namely directly, without an inversion, the resistivity of the subsoil.

Demonstration measurements at sites Utrecht and Drenthe

Figure S2 presents, for the Utrecht site, the outcome of the ERT profiles (4 out of 7) from which groundwater samples have been taken. In the ERT profiles one large and one small zone with an increased electrical resistivity have been found. Groundwater samples show that the large zone is caused by DNAPL's (PER=PCE). The smaller resistivity anomaly has a different cause; probably coarser sediment. The DNAPL is not located, as was expected beforehand, on the low permeable clay/peat layer but under this layer in a generally permeable sand layer. These data have been used to plan the layout of remediation system. Figure S3 presents a semi-3D resistivity image of all the 7 ERT planes.

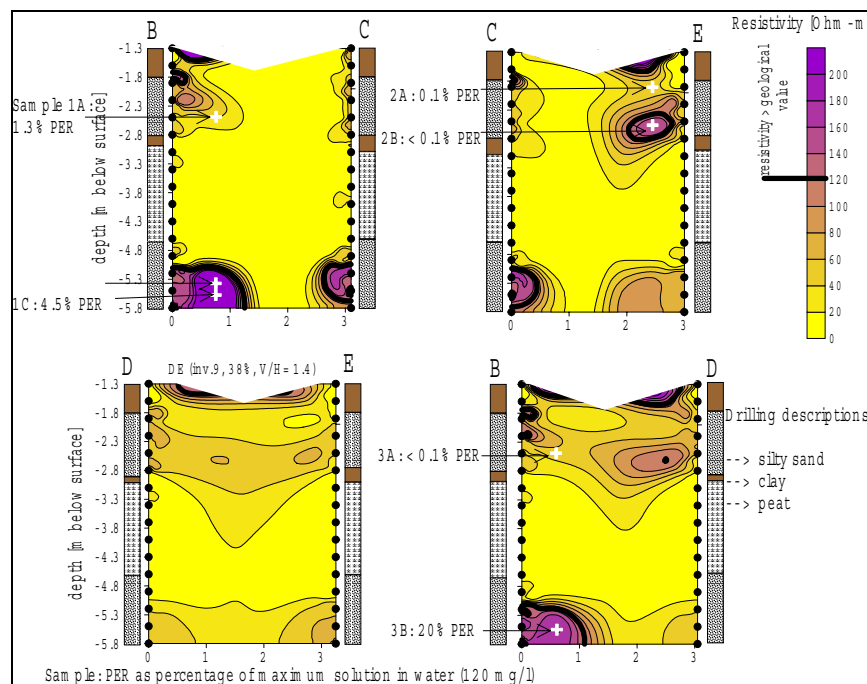


Fig. S2. ERT profiles for the Utrecht site.

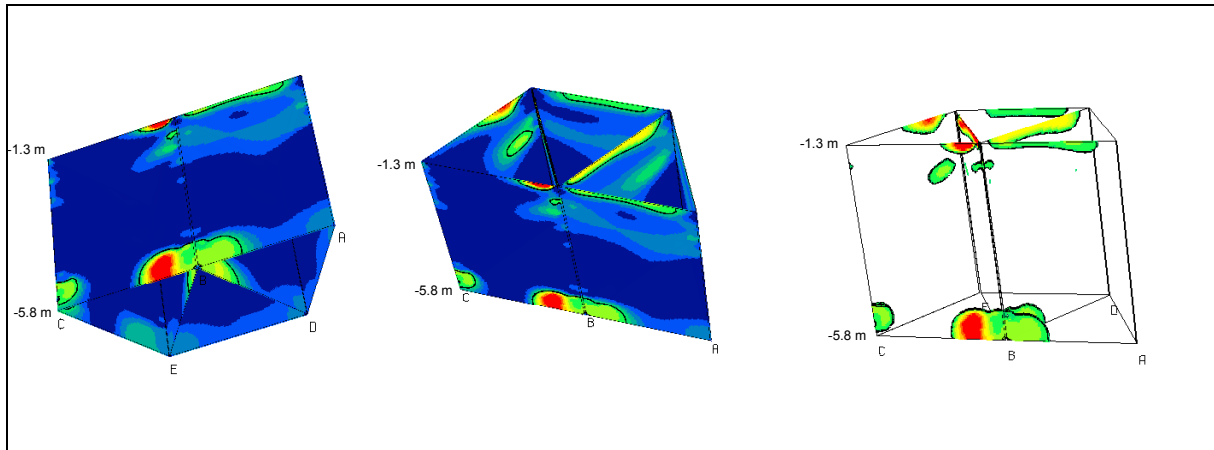


Fig. S3. Semi-3D resistivity image of all the 7 ERT planes.

Figure S4 presents, for the Drenthe site, the outcome of the ERT profiles from which groundwater samples have been taken. In the shallow (2.55-9.45 m-bs) ERT profiles two large and one small zone with an increased electrical resistivity have been detected. DNAPL source zones were expected at this depth (0-10 m-bs) but the location of the source zones was unknown. All groundwater samples, including the reference samples, have high PCE (PER) percentages (15 to 166%) that indicate the proximity of DNAPL source layers. Three out of four groundwater samples with an extreme high PCE percentage (117-150%) originate from each of the three zones with an increased electrical resistivity. So these zones represent DNAPL source zones. The sample with the highest PCE percentage (166%) is taken from half a meter below one of the high resistivity zones. Still, it is very likely that this extreme PCE groundwater pollution has been fed by the DNAPL source zone located above because of the low resistivity of the subsoil at the location of the sample. Figure S5 presents a semi-3D resistivity image of all the 7 ERT planes. The fact that higher resistivity anomalies have been observed in Drenthe (150-400 Ohm-m) than in Utrecht (120-250 Ohm-m) is in accordance with the much higher PCE saturation percentages in the groundwater at the Drenthe site (>100%) than at the Utrecht site (5-20%). At the Drenthe site the deep ERT resistivity profiles (17.2-24.1 m-bs) do not, in contradiction to the expectation, show indications for DNAPL source zones.

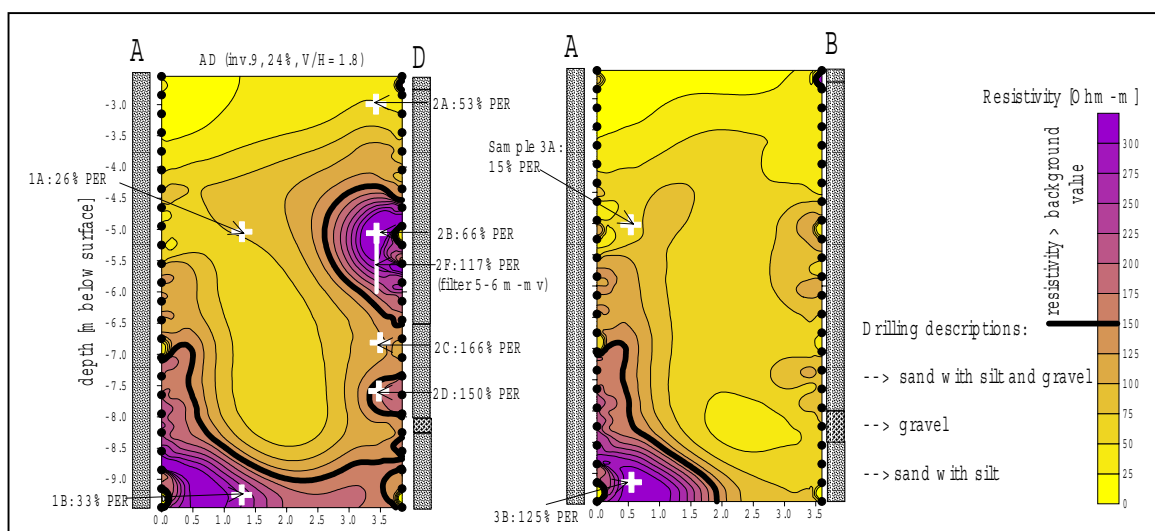


Fig. S4. ERT profiles for the Drenthe site.

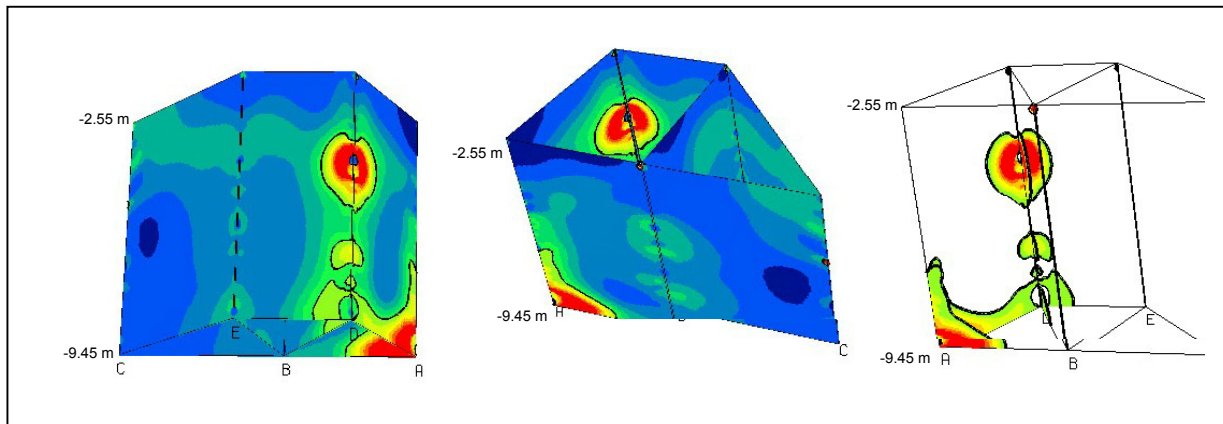


Fig. S5. Semi-3D resistivity image of all the 7 ERT planes.

Conclusions and recommendations

It has been demonstrated that ERT is able to detect DNAPL's in common Dutch soil types (water saturated: sand, silt, clay, peat and sand with little bit of gravel). ERT also functions well at polluted sites with a lot of underground infrastructure (cables, pipes, concrete, cellars, etc). ERT will not perform well in detecting DNAPL's at sites with sediment that has a high electrical resistivity (e.g. gravel) or contain antropogenic objects (e.g. barrels) at the depth of the electrode cables. With a mutual electrode distance of 0.3 m the resolution varies from ~ 0.15 m near the boreholes to ~ 0.5 m in the middle between the boreholes. The outcome of the ERT measurements has proven useful for the planning of the remediation measures at both test sites.

According to the expert meeting, of the considered semi-3D techniques ERT is the only technique that has prospects to be used at a larger scale. This conclusion is based on the high spatial resolution, the relatively short measurement time and the possibility to reduce the costs of the technique.

Presently, especially for a shallow pollution ($< \sim 10$ m-bs), ERT can not compete financially with traditional soil studies that have the aim to determine the rough extension of a pollution. This should also not be the target because then often the conclusion will be that ERT does not have an added value (no DNAPL's present). ERT will become interesting when it was shown in earlier studies that there is a need to remediate and that DNAPL's may be present. Comparing the costs for ERT with the achieved reduction in remediation costs can show the usefulness of ERT. The added value of ERT is especially large at sites where DNAPL's can easily spread vertically. At sites with heterogeneous subsoil, for example the Utrecht demonstration site, ERT can also have an added value.

To reduce the ERT measurement time in the field it would be useful to execute more geo-electrical measurements at the same time; this can be done with so called multi-channel measurements. With geo-electrical multi-channel measurements the potential difference is measured over several electrode pairs at the same time while current is being transmitted into the ground over another pair of electrodes.

When there is an objection to installing complete screened filters in the subsoil because of the possible vertical spreading of the pollution then the electrodes might be placed into the subsoil by making use of an alternative method. For example by using unscreened (blind) PVC pipes with external electrodes. Another possibility might be a special Cone Penetration Test (CPT) that pushes a rod/cable with electrodes into the ground.

When DNAPL's are remediated in the subsoil then the progress of the remediation can be monitored with ERT. A reduction in electrical resistivity represents a reduction in concentration of the DNAPL pollution.

BEGRIPPENLIJST

DNAPL

Dense Non-Aqueous Phase Liquids; stoffen die zwaarder zijn dan water en zeer langzaam oplossen in water, DNAPL's hebben een hele hoge elektrische weerstand en bestaan meestal uit toxische stoffen.

DNAPL-bronzone

DNAPL's in niet opgeloste vorm die door langzame oplossing het grondwater verontreinigen.

Continue Verticale Elektrische Sondering (CVES)

Een serie VES-metingen vlak achterelkaar die een 2D weerstandsprofiel van de ondergrond opleveren.

Dynamische monitoren

Een methode om met behulp van DNAPL-concentraties in het grondwater de DNAPL-bronzone te lokaliseren.

Elektrische weerstand

Een maat voor de tegenwerking die een elektrische stroom ondervindt wanneer het door een medium stroomt.

Elektrische Weerstand (resistivity) Tomografie (ERT):

Geo-elektrische metingen van boorgat naar boorgat.

Elektroden meetopstelling

De posities van de stroom- en de potentiaalelektrodes.

Inversie

Een rekenmethode om de gemeten schijnbare elektrische weerstanden van de ondergrond om te zetten naar werkelijke elektrische weerstanden.

k-factor

Een constante waarmee uit de stroomsterkte en het gemeten potentiaalverschil de schijnbare elektrische weerstand van de ondergrond kan worden berekend.

LNAPL

Light Non-Aqueous Phase Liquids; een verontreiniging die lichter is dan water en daarom, in niet opgeloste vorm, op het water drijft.

Long Normal (LN)

Weerstand gemeten in een boorgatmeting met een relatief grote elektrode-afstand; de meerwaarde is dus representatief voor een gebied met een iets grotere straal (i.t.t. SN).

Membrane Interfase Probe (MIP) sondering

Een sondering waarbij vluchtige koolwaterstoffen in de ondergrond worden gemeten.

Partitioning Interwell Tracer Test (PITT)

Een methode om met behulp van tracers een DNAPL-bronzone te lokaliseren.

NAPL

Non-Aqueous Phase Liquids; DNAPL en LNAPL (organochloorverbindingen).

Schijnbare elektrische weerstand

Een elektrische weerstand die hoort bij een bepaalde positie van de stroom- en potentiaalelektrodes.

Short Normal (SN)

Weerstand gemeten in een boorgatmeting met een relatief korte elektrode-afstand; de meerwaarde is dus representatief voor een gebied dat relatief dicht bij de elektrodes ligt (i.t.t. LN).

Specifieke elektrische weerstand

Zie werkelijke elektrische weerstand.

Verticale Elektrische Sondering (VES)

Een geo-elektrische meting vanaf het oppervlak.

Verticaal/Horizontaal (V/H)

De verhouding tussen de lengte van de sectie in het boorgat waarin de ERT-elektrodes hangen (V) en de afstand tussen de boorgaten (H).

VOC

Gechloreerde koolwaterstoffen (onder andere tetrachlooretheen, trichlooretheen).

Werkelijke elektrische weerstand

De elektrische weerstand van de ondergrond op een bepaalde x-positie en diepte.

Zinklaag

Een laag die opgebouwd is uit DNAPL-verontreiniging(en) en die zich verticaal door de bodem verspreidt. De verspreiding valt stil op bodemlagen met een lage permeabiliteit (klei, leem) of wanneer de laag zodanig wordt verdund dat de DNAPL volledig kan worden opgelost in water.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Op een groot aantal locaties in Nederland zijn in de bodem Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's) aanwezig. Vrijwel alle DNAPL's zijn toxisch en kunnen in de bodem een aanzienlijk risico vormen voor de volksgezondheid en het milieu. Vanwege de slechte mengbaarheid van DNAPL's met water en de hoge dichtheid dringen ze als een aparte vloeistoffase vaak door tot diep in de verzadigde zone. De DNAPL's lossen dan langzaam op en vormen zo jaren lang een bronzone voor de verontreiniging van grondwater.

In het bodembeleid, zoals dat de laatste jaren is ontwikkeld, wordt steeds meer uitgegaan van een intensieve aanpak van de bronnen van de verontreinigingen. Indien deze succesvol kunnen worden gesaneerd ontstaat de mogelijkheid de pluimen van de verontreiniging met extensieve methodieken zoals monitoring te bewaken. Dit kan resulteren in een significante reductie van de bodemsaneringskosten. Randvoorwaarde bij een succesvolle invulling van dit beleid is het verkrijgen van inzicht omtrent bronnen op een locatie. Bij locaties die zijn verontreinigd met VOCI of andere componenten die zich kunnen verspreiden in de vorm van een zinklaag is dit problematisch. De kosten die gemoeid zijn met conventioneel onderzoek zijn hoog, terwijl bijna nooit een nauwkeurig beeld ontstaat waar de bronnen zijn gesitueerd. Hierin schuilt een grote onzekerheid voor een succesvolle sanering. De behoefte aan een techniek die nauwkeurig en met zekerheid kan aangeven waar bronnen aanwezig zijn in de bodem is zeer groot. Recent zijn nieuwere meettechnieken zoals 'dynamisch monitoren' [Weytingh et al., 2000] en 'partitioning interwell tracer test' [Hetterschijt et al., 2000] onderzocht. In de praktijk worden deze methodes tot nu toe echter nauwelijks gebruikt vanwege de kosten en/of de lange tijdsduur.

De probleemstelling is:

Het lokaliseren van DNAPL's is één van de belangrijkste knelpunten bij de aanpak van verontreinigde locaties. Hierdoor kan de dimensionering van de sanerings- of beheersmaatregelen verkeerd zijn met als mogelijk gevolg een niet effectieve bodemsanering en mogelijk een verdergaande verspreiding van verontreinigingen in het grondwater.

1.2 Doelstellingen onderzoek

Electrical Resistivity Tomography (ERT; geo-elektrische metingen tussen boorgaten) is een nieuwe, met name in de Verenigde Staten ontwikkelde, meetmethode die het mogelijk maakt DNAPL's ruimtelijk te detecteren en te monitoren in de ondergrond [Newmark et al., 1998]. Deze techniek is in Nederland nog niet eerder toegepast. ERT kan naar verwachting een efficiënte bijdrage leveren aan een verbeterde beschrijving van de positie van de DNAPL's op vele verontreinigde locaties.

De doelstellingen van het SKB-project 'ERT-DNAPL' zijn:

1. De haalbaarheid van ERT voor het lokaliseren van DNAPL's aantonen onder typische Nederlandse omstandigheden door op twee verschillende locaties ERT-metingen uit te voeren;
2. Het vergelijken van ERT met andere DNAPL-opsporingsmethoden;
3. Het nader vaststellen onder welke voorwaarden ERT zinvol kan worden ingezet voor het in kaart brengen van de bronzone van verontreinigingen.

1.3 Consortium samenstelling

ERT-DNAPL-bronzone opsporen is een Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem project. Het consortium van dit project bestaat uit vijf meebetalende partners:

- TNO - Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO-NITG, penvoerder);
- Grontmij Advies & Techniek BV;
- Gemeente Utrecht - Bureau Bodem;
- Provincie Drenthe - Productgroep Bodem;
- Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB).

Binnen TNO-NITG is geo-elektrische apparatuur aanwezig om ERT-metingen uit te voeren. Tevens heeft TNO-NITG ruime ervaring (>25 jaar) met geo-elektrische metingen. Grontmij is adviseur voor vele locaties waar sprake is van omvangrijke bodemverontreinigingen en daarom kennishebber van de DNAPL problematiek. Grontmij heeft ook ruime ervaring met het plaatsen van peilbuizen en het nemen en analyseren van monsters op verontreinigde locaties. Gemeente Utrecht en Provincie Drenthe hebben binnen hun grenzen vele locaties met een bodemverontreiniging waar mogelijk DNAPL's aanwezig zijn. Als probleembezitter en eindgebruiker zijn de gemeente en de provincie gebaat bij goed en volledig onderzoek waardoor noodzakelijke saneringsmaatregelen snel en kosteneffectief kunnen worden uitgevoerd.

1.4 Aanpak van het onderzoek en opbouw rapport

Het project is uitgevoerd in 4 fasen:

1. literatuuronderzoek en modellering met verschillende ERT-meetopstellingen;
2. demonstratie ERT op locatie Utrecht;
3. demonstratie ERT op locatie Drenthe;
4. het vergelijken van ERT met andere DNAPL-opsporingstechnieken en het maken van het eindrapport.

Hoofdstuk 2 behandelt de eigenschappen van DNAPL's. Verder geeft dit hoofdstuk een inleiding in ERT en de mogelijke toepassing van ERT voor het opsporen van DNAPL's.

Hoofdstuk 3 presenteert de kenmerken die van belang zijn voor de ERT-metingen, zoals: afstanden tussen de elektrodes, afstanden tussen de boorgaten, locaties van de boorgaten en de elektrodes meetopstellingen. Tevens wordt ingegaan op de snelheid van de geo-elektrische metingen en het daarmee samenhangend maximum aantal metingen. Tenslotte worden de verwerking van de geo-elektrische data en de resultaten van de modellering behandeld.

In hoofdstuk 4 worden de veldmetingen op locaties Utrecht en Drenthe behandeld. In hoofdstuk 5 wordt ERT vergeleken met andere technieken om DNAPL's op te sporen. In hoofdstuk 6 staan de conclusies en de aanbevelingen.

Voor de vergelijking van ERT met andere technieken om DNAPL's op te sporen is een expertoverleg gehouden. Het resultaat van het expertoverleg is een ingevulde matrix waarin de verschillende DNAPL-opsporingstechnieken aan een aantal criteria worden getoetst (Hoofdstuk 6). Behalve de leden van de projectgroep hebben twee externe experts op het gebied van DNAPL opsporingstechnieken hieraan bijgedragen.

De experts zijn:

- Dr. R.A.A. Hetterschijt: Shell;
- Ir. C.G.J.M. Pijls: Tauw.

EIGENSCHAPPEN VAN DNAPL'S EN ACHTERGROND ELEKTRISCHE TOMOGRAFIE

2.1 Eigenschappen van DNAPL's

DNAPL's kunnen onder andere aanwezig zijn op locaties waar oplossingsmiddelen zijn gebruikt voor reinigingsprocessen. Bekend voorbeeld is de groep van de gechloroerde koolwaterstoffen (VOCI). DNAPL's zijn vloeistoffen waarvan de dichtheid groter is dan water. Tevens hebben deze vloeistoffen een geringe oplosbaarheid in water. Als gevolg van deze eigenschappen kunnen DNAPL's zich snel (verticaal) verspreiden in de bodem. De verspreiding van DNAPL's in de bodem valt meestal stil bij het tegenkomen van een minder goed doorlatende laag, bestaande uit bijvoorbeeld klei of leem. Op deze minder goed doorlatende laag ontwikkelt zich dan een zogenaamde zinklaag (figuur 1). Op verontreinigde locaties manifesteren DNAPL's zich vaak in de vorm van meerdere zinklagen. De ligging en de vorm van de zinklagen zijn afhankelijk van de contrasten in hydraulische conductiviteit van het sediment. De zinklaag ligt niet per definitie onder in een zandpakket en bovenop een klei of veenlaag. Contrasten in pakking en/of korrelgrootte binnen een zandpakket kunnen al leiden tot het ontstaan van een (tijdelijke) zinklaag.

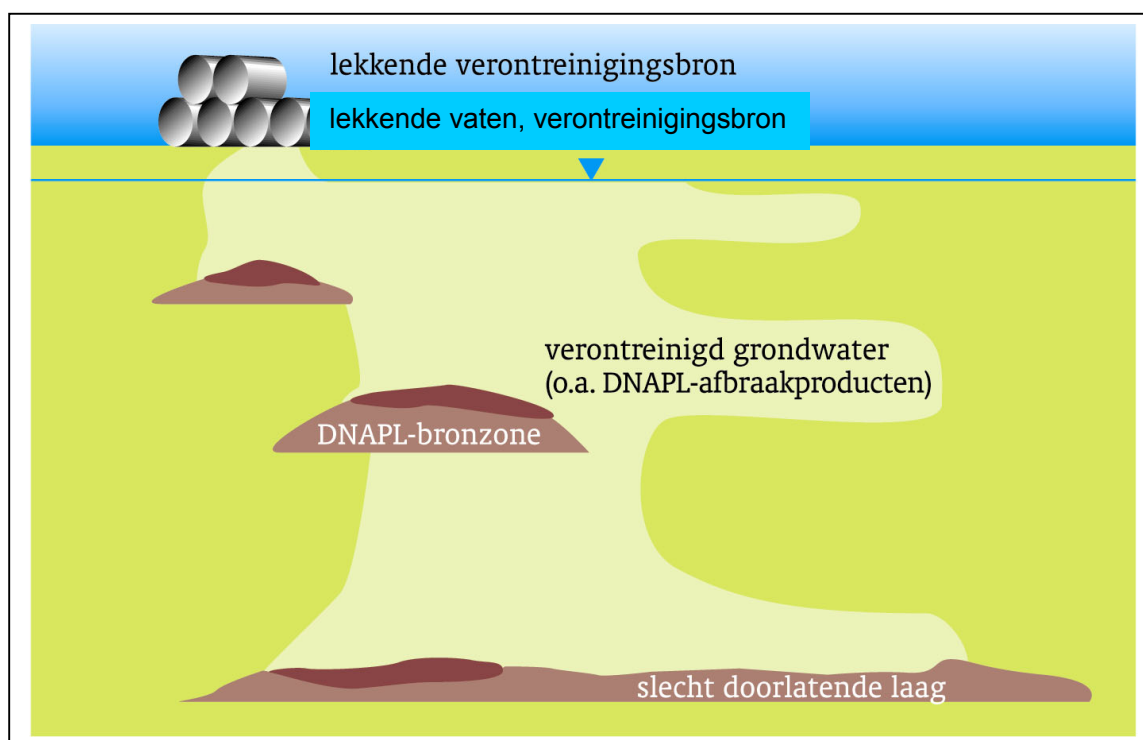


Fig. 1. DNAPL-bronzone met verontreinigde grondwaterpluim.

Bij de aanpak van verontreinigde locaties is het voorkomen en herkennen van DNAPL's van groot belang voor de bodemsanering. DNAPL's lossen slechts langzaam op waardoor deze fungeren als een bronzone. Indien de DNAPL niet gericht wordt aangepakt zal de effectiviteit van de sanering of beheersing beperkt zijn. De eerste stap bij de aanpak is het kunnen aantonen en ruimtelijk vastleggen van DNAPL's tijdens bodemonderzoek. De nu gangbare onderzoekstechnieken zijn hiertoe niet in staat.

DNAPL's omvatten een grote groep stoffen. Voor typische Nederlandse verontreinigingssituaties zijn met name de volgende stoffen vooral van belang: PER, TRI, CIS, 1,1,1-TCA en naftaleen. Koolteer ('coal tar') is een DNAPL die uit verschillende stoffen bestaat. Eigenschappen van deze en nog enkele andere DNAPL's worden, voor zover bekend, gepresenteerd in Tabel 1. De zeer hoge specifieke elektrische weerstand van DNAPL's is een eigenschap die van groot belang is voor dit onderzoek.

Tabel 1. Fysische eigenschappen van in Nederland vaak voorkomende DNAPL's.

DNAPL-type	Max. oplossing in water [µg/l]	Specifieke elektrische weerstand [Ohm-m]	Specifieke massa [g/cm ³]
Per-Chloor-Etheen (PCE of PER)	120000-150000	98 10 6#	1.623
Tri-Chloor-Etheen (TRI)	1100000	1.25 106 *, 67 106 #	1.464
Cis-Di-Chloor-Etheen (CIS)	3500000		1.26
1,1,1-Tri-Chloor-Ethaan (1,1,1-TCA)	480000-4500000		1.3376

[* Newmark et al. 1998 p.9]

www.dow.com/gco/eu/prod/com_prop.htm

Schneider en Greenhouse [1992] presenteren berekende specifieke weerstanden bij verschillende verzadigingsgraden van een DNAPL (PER) in een zandig aquifer met een porositeit van 40%. In figuur 2 zijn deze berekeningen grafisch weergegeven. Het figuur laat zien dat vanaf een verzadigingspercentage van ~55% de geo-elektrische weerstand zeer snel toeneemt. In een normale Nederlandse ondergrond (verzadigde weerstand <150 Ohm-m) hebben DNAPL's een duidelijk weerstandscontrast wanneer het poriënvolume van het zand voor ~35% of meer gevuld is met DNAPL's. Er is dus al sprake van een significant verhoogde weerstand wanneer de DNAPL-verzadiging beneden de 100% ligt.

Bij het uitvoeren van conventioneel bodemonderzoek voor het vaststellen van de verontreiniging van het grondwater wordt gebruik gemaakt van peilbuizen. Normaliter hebben de peilbuizen een filter met een lengte van 1 m. Bij het bemonsteren wordt via het filter water uit de bodem aange-trokken over de diepte waarin het filter aanwezig is. Dit impliceert dat het water afkomstig kan zijn uit een relatief groot bodemvolume in de directe omgeving van de peilbuis. Hierdoor zullen het bemonsterde water en de hierop volgende analyse een gemiddelde indruk geven van de waterkwaliteit in dit volume. DNAPL's beslaan echter relatief kleine volumes. Door de verdunning, die optreedt bij het oppompen van het water, is kans dat DNAPL's worden aangetoond met deze metingen (gehalten gelijkwaardig aan de maximale oplosbaarheid van de stof) klein. Bij de interpretatie van conventionele onderzoeksgegevens is de gewoonte ontstaan om bij hoge gehalten VOCl in het grondwater (>10.000 µg/l) de toelichting te doen dat het aannemelijk is dat DNAPL's aanwezig kunnen zijn in de bodem. Of DNAPL's werkelijk aanwezig zijn, waar ze zijn gesitueerd in de bodem en welke omvang ze hebben, blijft echter onduidelijk. Dit gebrek aan informatie sluit uit dat tijdens de bodemsanering een effectieve aanpak van DNAPL's kan plaatsvinden.

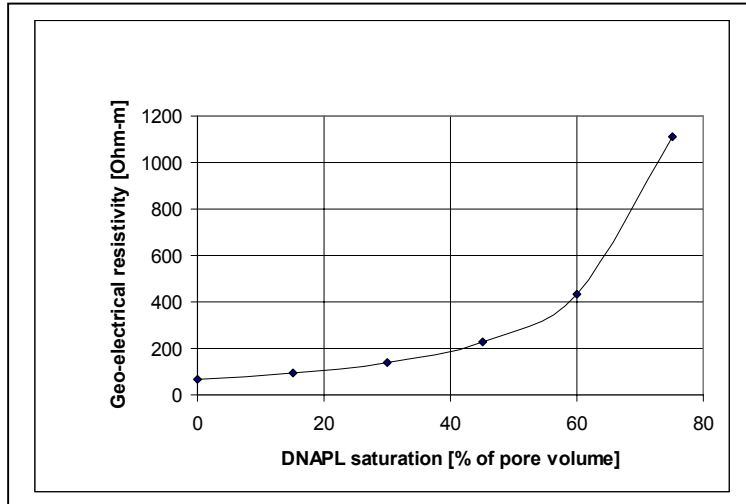


Fig. 2. Berekende specifieke elektrische weerstand van zandig aquifer verontreinigd met PER [Schneider en Greenhouse, 1992].

2.2 Inleiding geo-elektrische weerstand en geo-elektriek

2.2.1 Inleiding geo-elektrische weerstand

Geo-elektrische metingen hebben tot doel de verdeling van de lithologie en de waterkwaliteit van de ondergrond te bepalen. Deze parameters worden afgeleid uit de specifieke elektrische weerstand. De specifieke elektrische weerstand van de natuurlijke ondergrond wordt bepaald door:

- de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater (of de EC);
- de specifieke elektrische weerstand van het sedimentskelet;
- de formatiefactor (porositeit, textuur en cementatie van het sediment).

Een aantal typische elektrische weerstandswaarden voor diverse grondsoorten is in tabel 2 weergegeven.

Tabel 2. Typische specifieke elektrische weerstanden van diverse grondsoorten.

Beschrijving	Specifieke elektrische weerstand [Ohm-m]
droog zand (onverzadigd)	500-10000
zand verzadigd met zoetwater	30-500
zand verzadigd met brak tot zout water	0.2-30
klei verzadigd met zoet water	5-40

Geo-elektrische weerstandsmetingen kunnen interessant zijn voor bodemverontreinigingsonderzoek, omdat:

1. De weerstand van de ondergrond varieert met de concentratie van de als ionen opgeloste stoffen.
2. De elektrische weerstand van zand en klei verschillend is.
3. De weerstand van organische puur en gedeeltelijk verzadigde (>~55%) DNAPL productlagen erg hoog is (tabel 1). Dit impliceert dat gehalten kunnen worden waargenomen die liggen beneden de kwalificatie puur product.

Dit onderzoek gaat over de derde eigenschap.

2.2.2 Inleiding geo-elektriek

Bij een geo-elektrische meting wordt met behulp van een accu en twee stroomelektrodes een stroom in de grond gebracht, waarna het potentiaalverschil over twee potentiaalelektrodes wordt gemeten. Het potentiaalverschil, de stroomsterkte en een constante, die afhankelijk is van de gebruikte meetopstelling, leveren vervolgens, met behulp van de wet van Ohm, de schijnbare weerstand van de ondergrond. De gemeten schijnbare weerstanden zijn gemiddelden van de bodem tussen de elektrodes. Een verzameling spannings- en stroommetingen kan vervolgens worden omgerekend (geïnverteerd) in een afbeelding met werkelijke (specifieke) weerstanden van de bodem.

Een Verticale Elektrische Sondering (VES) is een meting vanaf het oppervlak met een vast middelpunt, waarbij de buitenste stroomelektrodes steeds verder uit elkaar worden gezet. Naarmate de stroomelektrodes verder uit elkaar staan kan er dieper de grond in worden “gekeken”. Continue Verticale Elektrische Sonderingen (CVES) zijn een hele serie VES-metingen achter elkaar met een korte tussenafstand. Hierdoor ontstaat een 2D weerstandsprofiel van de ondergrond.

De geo-elektrische techniek is vaak toepasbaar maar kent, wanneer toegepast vanaf het oppervlak, vier belangrijke beperkingen:

1. Equivalentie. De meetgegevens kunnen niet uniek worden omgezet in een beeld van de ondergrond; meerdere modellen zijn mogelijk;
2. Contrasten in elektrische weerstand kunnen aan verschillende oorzaken worden toegekend. Voor de interpretatie is het daarom belangrijk additionele informatie te gebruiken in de vorm van: boringen, sonderingen, grondwater analyses (met name EC) en/of elektrische referentiemetingen;
3. Beperkte resolutie. De metingen hebben een sterk middelend karakter (de stroom gaat door een groot volume grond). De resolutie neemt af als de afstand tussen de (oppervlakkige) elektrodes en de af te beelden laag toeneemt;
4. De metingen kunnen worden verstoord door stroomgeleidende objecten/kabels op of in de grond. Stroomgeleidende objecten liggen meestal niet dieper dan ~1 m-mv.

De laatste twee factoren kunnen worden ondervangen door dicht bij het doelobject te meten door de elektrodes in boorgaten te plaatsen en tussen boorgaten te meten. Deze techniek is bekend als Elektrische Weerstandstomografie (Electrical Resistance Tomography of ERT). Dit onderzoek gaat over deze techniek.

2.3 Elektrische Weerstandstomografie

ERT-metingen zijn geo-elektrische metingen tussen boorgaten waarin kabels met elektrodes zijn aangebracht (figuur 3). ERT is een relatief nieuwe techniek die aanvankelijk vooral door het Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL Newmark, VS) is toegepast. In de Verenigde Staten (VS) wint de techniek aan populariteit. Er zijn daar reeds succesvolle monitoring proeven uitgevoerd met ERT voor het volgen van veranderingen in een DNAPL-bronzone tijdens een sanering [Newmark et al., 1998] en voor het volgen van weerstandsveranderingen tijdens een stoominjectie [Ramirez et al., 1995].

ERT-metingen kunnen worden uitgevoerd vanuit boorgaten die zijn afgewerkt met een PVC-filterbuis. Om een goed contact te hebben met de ondergrond moet de diameter van de buis beperkt zijn. De kabel met elektrodes (grootste diameter van de kabel is ~3 cm) moet er wel in passen. Het filter moet zo volkomen (of geperforeerd) mogelijk zijn over het deel van het boorgat, waarin de elektrodes hangen, om te stimuleren dat de stroom door de ondergrond en niet door het boorgat gaat lopen. De onderkant van de kabel bestaat uit een niet-metalen gewicht met een gaatje. In de onderkant van de peilbuis wordt ook een kunststof haak gemaakt, waardoor een

draad zit. De draad wordt door het gaatje aan de onderkant van de elektrodekabel geknoopt, waarna de kabel in het boorgat kan worden getrokken.

Op de kabels kunnen maximaal 32 elektroden worden geplaatst. Dit maximum is gerelateerd aan het aantal kernen in de kabels en het aantal pinnen op de stekkers die op het geo-elektrische meetinstrument kunnen worden aangesloten (de Terrameter SAS4000 van Abem, www.abem.com). Voor dit onderzoek zijn, in verband met de begrote kosten en de zeer lange meettijd voor kabels met 32 elektrodes, vijf kabels met 24 elektrodes gemaakt.

In figuur 3 staat een geschematiseerde ERT-opstelling voor het opsporen van een DNAPL. Het Figuur 3 laat in zijaanzicht twee actieve stroomelektrodes zien, terwijl tegelijkertijd het potentiaalverschil over een ander elektrodepaar wordt gemeten. De vele mogelijke combinaties van potentiaal- en stroomelektrodes worden besproken in hoofdstuk 3.

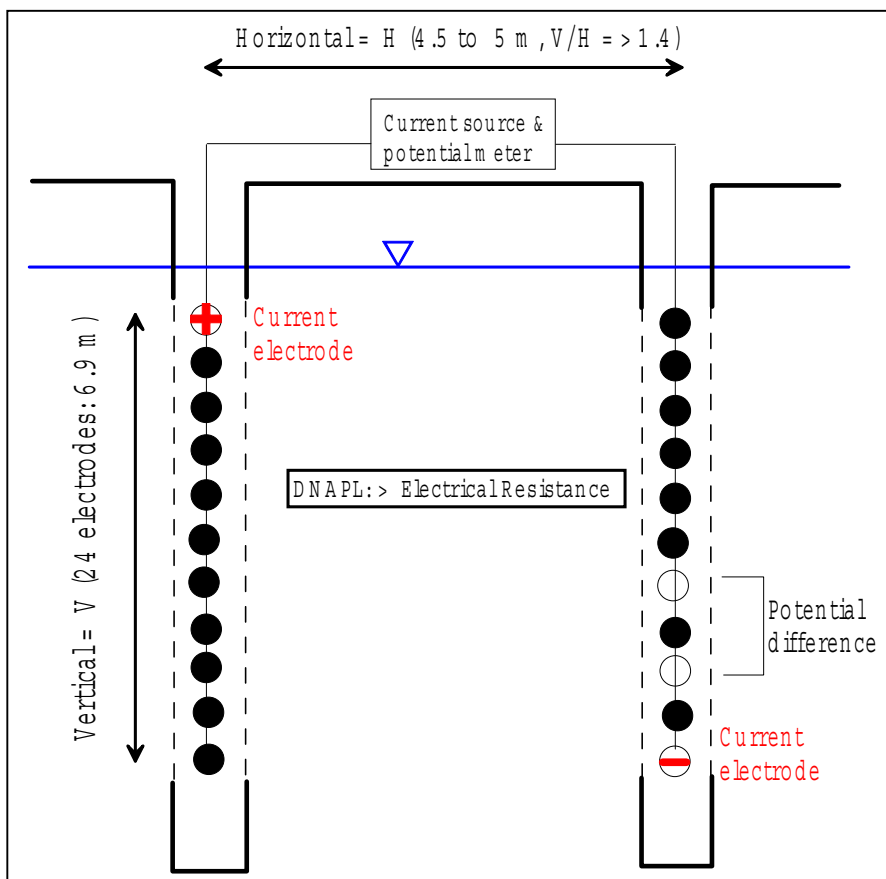


Fig. 3. Een schematisch plaatje van een ERT-opstelling voor het opsporen van een DNAPL-laag.

Geo-elektrische detectie van DNAPL's gebeurt op basis van de verhoging van de specifieke elektrische weerstand van de grond bij de aanwezigheid van een DNAPL. Het is bij voorbaat niet te zeggen wat de toename in specifieke weerstand moet zijn om detecteerbaar te zijn met elektrische tomografie. Dit is afhankelijk van de volgende locatiefactoren: de weerstand en de weerstandvariatie van de natuurlijke ondergrond, de dikte van de DNAPL, de verzadiging van de poriën met DNAPL en de afstand van de bronzone tot de elektrodes. Naar verwachting zal een verhoging van de weerstand met 50% ten opzichte van de natuurlijke ondergrond (bijvoorbeeld van 100 naar 200 Ohm-m) in ieder geval waarneembaar zijn. Dit komt overeen met ~40% verzadiging van de (watergevulde) poriën (figuur 2). De verwachte dikte van de op te sporen DNAPL-lagen kan variëren van enkele cm's tot enkele dm's. De DNAPL's 'liggen' mogelijk op slecht door-

latende kleiige lagen die juist een lage elektrische weerstand hebben. De klei heeft dus een soort contra-effect op de gemeten elektrische weerstand van de DNAPL.

Grondwaterverontreinigingen (bijvoorbeeld PER en TRI's) zijn waarschijnlijk niet direct waarneembaar in de afbeeldingen van de elektrische weerstand omdat deze, voor zover bekend, niet leiden tot een verandering van de elektrische weerstand. Wel kunnen afbraakproducten van de DNAPL's leiden tot een verlaging van de elektrische weerstand. De afbraakproducten zijn namelijk voor een deel ionisch oplosbaar in water. Het is daarom goed mogelijk dat in goed doorlatende sedimenten om de DNAPL een zone aanwezig is met afbraakproducten met relatief lage elektrische weerstanden.

De meeste LNAPL's (Light Non Aqueous Phase Liquids) hebben ook een hoge elektrische weerstand. Echter, LNAPL's zakken niet zoals DNAPL's, maar 'drijven' meestal op de grondwaterpiegel. Geo-elektrische detectie van LNAPL's is lastig; ze bevinden zich namelijk direct onder de onverzadigde zone die ook meestal een hoge elektrische weerstand heeft.

HOOFDSTUK 3

HET ERT-MEETPROGRAMMA

3.1 Inleiding

Eerst geeft dit hoofdstuk een overzichtstabel van de ERT-meetopstellingen uit de literatuur. Vervolgens behandelt dit hoofdstuk de kenmerken van de ERT-meetopstelling, zoals de afstanden tussen de elektrodes en tussen de boorgaten. Vervolgens worden de elektroden meetopstellingen, de controlemetingen en de meetsnelheid besproken. Het hoofdstuk sluit af met een korte toelichting op de verwerkingsmethode (inversie) van de geo-elektrische data.

3.2 ERT-onderzoeken uit de literatuur

Tabel 3 geeft een overzicht van de kenmerken van een aantal eerder uitgevoerde ERT-onderzoeken. Dit overzicht wordt mede gebruikt om de hieronder besproken kenmerken van de ERT-metingen voor dit onderzoek te bepalen.

Tabel 3. Overzicht van de kenmerken van ERT-metingen uit de literatuur.

Eigenschap	[Ramirez et al., 1995]	[Newmark et al., 1998]	[Ramirez et al., 1996]	[Sullivan and LaBrecque, 1998]	[Slater et al., 2000]
Aantal boorgaten	11	3	16	6	4
Afstand tussen boorgaten [m] (a)	12.5 tot 48.5	4.57 en 6.10	(<= 20.7; diameter van de cirkel)	10	1
Boorgatlengte waarin elektrodes hangen [m] (b)	32.92	7.32	10.7	14	2.75
Verticaal/horizontaal (b/a)	0.7, 1.2, 1.5 en 2.4	1.2 en 1.6	> 0.5	1.4	2.75
Aantal elektrodes per boorgat	10	20	8	15	12
Afstand tussen de elektrodes [m]	3.66	0.39	1.52	1	0.25
Elektroden meetopstelling	Circulating dipool-dipool	?	pool-pool	circulating dipool-dipool en pool-pool	circulating dipool-dipool
Aantal metingen per vlak	400	?	'een paar honderd'	?	220
Doel onderzoek	Weerstandsveranderingen tijdens stoominjectie monitoren	lokaliseren en monitoren van een DNAPL tijdens pompen	monitoren van een zoutlek in een metalen ondergrondse tank	onderzoeken van verschillende elektrode-opstellingen (o.a. skip factor)	monitoren van een zoute tracer in een tank
Weerstand [Ohm-m]	? (zwart-wit plaatjes)	8-40 (ondergrond), 500-900 (DNAPL)	100-1000 (ondergrond),	5-500	1-500
Sediment ondergrond	klei, silt, zand en grind (heterogeen)	klei, silt, zand (klei domineert)	voornamelijk zand	silt, zand, grind (heterogeen)	zand en klei

3.3 De meetopstelling

3.3.1 Afstand tussen de elektrodes

De onderlinge afstand tussen de elektrodes van de voor het ERT-DNAPL-project gemaakte tomografie kabels is 0.30 m. De afstand is relatief klein om een zo hoog mogelijke resolutie te krijgen. Bij inversies van ERT-data wordt de ondergrond onverdeeld in hokjes met een lengte en breedte van de hele (o.a. [Bing and Greenhalgh, 2000]) of de halve elektrode-afstand (o.a. [Sullivan and LaBrecque, 1998]). De metingen in dit onderzoek hebben dus een verwachte resolutie van ~0.15 m. Hoe groter het weerstandscontrast is tussen de DNAPL en de natuurlijke onder-

grond hoe beter de resolutie zal zijn. Veel kleinere elektrode-afstanden worden niet nuttig geacht in verband met de lengte van de elektrodes zelf (0.0135 m) en omdat anders de lengte van het boorgattraject, waarover de 24 elektrodes hangen, en dus de grootte van het meetvlak, erg klein wordt. De kleinste gebruikte elektrode-afstand in de voor dit onderzoek bestudeerde literatuur is 0.25 m (tabel 3).

3.3.2 Afstand tussen de boorgaten

De verhouding tussen de lengte van het deel van het boorgat waarin de elektrodes hangen (verticaal = V) en de afstand tussen de boorgaten (horizontaal = H) moet 1.5 of groter zijn om de beste resultaten te geven [Raimirez et al., 1995]. De meeste onderzoeken uit de literatuur (tabel 3) gebruiken ook een verhouding in deze orde van grootte. De aanbevolen maximale grootte van de afstand tussen de boorgaten op locatie Utrecht wordt dan 3.0 m (4.5/1.5). De aanbevolen maximale grootte van de afstand tussen de boorgaten op locatie Drenthe wordt dan 4.6 m (6.9/1.5).

3.4 Locaties van de boorgaten en meetvlakken

Er wordt gewerkt met vijf boorgaten en dus 9 vlakken waarover de weerstand gemeten kan worden (een trapezium, figuur 4). De opstelling is zo ontworpen dat er 7 vlakken zijn met de aanbevolen maximale breedte (zie paragraaf 3.3.2) en 2 vlakken met een grotere breedte. De vlakken met grotere breedte kunnen gebruikt worden om te onderzoeken of er met deze afstand toch resultaten geboekt kunnen worden. Hoe groter de afstand tussen de boorgaten, hoe aantrekkelijker, want het meetvlak is dan groter.

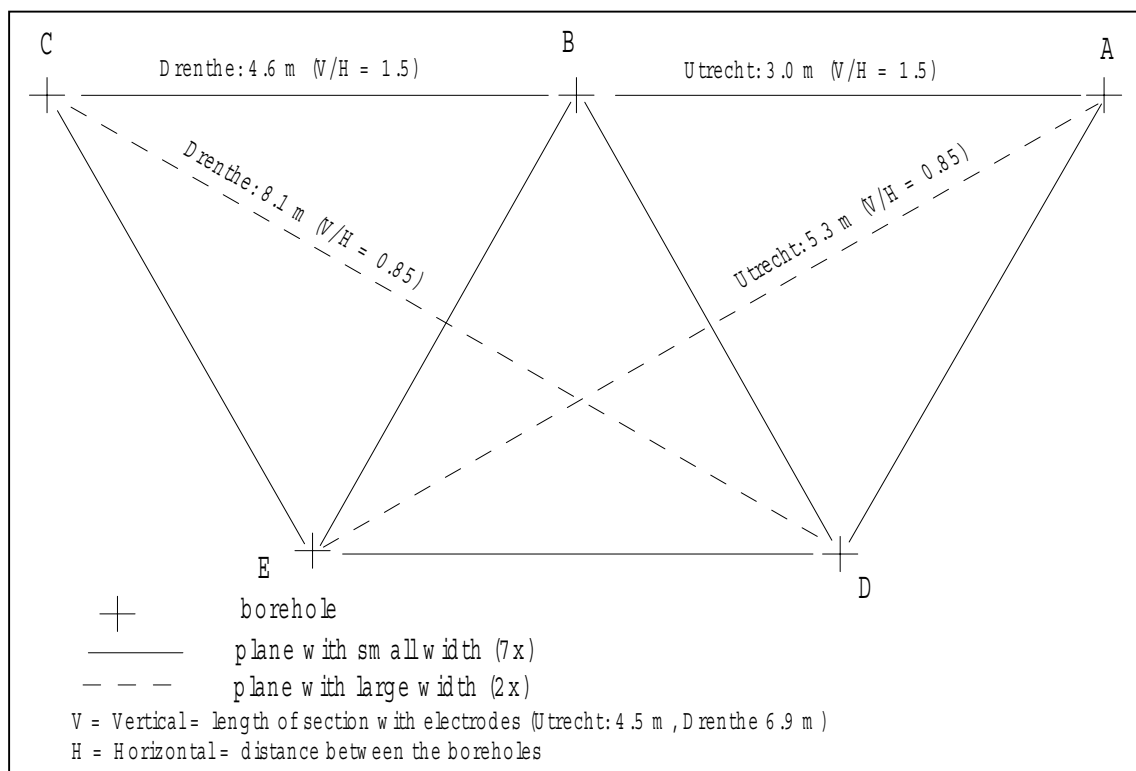


Fig. 4 Overzicht van de 5 boorgaten en de 9 meetvlakken voor ERT-metingen (van boven gezien).

3.5 Elektroden meetopstellingen

3.5.1 Inleiding

Een individuele ERT-meting gebruikt 4 elektroden; 2 stroom- en 2 spanningselektroden (figuur 3). Het meetschema is een lijst met op iedere regel een individuele meting die voldoet aan een bepaalde elektroden meetopstelling. Het bepalen van het beste meetschema blijft een slecht opgelost probleem [Slater et al., 2000].

Elektrode-opstellingen met één of twee oppervlakkige elektrodes (pool-pool, pool-dipool en dipool-pool) vallen af voor dit onderzoek, omdat op veel verontreinigde locaties vaak stroomgeleidende objecten op of vlak onder het oppervlak aanwezig zijn die de elektrische metingen kunnen verstoren.

Dit onderzoek richt zich dus op opstellingen waarbij alle vier de elektrodes zich in de boorgaten bevinden. Dit zijn de volgende opstellingen: crosshole dipool-dipool, circulating dipool-dipool, crosshole tripool-pool en quadrupool (figuur 5).

3.5.2 Crosshole dipool-dipool opstellingen

De overwogen crosshole dipool-dipool elektroden meetopstellingen met in ieder boorgat twee elektrodes zijn: AM-BN, AM-NB en AB-MN [Bing en Greenhalgh, 2000], figuur 5.

Bij de AB-MN opstelling hangen de potentiaal- en de stroomelektrodes in verschillende boorgaten. Het gevolg is dat de afstand tussen de potentiaal- en de stroomelektrodes, in vergelijking met de twee andere opstellingen (AM-BN en AM-NB), groot is. Door deze grote afstand worden de gemeten potentiaalverschillen relatief klein, waarmee de kans op overstemming van de meetwaarden door achtergrondruis of zwerfstromen toeneemt (o.a. [Bing en Greenhalgh, 2000]). Omdat de stroomelektrodes in hetzelfde boorgat hangen bestaat tevens het risico dat de stroom door de boorvloeistof, en dus niet door de ondergrond, gaat lopen. In een eerder geo-elektrisch onderzoek van TNO-NITG, waarbij elektrodes aan het oppervlak en in een boorgat stonden, waren de gemeten potentialen onbetrouwbaar in opstellingen waarbij de potentiaal- en de stroomelektrodes ver uit elkaar stonden [Westerhoff en Meekes, 2001]. De AB-MN opstelling wordt in dit onderzoek daarom niet verder onderzocht.

De voordelen van de AM-BN en AM-NB opstellingen zijn:

1. De potentiaalelektrodes zitten in de buurt van de stroomelektrodes en in verschillende boorgaten; de verwachting is dat de gemeten potentiaalverschillen redelijk groot zullen zijn en daarom minder gevoelig voor eventueel aanwezige zwerfstromen;
2. De stroomelektrodes hangen in verschillende boorgaten waardoor de stroom door de grond tussen de boorgaten moet lopen. De kans is dus klein dat de stroom alleen door de boorvloeistof in het boorgat loopt.

Volgens Bing and Greenhalgh [2000] leveren de AM-BN en AM-NB opstellingen vergelijkbare resultaten op. Dit zal worden getest in de modellering (bijlage A). De AM-BN opstelling is met succes in de praktijk toegepast door Greenhalgh et al. [2000]. Verder worden, in gepubliceerde ERT-onderzoeken, crosshole dipool-dipool opstellingen niet of nauwelijks gebruikt voor milieu-toepassingen.

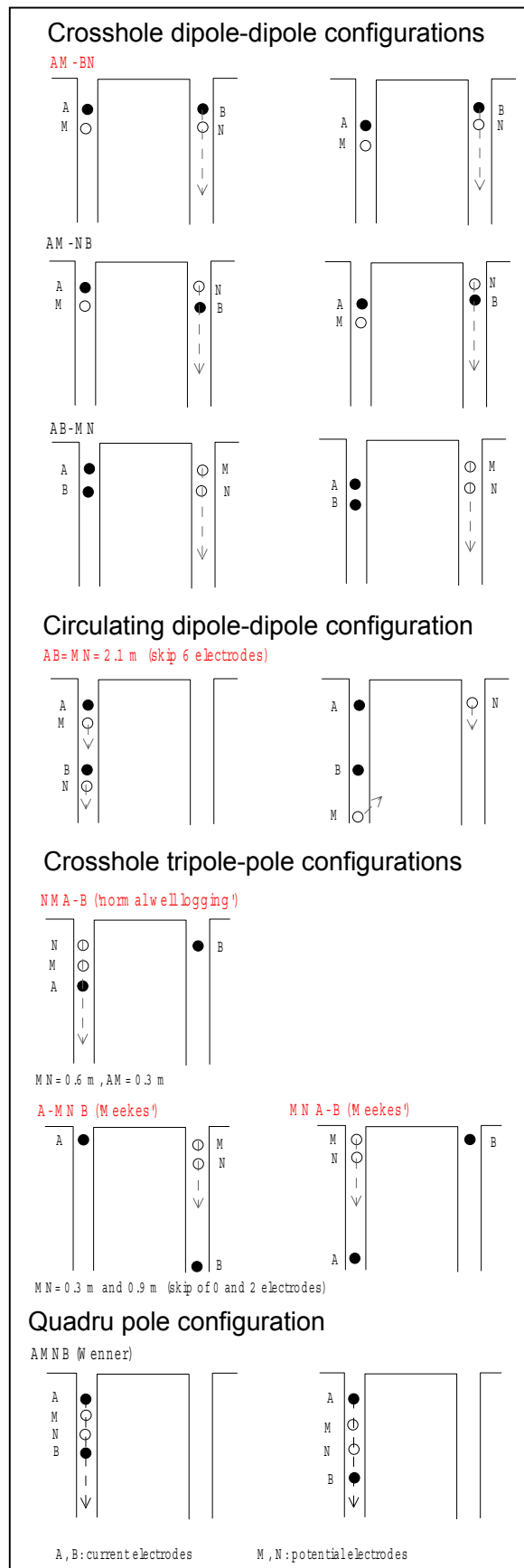


Fig. 5 De mogelijke ERT-opstellingen om de weerstand tussen de boorgaten te karteren (in rood de in het veld toegepaste opstellingen).

3.5.3 *Circulating dipool-dipool opstelling*

In de praktijk worden ERT-metingen bijna altijd uitgevoerd met de circulating dipool-dipool opstelling (AB MN, zie tabel 3). Bij circulating dipool-dipool opstellingen worden niet alleen de AB-MN (crosshole dipool-dipool) opstelling gebruikt (zie paragraaf 3.4.2), maar ook opstellingen waarbij er in één gat 3 of 4 elektrodes zitten (figuur 4). De dipool-dipool opstelling bestaat dus eigenlijk uit de vele meetopstellingen (o.a. AMBN, AMB-N, ABMN, ABM-N, AB-MN, ANB-M en A-BMN). De gebruikte afstanden binnen de dipolen (MN en AB) is meestal groter dan 1 meter. De te gebruiken afstand voor de veldmetingen wordt onderzocht met behulp van de modellering (bijlage A). Een grotere afstand tussen de stroomelektrodes zorgt voor een beter signaal van materiaal op grotere afstanden van de boorgaten en een grotere afstand tussen de potentiaalelektrodes zorgt voor een betere signaal-ruis verhouding [Slater et al., 2000].

Op het eerste gezicht kent deze opstelling een aantal nadelen:

1. Voor die meetopstellingen waarbij stroom- en potentiaalelektrodes in verschillende boorgaten hangen is er, door de grotere afstand tussen beide elektrodeparen, een risico dat de invloed van de stroombanen op de gemeten potentiaalverschillen beperkt is;
2. Voor die meetopstellingen waarbij de stroomelektrodes in hetzelfde gat hangen bestaat er het risico op het lopen van stroom door of vlak langs het boorgat.

Echter, de opstelling wordt door internationaal erkende ERT-experts gebruikt en aangeraden (o.a. A. Binley van de Lancaster Universiteit, UK). Daarom wordt het voor dit onderzoek verstandig geacht om de opstelling naast de te ontwikkelen nieuwe meetopstellingen te gebruiken.

3.5.4 *Crosshole tripool-pool opstellingen*

Bij tripool-pool opstellingen hangen 3 elektrodes in één gat en de vierde elektrode in het andere gat.

De NMA-B en AMN-B opstellingen (figuur 5), zijn geïnspireerd door de 'normal log' boorgatmetingen. De meting is vooral bedoeld om de weerstand vlak om het boorgat te bepalen. Analoog aan de Short Normal (SN) en de Long Normal (LN) opstellingen bij het boorgatmeten wordt er met verschillende afstanden tussen A en M gewerkt (0.3 en 0.9 m). Een voordeel van deze opstelling is dat, met de stroomelektrodes in verschillende boorgaten, de stroom door de bodem moet lopen. De afstand MN wordt genomen op 0.6 m.

In de voor dit project speciaal ontwikkelde 'Meekes' (A-MN B en MN A-B) opstelling zijn beide stroomelektrodes zodanig gepositioneerd dat de stroom zeer schuin door het vlak tussen de boorgaten loopt. De gedachte hierachter is dat hoe verticale de stroomelektrodes staan hoe sterker de stroombanen beïnvloed worden wanneer er horizontale DNAPL-lagen (hoge elektrische weerstand) tussen de boorgaten liggen. De stroom zal dan niet meer de kortste weg volgen en vooral langs de DNAPL stromen. Dit beïnvloedt het patroon van de potentiaallijnen dat in de boorgaten gemeten wordt maximaal.

3.5.5 *Quadru pool opstelling (Wenner)*

Bij quadru pool opstellingen hangen alle elektrodes in één boorgat. Strikt genomen kan er daarom niet meer van een tomografische meting gesproken worden. De AMNB-opstelling (figuur 5) is geïnspireerd door de succesvolle oppervlakkige Wenner. De meting kan, net als de tripool-pool meting, mogelijk worden gebruikt om de elektrische weerstand om het boorgat in kaart te brengen.

De meting kent de volgende mogelijke kanttekeningen:

1. Een risico op het lopen van stroom door de boorvloeistof in plaats van door de formatie.
2. Doordat alle elektroden in hetzelfde gat hangen wordt er om het boorgat in iedere richting gekeken. Er wordt dus niet vooral in de richting van het andere boorgat gekeken.

3.6 Geometrische factor

Bij iedere meetopstelling (2 stroom- en 2 potentiaalelektrodes) hoort een geometrische factor (k). Samen met het gemeten potentiaalverschil (V) en de stroomsterkte (I) wordt hieruit de schijnbare weerstand berekend ($R_a = k \cdot (V/I)$).

De grootte van de geometrische factor hangt af van de relatieve posities van en de afstanden tussen, de vier elektrodes. Voor 2D geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak (een halfruimte) is de geometrische factor eenvoudig te berekenen. Bij ERT-metingen wordt gemeten in een volle ruimte; de elektrodes zijn volledig omgeven door grond en water. Het berekenen van de geometrische factor voor een volle ruimte is gecompliceerder. De berekening is voor dit onderzoek gedaan met behulp van het programma SensInv2D [Fechner, 2001].

Wanneer de geometrische factor groot is ($> \sim 850$) dan is het gemeten potentiaalverschil klein. Kleine potentiaalverschillen zijn relatief gevoelig voor zwerfstromen en/of spontane potentiaal (SP)verschillen. Dus kleine absolute meetfouten in de potentiaalmeting werken, bij grote geometrische factoren, relatief sterk door in de berekende schijnbare weerstand. Daarom is het verstandig de meettabellen van tevoren op te schonen door de metingen met extreem hoge geometrische factoren te verwijderen uit de tabel. De tijdwinst kan dan worden gebruikt om andere metingen uit te voeren.

De geometrische factor is groot als de afstand tussen de stroomelektrodes relatief groot is ten opzichte van de afstand tussen de potentiaalelektrodes en/of als de potentiaalelektrodes, voor een homogene ondergrond, op dezelfde potentiaallijn liggen. Dat komt voor als M en N ongeveer in elkaars spiegelbeeld liggen ten opzichte van de rechte lijn tussen A en B.

3.7 Controlemetingen

Controlemetingen hebben tot doel om de betrouwbaarheid van de meetwaarden en van de elektroden meetopstellingen te controleren. De meetwaarden kunnen onbetrouwbaar worden als gevolg van ruis. Ruis kan de volgende oorzaken hebben: 1) systematische fouten als gevolg van een slecht contact van een elektrode met de bodem; 2) willekeurige fouten gerelateerd aan het meetinstrument; 3) sporadische fouten als gevolg van externe factoren (bijvoorbeeld aarding van een generator, zwerfstromen).

De volgende controlemetingen worden gebruikt:

1. Een aantal metingen wordt 'gestackt' (2 of 3 potentiaalmetingen direct achter elkaar);
2. Een deel van het normale meetprogramma wordt twee keer uitgevoerd;
3. Reciproke metingen. Bij een reciproke meting worden de stroom- en de potentiaal elektrodes omgekeerd. De schijnbare weerstand van beide metingen zou vrijwel gelijk moeten zijn. De reciproke fout (normale schijnbare weerstand min de reciproke schijnbare weerstand) is een maat voor de ruis als gevolg van zwerfstromen of slecht contact van de elektrode met de ondergrond (o.a. [Slater et al., 2000]);
4. Metingen waarmee gecontroleerd kan worden of de spanningen gemeten over de elektroden een coherent beeld vertonen. Hiervoor moet voor één of twee stroomelektrodecombinaties de spanning gemeten worden voor minstens twee potentiaalelektrode-afstanden op alle mogelijke posities.

3.8 Snelheid van de metingen en het maximum aantal metingen

De 9 vlakken (figuur 4) moeten in een beperkt aantal (5-7) dagen bemeten worden. Dit houdt dus in een meettijd van 50-60 uur. Eén dag wordt benut voor het aanbrengen en verwijderen van de kabels en het uitvoeren van de controlemetingen. Er kan dus maximaal ~5 uur per meetvlak gemeten worden. Het geo-elektrische instrument dat door TNO-NITG gekocht is)ABEM SAS4000, www.abem.com [ABEM 1999]) kan 200 (minimaal 2, maximaal 3 stacks) tot 350 metingen (1 stack) per uur uitvoeren. Het maximum aantal metingen per meetvlak is dus 1000-1500 metingen.

3.9 Verwerking van de geo-elektrische data – inversie

De gemeten waardes (V , I) worden, met behulp van een aan de hand van de elektroden meetopstelling bepaalde constante (de geometrische factor k) en de wet van Ohm, omgerekend naar een schijnbare weerstand. Met de schijnbare weerstanden wordt numeriek gemodelleerd in een eindige elementen model. Dit houdt in dat het vlak waarin is gemeten wordt opgedeeld in een groot aantal cellen van gelijke grootte. Per cel wordt vervolgens de werkelijk elektrische weerstand bepaald met behulp van een iteratieve berekening die gebruik maakt van een voorwaartse en inverse modellering. Het resultaat is een 2D profiel met de specifieke (werkelijke) elektrische weerstand van de ondergrond tussen 2 boorgaten over het dieptetraject waar de elektrodes hangen.

Voor de inversie van de meetdata is gebruik gemaakt van het programma SensInv2D dat door TNO-NITG gekocht is [Fechner, 2000], (www.geotomographie.de). Het programma maakt gebruik van de zogenaamde 'Back Projection' inversie. Een andere veel gebruikte, en volgens A. Binley [e-mail 15/12/01] (Lancaster University,) een meer geavanceerde techniek, is de 'Occam - s' inversie (o.a. [Morelli en Labrecque 1996]). De Occam's inversie methode is voor ERT, voor zover bekend, niet verkrijgbaar in een commercieel software pakket, zoals SensInv2D. Bovendien past het aanschaffen van een nieuw software pakket niet binnen het projectbudget. Een deel van de velddata wordt echter ook, ter vergelijking, met de Occam's methode geïnverteerd door A. Binley.

3.10 Resultaten van de modellering

Er is een modellering uitgevoerd met als belangrijkste doelstelling de selectie van een beperkt aantal elektroden meetopstellingen die het meest geschikt zijn voor het detecteren van DNAPL's. In de beperkte meettijd (5-7 dagen) kunnen namelijk niet alle in hoofdstuk 3.5 behandelde elektroden meetopstellingen in het veld worden gemeten. De resultaten van de modellering staan uitgebreid beschreven in bijlage A. De belangrijkste conclusies staan hieronder.

De Meekes meetopstelling zal in het veld worden toegepast omdat deze meetopstelling de beste modelleerresultaten heeft opgeleverd. Het is namelijk de enige meetopstelling die een korte 0.1 m dunne DNAPL-laag heeft waargenomen. Bovendien heeft de meetopstelling relatief weinig meetpunten en dus een beperkte meettijd. De normal well log meetopstelling levert ook redelijk goede modelleerresultaten en heeft een korte meettijd. Deze meettabel zal met name ingezet worden om boorgatmetingen te maken. De circulating dipool-dipool opstelling levert matige tot slechte (Utrecht modellen) en goede (Drenthe modellen) resultaten op. De meetopstelling zal ook in het veld worden ingezet, omdat hij veruit het meest is gebruikt in de ERT-onderzoeken uit de literatuur. De overige meetopstellingen (crosshole dipool-dipool en quadru pool meetopstellingen) leverden matige tot slechte resultaten op in de modellering en zullen daarom nauwelijks in het veld worden gebruikt.

Wanneer de verhouding tussen de lengte in het boorgat waarover de elektrodes hangen en de afstand tussen de boorgaten kleiner wordt dan 1.4 dan neemt de kans op detectie van DNAPL's snel af. Wanneer de verhouding kleiner is dan 1.1 dan is de detectiekans van DNAPL's die niet vlak langs de boorgaten liggen minimaal.

HOOFDSTUK 4

DEMONSTRATIEMETINGEN UTRECHT EN DRENTHE

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de ERT-metingen op de twee demonstratie locaties. Als eerste wordt echter een korte uitleg gegeven over hoe de ERT-figuren geïnterpreteerd moeten worden en over de grondwatermonsters.

4.1.1 *Hoe de ERT figuren te interpreteren*

De individuele kleurenplaatjes in de ERT-figuren zijn 2D doorsneden van de ondergrond (figuren 5, 8 en 11) en kunnen als volgt gelezen worden. Op de x-as staat de positie aan het oppervlak ten opzichte van de boorgaten en op de y-as staat de diepte. De puntjes aan de linker- en rechterkant van plaatjes representeren de elektrodes in beide boorgaten (2 x 16 Utrecht, 2 x 24 Drenthe). Naast de elektrodes staan de boorkolommen met de sediment beschrijving. Hierboven staan de letters van de vijf boorgaten (A, B, C, D, E; plattegrond in figuur 4). De kleuren in de figuren representeren de elektrische weerstand van de ondergrond, zoals deze uit de inversie komt.

Bij het beoordelen van de figuren wordt erop gelet of de weerstanden passen binnen de verwachte range van waarden die horen bij het sediment in de boorbeschrijvingen (tabel 2). Bijvoorbeeld klei en veen hebben een lagere weerstand dan zand (figuur 9). Bij het vergelijken van verschillende elektroden meetopstellingen en inversiemethodes (figuur 8) wordt er ook op gelet welke plaatjes de meeste horizontale patronen laten zien in de isohypsen van de weerstand, omdat de ondergrond over het algemeen ook horizontaal gelaagd is. Zones met een weerstand die minstens ~50 Ohm-m hoger zijn dan de maximale weerstand van de natuurlijke ondergrond (~80 Ohm-m Utrecht, ~120 Ohm-m Drenthe) worden aangemerkt als hoge weerstandsanomalieën (paars gekleurd in de figuren). Hierbij wordt er ook op gelet of patronen terugkomen; bijvoorbeeld een hoge weerstandsanomalie onderin gat B (figuur 9) moet in alle meetvlakken terugkomen (AB, BC, BD en BE). Het gebied midden tussen de twee bovenste en de twee onderste elektrodes wordt, vanwege de lage meetbedekking, minder meegenomen in de beoordeling van de figuren.

4.1.2 *Bemonstering grondwater*

Op basis van de uitkomsten van de ERT-metingen is een bemonsteringsprogramma opgezet voor het grondwater. Doel is de verificatie van het voorkomen van de DNAPL's in de bodem. Voor de monsternamen is geen gebruik gemaakt van normale peilbuizen. Het argument hiervoor is dat bij deze methodiek te veel verdunning kan optreden van de DNAPL verdachte zone (zie paragraaf 2.1). Om dit te voorkomen is gebruik gemaakt van selectieve bemonstering over een traject van 10 cm. Dit beperkt het risico van verdunning aanzienlijk. Voor de bemonstering is gebruik gemaakt van de 'ConeSipper' van de firma Geomet. Het betreft een sonderingstechniek waarbij direct grondwatermonsters worden genomen. De sonde wordt gebracht naar de x,y,z-positie, zoals die volgt uit de ERT-meting. Bij de monsternamen is eerst een referentiemonster genomen in de zone waar, op basis van de ERT-meting, geen DNAPL wordt verwacht. Voor het uitvoeren van de ConeSipper sondering is op locatie Utrecht gebruik gemaakt van een sonde-truck. Op locatie Drenthe is, in verband met de beperkte werkruimte, gebruik gemaakt van een rupsvoertuigje.

De watermonsters zijn direct naar het laboratorium gebracht voor analyse. Bij de analyses zijn tevens de gehalten minerale olie en BTEX bepaald. In tabellen 5 en 7 en figuren 9 en 14 zijn de resultaten vermeld van de analyses voor locaties Utrecht en Drenthe.

4.2 Demonstratie Utrecht

4.2.1 Locatiekeuze en beschrijving locatie Utrecht

Uit de 5 door de Gemeente Utrecht aangedragen locaties is de Reactorweg 11 gekozen. De locatie is in het verleden gebruikt door een groothandel in chemische producten voor de overslag van onder andere VOCL. Op het terrein waren bovengrondse opslagtanks aanwezig voor PER, TRI en methyleenchloride. Er werden op de locatie ook gebruikte vaten opgeslagen. Voor de locatie is inmiddels een saneringsplan opgesteld. De opstart van de sanering is voorzien in het voorjaar van 2003. De hieronder gepresenteerde locatiedata zijn afkomstig uit door Grontmij uitgevoerde onderzoeken.

Deze locatie is gekozen vanwege:

- de beschikbaarheid van veel boor- en monsterdata;
- de goede toegankelijkheid, het onderzoeksgedeelte van het terrein is een parkeerplaats met weinig ondergrondse infrastructuur;
- de mogelijkheid tot het uitvoeren van aanvullende geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak;
- de DNAPL-verontreiniging zit naar verwachting relatief ondiep: 2-6 m-mv;
- de locatie wordt binnen afzienbare tijd gesaneerd, het plaatsen van volkomen filters door de verschillende lagen (en de hiermee mogelijk gepaard gaande additionele verticale verspreiding van de verontreinigingen) stuit daarom niet op bezwaren.

Het grondwaterniveau zit (maart 2002) op ~ 0.85 m-mv. De bodemopbouw van de locatie is weergegeven in tabel 4 en figuur 6. Het onderste zandpakket (sd 3) loopt door tot minstens 40 m-mv.

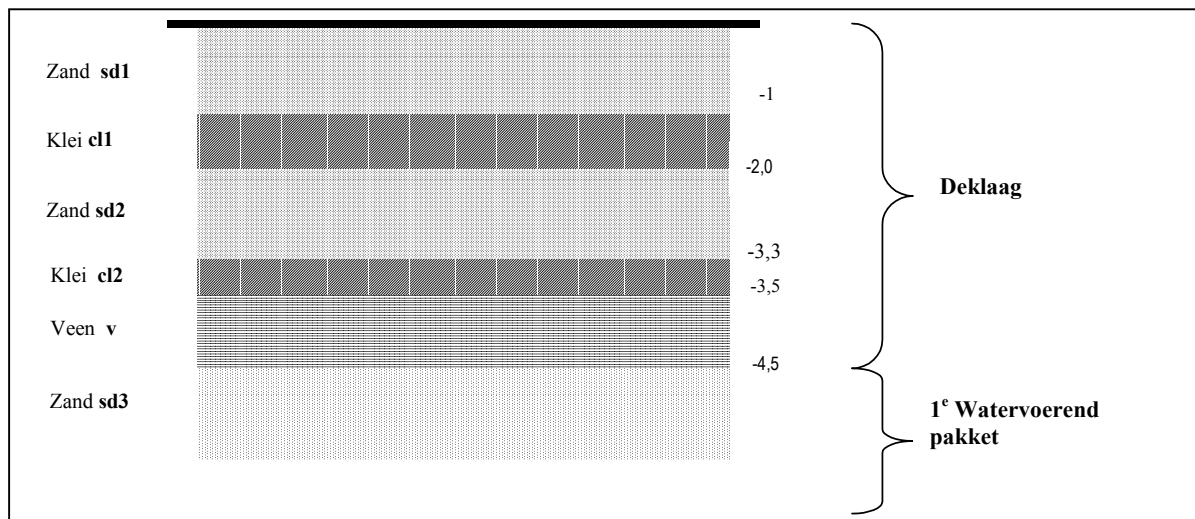


Fig. 6. Schematische bodemopbouw op locatie Utrecht.

Tabel 4. Bodemopbouw in de vijf ERT-boringen op locatie Utrecht.

Afkorting	Beschrijving	A [m-mv]	B [m-mv]	C [m-mv]	D [m-mv]	E [m-mv]
sd 1	klinkers	0-0.1	0-0.1	0-0.1	0-0.1	0-0.1
	grof-zeer grof zand	0.1-1.1	0.1-1.2	0.1-1.2	0.1-1.05	0.1-1
cl 1	siltig klei	1.1-1.7	1.2-1.8	1.2-1.8	1.05-1.8	1-1.8
sd 2	siltig matig fijn zand	1.7-2.8	1.8-2.8	1.8-2.8	1.8-2.9	1.8-2.75
cl 2	humeus klei	2.8-3	2.8-3	2.8-3.1	2.9-3	2.75-3
v	kleiig veen	3-4.7	3-4.65	3.1-4.6	3-4.6	3-4.6
sd 3	siltig matig fijn zand	4.7-6.3	4.65-6.3	4.6-6.2	4.6-6.5	4.6-6.3

Onderzoek in het voorjaar van 2001 heeft aangetoond dat in de veenlaag op de locatie (diepte circa 4 m-mv) VOCl-gehalten in de grond zijn aangetroffen van circa 1000 mg/kg (PER circa 400 mg/kg).

Hierbij viel op dat er relatief weinig afbraakproducten aanwezig waren. Dit resultaat wijst erop dat waarschijnlijk sprake is (geweest) van een DNAPL-zinklaag. Indien er een PER-verontreiniging was ontstaan waarvan de gehalten zodanig waren dat ze meteen volledig in grondwater oplossen (dus geen DNAPL's), dan zou, in het gereduceerd milieu van de bodem, een veel verdere omzetting naar afbraakproducten zijn opgetreden.

De hypothese voorafgaande aan het ERT-veldwerk is dus dat de kans op het aantreffen van een DNAPL het grootst is in de laag sd 2 die boven op de slecht doorlatende laag ligt (cl2/v).

Figuur 7 presenteert een foto met hierop de 5 ERT boorgaten. In bijlage B1 staat een overzicht van het uitgevoerde veldwerk op deze locatie. Foto's van het veldwerk staan in bijlage F1.

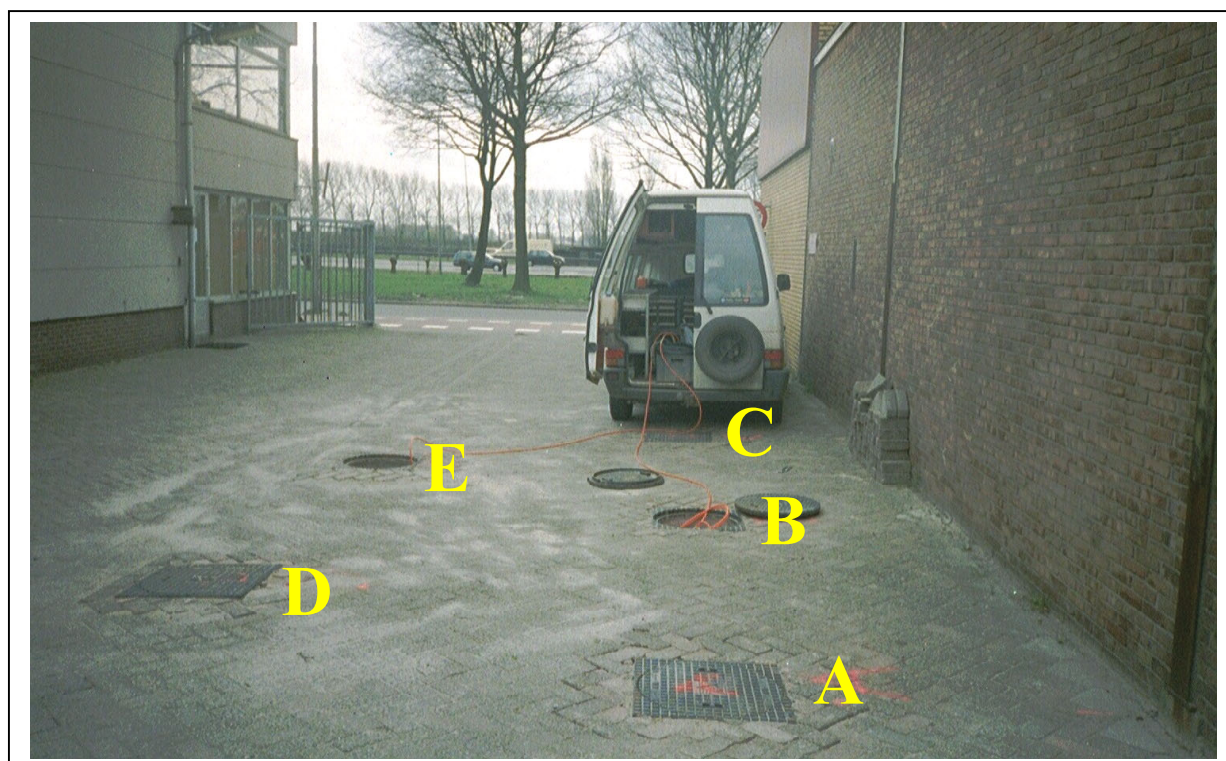


Fig. 7. Veldwerk locatie Utrecht met de 5 ERT boorgaten.

4.2.2 Resultaten oppervlakte geo-elektriek locatie Utrecht

De weerstandsprofielen staan in bijlage D. In de plaatjes staan de schijnbare weerstanden gereleerd aan de elektrode-afstanden (schijnbare diepte, y-as) en de x-positie (x-as).

Vanwege de harde toplaag konden niet alle elektrodes ('tentharingen') voldoende diep in de bodem worden geplaatst. Alle drie de geo-elektrische profielen laten een toplaag (0-~1.5 m-mv) zien met een zeer hoge elektrische weerstand (> 500 Ohm-m). Door deze hoge elektrische weerstand was het lastig de geplande stroomsterkte van 200 mA de grond in te brengen. Bij meer dan 95% van de meetpunten kon slechts 50 of 20 mA stroom de grond in worden gebracht. Een lagere stroomsterkte leidt tot lagere signaal-ruis verhouding. Het derde profiel en in mindere mate het tweede profiel, hebben een slechte data kwaliteit en een grote uitval van meetpunten (zwarte puntjes in de figuren). Dit komt door het slechte elektrische contact tussen de elektrodes en de ondergrond.

Conclusies van de geo-elektrische oppervlaktemetingen die van belang zijn voor de tomografie metingen:

- door de hoge elektrische weerstandstoplaag (> 500 Ohm-m, grof ophoog zand, zie tabel 5) is het op het deze locatie niet verstandig elektroden in boorgaten te combineren met elektroden aan het oppervlak;
- op deze locatie is het niet goed mogelijk dunne (< 0.5 m) hoge weerstandslagen in de diepere ondergrond (DNAPL's) te detecteren met geo-elektriek vanaf het oppervlak;
- de diepere ondergrond (>~2 m-mv) heeft een lagere elektrische weerstand (< 100 Ohm-m), hetgeen bij geo-elektriek tussen boorgaten een goed elektrisch contrast zou moeten geven met de hoge weerstand van de DNAPL-lagen.

4.2.3 ERT op locatie Utrecht

De kwaliteit van de meetdata wordt uitgebreid behandeld in bijlage C1. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de kwaliteit van de meetdata komen hieronder aan bod.

Inversies, elektroden meetopstellingen, weerstand ondergrond en boorgatafstand

In figuur 8 staat voor het vlak tussen boorgaten A en B het weerstandsprofiel voor de vier gebruikte meetopstellingen en twee verschillende inversies (Back Projection en Occams, zie 3.9). Wat opvalt is dat het weerstandsprofiel met de Meekes meetopstelling geologische gezien het meest realistisch is, omdat het siltige zandpakket tussen ~1.7 en ~2.7 m-mv (waargenomen in alle boringen) als een doorlopende laag is afgebeeld. De andere drie meetopstellingen geven voornamelijk informatie vlak om de boorgaten. De Occams inversie (uitgevoerd door A. Binley, Lancaster University) levert vergelijkbare resultaten op als de voor dit project gebruikte Back Projection inversie. Met de Back Projection inversie geeft de Meekes meetopstelling zelfs iets realistischere resultaten. De zandlaag (~2.3 m-mv) krijgt met deze inversie namelijk een hogere weerstand.

De 2D weerstandsprofielen gemeten met de Meekes meetopstelling zijn, voor alle meetvlakken gepresenteerd in figuur 9. De grondwater-monsterpunten staan ook in figuur 9 aangegeven. De analyseresultaten van de grondwatermonsters staan in tabel 5. De resultaten met de andere elektroden meetopstellingen leveren voor alle meetvlakken, net zoals bij vlak AB, geen geologische lagen op (niet in het rapport).

De bovenste zandlaag (~1.7-2.7 m-mv; sd 2 tabel 5) is in bijna alle vlakken op dezelfde diepte afgebeeld als in de boringen (figuur 9). In de buurt van boring C (BC en CE) is de tweede zandlaag echter niet waargenomen in de ERT-metingen. Het is niet duidelijk of dit aan de meting ligt (de meettabel was iets aangepast, omdat 1 elektrode in gat C niet werkte) of dat de zandlaag hier werkelijk afwezig is.

De onderste zandlaag (sd 3, >4.5 m-mv) is niet als continu afgebeld vanwege de beperkte resolutie midden tussen de boringen aan de onder- en bovenrand van ERT-vlakken.

Uit figuur 9 blijkt verder dat binnen de twee lange vlakken (AE en CD, V/H is 0.9 en 0.8) ook geen lagen zijn waargenomen.

De normal well log tabel van de ERT-meting is nuttig gebleken om geo-elektrische boorgatmetingen te maken. De gemeten weerstanden in de boorgatmetingen worden gebruikt om te controleren of de weerstanden in de geïnverteerde ERT-vlakken realistisch zijn. Iedere boorgatmeting is een gemiddelde van 3 of 4 verschillende metingen waarbij de stroomelektrode op afstand (B, zie figuur 5) telkens in een ander gat zit. De standaard deviatie van de boorgatmetingen is klein; 2-7% (figuur 10). Op deze locatie konden geen conventionele boorgatmetingen worden uitgevoerd (bijlage B1).

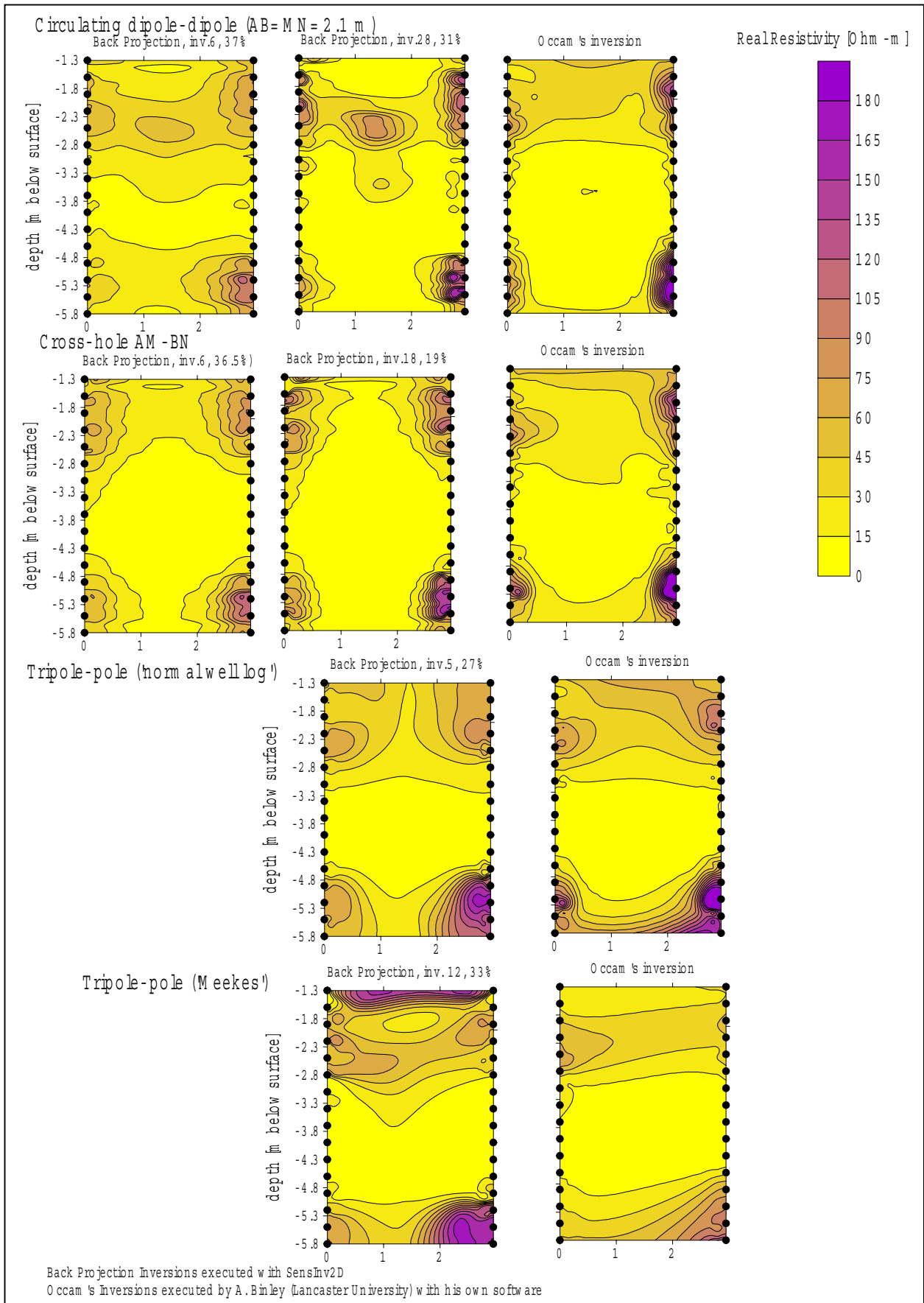


Fig. 8. Vlak AB (locatie Utrecht) met verschillende elektrode meetopstellingen en verschillende inversies.

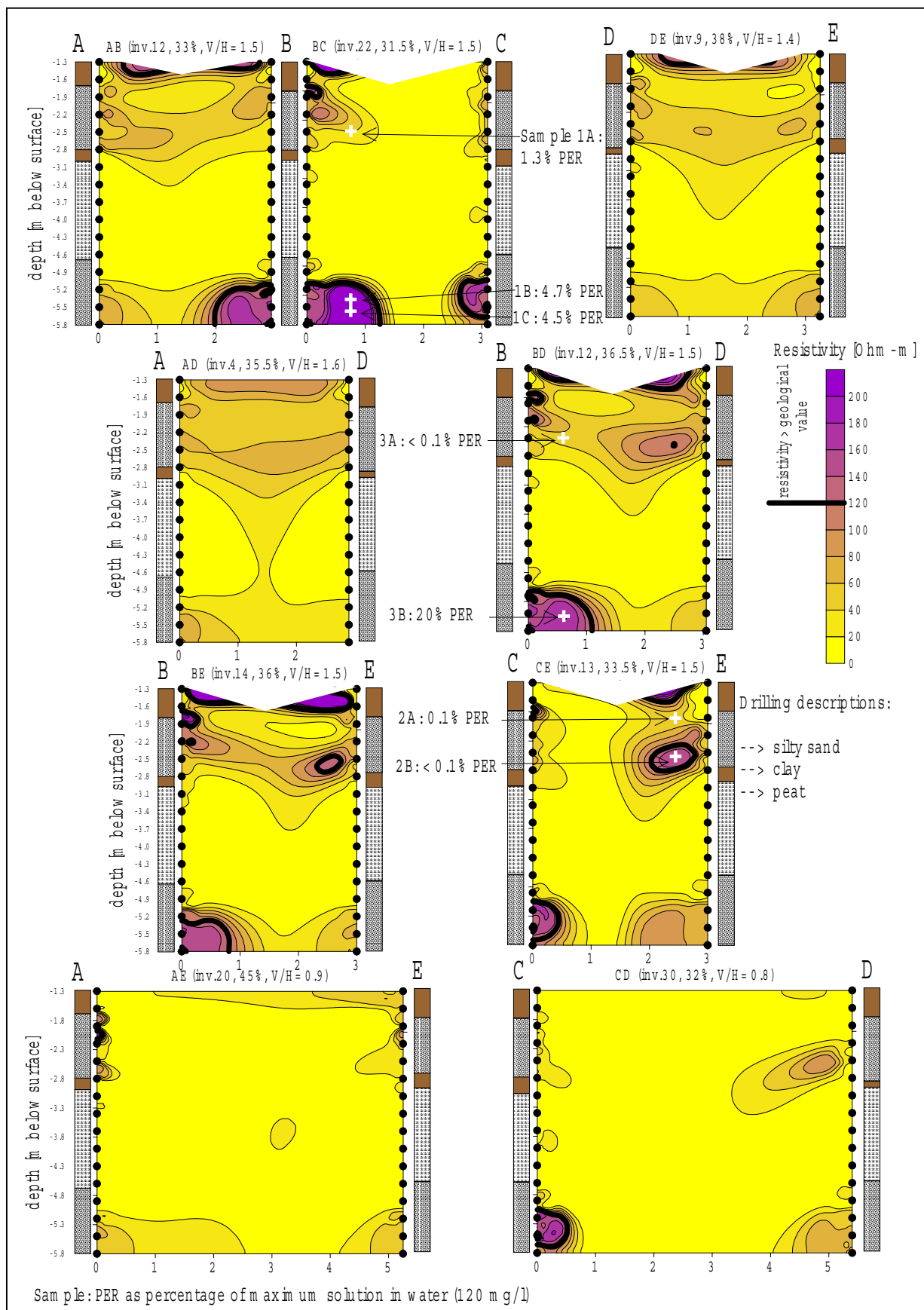


Fig. 9. 2D weerstandsprofielen tussen alle boorgaten voor locatie Utrecht, gedaan met de Meekes meetopstelling.

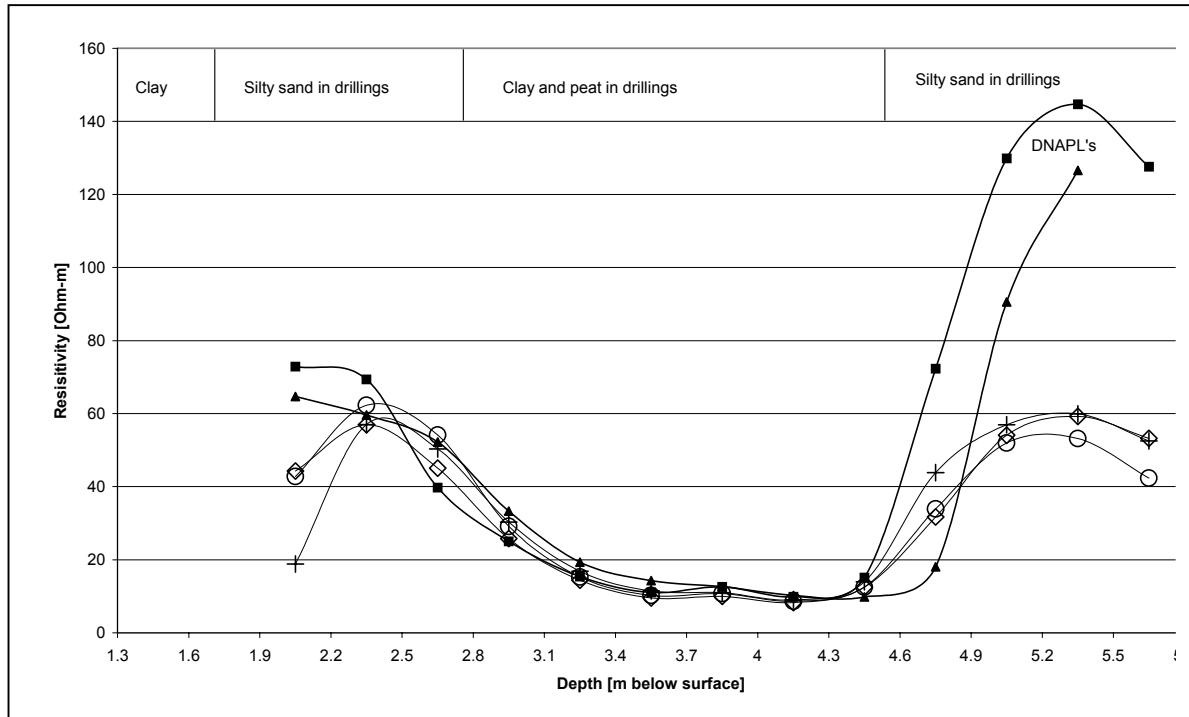


Fig. 10 Geo-elektrische boorgatmetingen met boorbeschrijving in de vijf boorgaten op locatie Utrecht (afgeleid uit de ERT-metingen).

Tabel 5. Analyseresultaten van de grondwatermonsters (lengte ~10 cm) en het percentage van de maximale oplosbaarheid van de component op locatie Utrecht [$\mu\text{g/l}$] (locaties monsterpunten in figuur 9).

no.	Depth m-bs	PER	TRI	CIS	VC	1,1,1-TCA	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	Mineral oil c10-c40
1a	2.5	1600 (1.3%)	760 (<0.1%)	1400 (<0.1%)	370	870	210	64	200	1400
1b	5.4	5600 (4.7%)	1500 (0.14%)	1400 (<0.1%)	180	1700	95	12	56	390
1c	5.6	5400 (4.5%)	940 (<0.1%)	1500 (<0.1%)	290	1300	82	9	45	460
2a	1.9	150 (0.1%)	89 (<0.1%)	210 (<0.1%)	2000	840	12000	80	260	360
2b	2.6	69 (<0.1%)	18 (<0.1%)	280 (<0.1%)	100	150	3400	96	350	260
3a	2.5	36 (<0.1%)	7 (<0.1%)	6200 (0.2%)	440	200	3000	58	1200	0
3b	5.6	24000 (20%)	9300 (0.8%)	2900 (<0.1%)	260	140000	840	89	360	0

Lokaliseren van DNAPL-bronzones

Voor het lokaliseren van DNAPL-bronzones is gezocht naar hoge weerstandsanomalieën in de profielen en de boorgatmetingen. Er zijn één grote en één kleine anomalie waargenomen. De drie grondwater monstertrajecten zijn zo gekozen dat er 2 monsters (eigenlijk 3, maar 2 monsters liggen bijna op dezelfde positie) uit de grote anomalie en 1 monster uit de kleine anomalie zijn genomen. Tevens zijn erboven de verhoogde anomalieën, in ieder van de drie monstertrajecten, referentie monsters genomen (figuur 9).

De eerste en meest uitgesproken hoge weerstandsanomalie (120-250 Ohm-m) wordt waargenomen in het gebied van het tweede zandpakket in en om boorgat B (figuur 9; AB, BC, BD, BE: 5.1-5.5 m-mv) en in mindere mate bij boorgat C op dezelfde diepte (BC en CE). De boorgatmetingen bij B en C (figuur 10) laten ook een verhoogde weerstand (130-145 Ohm-m in plaats van 50-60 Ohm-m) zien op deze diepte. De grondwatermonsters (tabel 5, figuur 9) in dit traject laten een matig (1b/c: ~5% van de maximale oplosbaarheid in water) tot sterk (3b: 20%) verhoogd PER-gehalte zien. Monster 3b laat ook een sterk verhoogd gehalte 1,1,1-TCA zien (maximale oplosbaarheid heeft een grote range; tabel 1).

De minimale concentraties VOCl in het grondwater, die een aanwijzing vormen voor de aanwezigheid van DNAPL's variëren, volgens de literatuur [Weyting e.a., 2000] van minder dan 1% tot 10% van de maximale oplosbaarheid. De gemeten PER concentraties bij 3b bevestigen dat de verhoogde weerstand in deze zone wordt veroorzaakt door puur product DNAPL. De PER-gehalten van de referentiemonsters (1a en 3a) boven de DNAPL-zone zijn een stuk lager (1.3% en <0.1% van de maximale oplosbaarheid). De gevonden DNAPL was vooraf niet verwacht op deze diepte. De DNAPL is gesitueerd boven in een dik zandig pakket (sd 3: 4.6 - >10 m-mv) onder, in plaats van bovenop, de klei-veen laag (cl2/v: 2.8-4.6 m-mv).

Het gebied waar de DNAPL aanwezig is, is weergegeven in het kaartvlak in figuur 11. Ondanks dat de hoge weerstandslaag tussen B en C niet continu is in figuur 9, is hij in de praktijk waarschijnlijk wel continu, omdat de resolutie van ERT beperkt is midden tussen de boorgaten aan met name de onder- en bovenkanten van het meetvlak. Er is tevens een 3D weergave gemaakt van de 7 korte meetvlakken met de verhoogde weerstand (figuur 12).

Een tweede kleinere verhoogde weerstandsanomalie (140-160 Ohm-m) is waargenomen in het ondiepe zandpakket (sd 2) op ~2.5 m-mv en ~0.6 m van boorgat E richting boorgat C (figuur 9: CE en in mindere mate BE). Deze anomalie ligt op de van tevoren verwachte DNAPL-diepte boven op de kleilaag (top ~ 2.8 mv). Monsterpunten boven en in deze anomalie (2a en 2b) tonen aan dat de weerstandsverhoging niet veroorzaakt is door een DNAPL. Waarschijnlijk is het sediment hier veel grover waardoor lokaal een hogere weerstand ontstaat. Mogelijk speelt ook de aanwezigheid van minerale olieproducten in het grondwater of aan de grond een rol bij de anomalie.

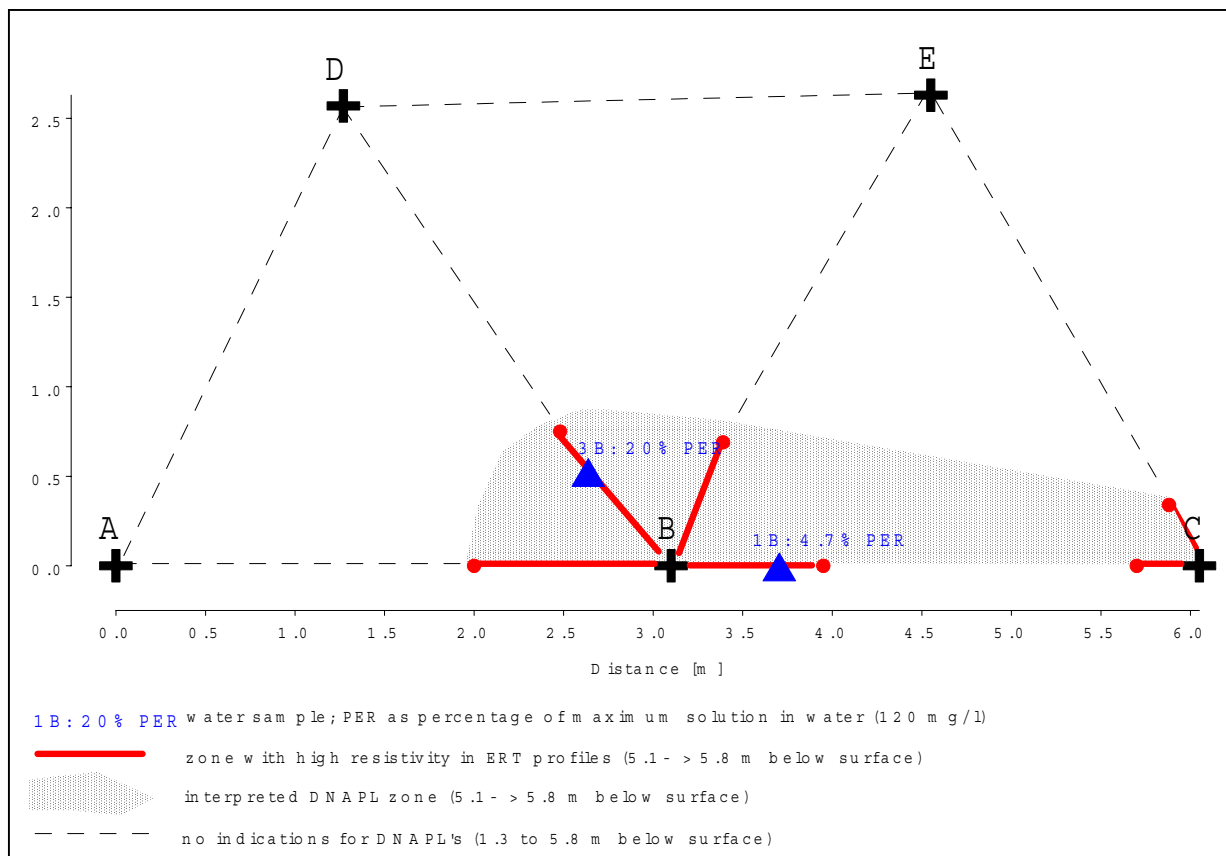


Fig. 11. Locatie van de in de ERT-metingen op locatie Utrecht aangetroffen DNAPL-bronzone.

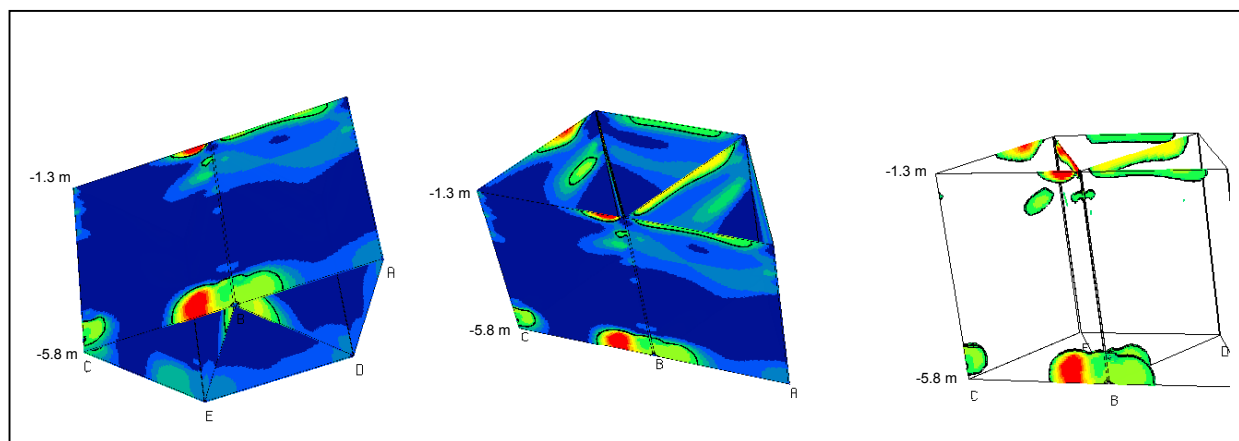


Fig. 12. Semi-3D afbeelding van de 7 ondiepe (1.3-5.8 m-mv) ERT-meetvlakken tussen de boorgaten A t/m E op locatie Utrecht (omlijnde zones >120 Ohm-m).

Conclusies van het ERT veldwerk op locatie Utrecht

Resultaten

In de ERT-profielen zijn één grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands anomalie (120-250 Ohm-m) binnen een ondergrond met een lagere elektrische weerstand (40-70 Ohm-m). De grotere anomalie zit in het diepere zandpakket in en om boorgat B (~ 5.5 m-mv). De kleinere anomalie zit in het ondiepe zandpakket naast boorgat E (~ 2.7 m-mv). De grotere ano-

malie is ook zichtbaar in de elektrische boorgatmeting, terwijl de kleinere anomalie te ver naast het boorgat ligt om zichtbaar te zijn in de boorgatmeting. Grondwatermonsters hebben aangetoond dat de grote anomalie is veroorzaakt door een DNAPL. De kleine weerstandsanomalie heeft een andere oorzaak (waarschijnlijk grover sediment).

ERT vergeleken met eerder bodemonderzoek en implicaties voor sanering

Op basis van eerder bodemonderzoek, met name grondwatermonsters uit peilbuizen, was het vermoeden geuit dat er mogelijk DNAPL's aanwezig zijn op de locatie. De ERT-metingen bevestigen dit vermoeden. De aangetroffen DNAPL ligt echter niet, zoals verwacht, boven op de slecht doorlatende laag, maar hieronder in een over het algemeen goed doorlatend zand pakket. Dit is nieuwe waardevolle informatie die van groot belang is voor een effectieve sanering (M. Stolzenburg, Gemeente Utrecht). De onttrekkingsystemen voor de ophanden zijnde sanering van de locatie zijn aangepast aan dit nieuwe inzicht. De meerwaarde van ERT in vergelijking tot het eerder uitgevoerde bodemonderzoek is dus de markering van een brongebied met x-y-z coördinaten.

Praktische conclusies betreffende de ERT-metingen

De Meekes tabel is de enige meetopstelling die een profiel van de ondergrond met geologische lagen oplevert. Een bijkomend voordeel van de tabel is dat de meettijd in vergelijking met de twee andere gebruikte meetopstellingen (crosshole AM-BN en circulating dipool-dipool) relatief kort is. De Meekes tabel is wel erg kwetsbaar voor onnauwkeurigheden en het is daarom verstandig om vooraf voornamelijk metingen te selecteren met beperkte k-factoren. Tevens is het doen van zoveel mogelijk dubbelmetingen aan te raden.

De Back Projection (Universiteit van Lancaster) inversie geeft vergelijkbare resultaten als de voor dit project gebruikte Occam's inversie methode. Voor de Meekes tabel lijkt de Back Projection inversie methode iets meer realistische waarden te geven.

De normal well log tabel is nuttig gebleken om geo-elektrische boorgatmetingen samen te stellen voor de boorgaten.

Het doen van dubbelmetingen geeft, vanwege de relatief grote afwijkingen, een beter inzicht in de nauwkeurigheid van de metingen dan gestackte metingen.

De aangeraden minimale V/H om een goed beeld van de ondergrond te krijgen ligt dicht bij de 1.5 dan bij de 0.85.

In verband met het ontwikkelen van een aanslag op de elektrodes is het verstandig de elektrodekabel op verontreinigde locaties zo kort mogelijk in de grond te houden.

Er moet een zodanig toezicht zijn op de boorploeg dat de peilbuizen goed geplaatst worden. Dit is nodig, omdat de peilbuizen iets anders dan gebruikelijk ingericht moeten worden (filterkous, dubbele draad door haak onderin gat, dieptes volkomen filters van de verschillende gaten exact gelijk etc.).

4.3 Demonstratie Drenthe

4.3.1 Locatiekeuze en beschrijving

Provincie Drenthe heeft twee potentiële ERT-onderzoekslocaties, Coevorden en Emmen, voorgedragen. Locatie Coevorden is een leegstaande fabriekshal. Er lopen drukke wegen over/langs locatie Emmen. Voor het uitvoeren van boringen/metingen zou (een deel van) het verkeer moeten worden stilgelegd. Met name vanuit het oogpunt van de toegankelijkheid is daarom voor locatie Coevorden gekozen. De buiten gebruik zijnde fabriekshal in Coevorden, is van een

catie Coevorden gekozen. De buiten gebruik zijnde fabriekshal in Coevorden, is van een voormalig galvaniseerbedrijf en ligt aan de Parallelweg 27.

Het grondwaterniveau ligt op ~2.4 m-mv (juni 2002). De ondergrond bestaat voornamelijk uit siltig zand met grindige zand lagen (~3-10 m-mv en >22 m-mv). Met uitzondering van de toplaag (0-2.75 m-mv) zijn er geen lagen aangetroffen waar potentiële DNAPL's zich zouden kunnen ophopen. De exacte bodemopbouw van de 5 ERT-boringen staat in tabel 6. Tussen 2 en 6 m-mv is er bij alle boringen een PER en TRI geur waargenomen.

Tabel 6. Bodemopbouw in de vijf ERT-boringen op locatie Drenthe.

Beschrijving	A [m-mv]	B [m-mv]	C [m-mv]	D [m-mv]	E [m-mv]
beton	0-0.25	0-0.25	0-0.25	0-0.25	0-0.25
humeus zand, silt, klei	0.25-1.5	0.25-2.75	0.25-2.5	0.25-2.75	0-2
siltig en grindig zand		2.75-8		2.75-6.5	2-6
siltig zand			2.5-7.25	6.5-8	6-7.5
grind		8-8.5		8-8.25	
siltig en grindig zand			7.25-7.75	8.25-12.5	7.5-9
siltig zand	1.5-22.5	8.5-10.5	7.75-23	12.5-25	9-23
siltig en grindig zand	22.5-25	10.5-25	23-25		23-25

* 2-6 m-mv in alle boringen een PER en TRI geur

Onderstaande beschrijving van de locatie is gebaseerd op een door Iwaco geleid onderzoek [Iwaco, 2001]. Naar dit rapport wordt ook verwezen voor nadere informatie over de verontreiniging op de locatie.

Tijdens het productieproces zijn grote hoeveelheden PER in de bodem terechtgekomen. In twee peilbuizen in de hal (5 en 6), is 10 jaar geleden in het ondiepe grondwater (3-4 m-mv) een PER-concentratie gemeten (150000 en 130000 µg/l) die ongeveer gelijk is aan de maximale oplosbaarheid in water [DHV, 1992]. Dit duidt er op dat er DNAPL's aanwezig kunnen zijn (of waren). Het vermoeden is dat beide peilbuizen in of in de buurt van het brongebied van de verontreiniging liggen. Vanuit dit brongebied is PER en zijn omzettingsproducten dieper in de bodem weggezakt. Een deel van de verontreiniging is aangetroffen tussen 17 en 22 m-mv (Membrane Interface Probe, 20 tot 25 m stroomafwaarts van peilbuis 5, in 2000). Waarschijnlijk worden deze hoge gehalten op deze diepten veroorzaakt door een iets fijner laagje zand dat aanwezig is in het traject van 21-24 m-mv.

De hypothese, voorafgaande aan het ERT-veldwerk, is dat er in de ondiepe ondergrond (2-8 m-mv) oude DNAPL's kunnen zitten waarvan een deel kan zijn weggezakt naar grotere diepten (17-24 m-mv).

De vijf ERT-boringen zijn, volgens het in figuur 4 getoonde patroon, vlak naast één van de peilbuizen met de ondiepe verontreiniging geplaatst (peilbuis 5 ligt ~1.5 m buiten vlak AD). De filters voor de ERT-metingen zijn op 2 dieptes geplaatst: de diepte waarop de bronzone verwacht wordt (2.5-9.5 m-mv) en de diepte waarnaar waarschijnlijk een deel van de verontreiniging weggezakt is (17-24 m-mv). De diepe grondwaterverontreiniging is aangetroffen op circa 20 m stroomafwaarts van de galvanohal. Aangezien niet duidelijk is hoe de verspreiding plaatsvindt in de zone tussen de 5 en 25 m-mv, bestaat er een gerede kans dat de DNAPL's op grotere diepe niet zijn gesitueerd tussen de ERT-meetpunten. De DNAPL kan, afhankelijk van het patroon van de minder permeabele lagen, niet recht maar onder een hoek van de bronzone richting MIP-2 zijn gezakt. Vanwege locatie-omstandigheden (muren, smalle doorgangen tussen verschillende fabriekshallen, kruipruimtes, etc) en de maximale aanbevolen afstand van ~5 m tussen de ERT-

boorpunten kon het boorpunten grid niet verder richting MIP-2 of over peilbuis 5 geplaatst worden.

Op locatie Drenthe zijn, in tegenstelling tot locatie Utrecht, per boorgat alle 24 elektrodes op de kabel gebruikt voor de meting. Het verticale traject waarover de elektrodes hangen is 6.9 m lang. figuur 13 presenteert een foto met hierop de 5 ERT-boorgaten. Het op deze locatie uitgevoerde veldwerk staat beschreven in bijlage B2. Foto's van het veldwerk staan in bijlage F2.

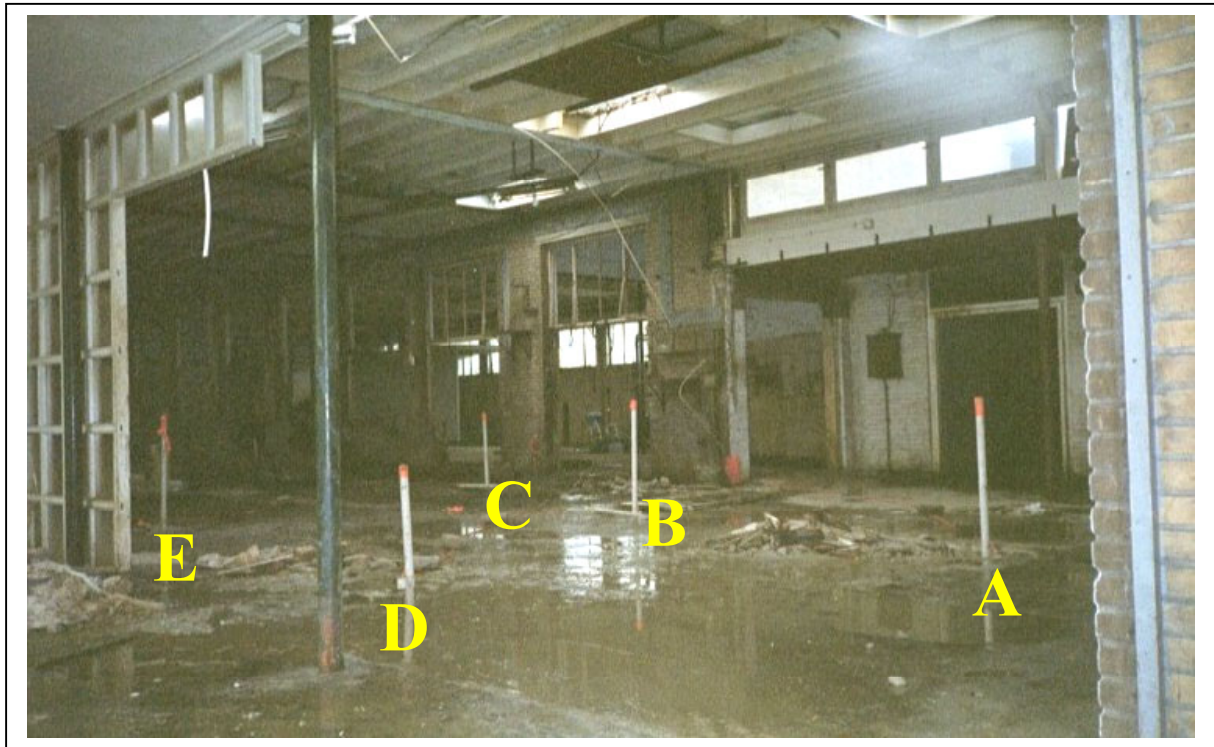


Fig. 13. Veldwerk locatie Drenthe met de 5 ERT-boorgaten.

4.3.2 ERT op locatie Drenthe

De kwaliteit van de meetdata wordt uitgebreid behandeld in bijlage C2. De belangrijkste conclusies met betrekking tot de kwaliteit van de meetdata komen hieronder aan bod.

Elektroden meetopstellingen, weerstand ondergrond en boorgatafstand

Bijlagen E1 en E2 presenteren de geïnverteerde weerstanden van de ondiepe en diepe meetvlakken voor de gebruikte Meekes en circulating dipool-dipool meetopstellingen. Beide meetopstellingen geven een vergelijkbare weerstandsverdeling van de ondergrond. Er is echter één verschil; de circulating dipool-dipool meetopstelling laat midden tussen de boorgaten vaak een weerstandsverlaging zien, terwijl de Meekes meetopstelling meer horizontale weerstandspatronen oplevert. Het lijkt er dus op dat de resolutie van de circulating dipool-dipool meetopstelling midden tussen de boorgaten beperkt is. Horizontale structuren komen beter overeen met de laagtheid van de ondergrond.

Voor de ondiepe meetvlakken staan de weerstandsprofielen, gemeten met de Meekes meetopstelling, ook in figuur 14. De grondwater-monsterpunten staan ook in figuur 14 aangegeven. De analyseresultaten van de grondwatermonsters staan in tabel 7.

Drie boringen bestaan in het ondiepe traject (B, D en E) voornamelijk uit grindig en siltig zand en twee boringen bestaan voornamelijk uit siltig zand. Dit sediment past bij de gemeten elektrische weerstanden van 50 tot 120 Ohm-m (figuur 14 en figuur 15, de hoge weerstandsanomalieën worden hieronder besproken). De lithologische verschillen en contrasten in (soortelijke) elektrische weerstand tussen de lagen zijn te beperkt om lagen in boringen en lagen in ERT-metingen éénduidig aan elkaar te koppelen.

In de diepe meetvlakken (bijlage E2) laten de Meekes metingen en de boorgatmetingen (bijlage C2) van ondiep naar diep een geleidelijke weerstandstoename zien van ~30 Ohm-m (17.5 m-mv) naar 50-60 Ohm-m (~21-24.5 m-mv). Dit komt overeen met de boorbeschrijvingen die rond 22.5 m-mv een overgang van siltig naar grindig zand laten zien (tabel 6).

De meeste in bijlage E gepresenteerde ERT-vlakken (Meekes), behalve BC-ondiep, laten horizontale lagen zien. Zoals vooraf verwacht, is het bij een langer traject met elektrodes (V) dus inderdaad mogelijk de boorgaten verder uit elkaar te zetten (m.a.w. H groter te maken). De in de literatuur aanbevolen minimale V/H verhouding van 1.5 is in Drenthe gevolgd (V/H is 1.4 tot 1.9).

Lokaliseren van DNAPL's

Voor het lokaliseren van DNAPL-bronzones is gezocht naar hoge weerstandsanomalieën in de profielen en de boorgatmetingen. In de bodemlaag tot 9,5 m-mv zijn twee grote en één kleine anomalie waargenomen. In het dieptetraject van 17 tot 24 m-mv zijn tussen de 5 ERT-boorpunten geen anomalieën waargenomen. In deze laag heeft geen verder onderzoek plaatsgevonden. De resultaten van de ERT-metingen in dit dieptetraject zijn weergegeven in bijlage E2.

De drie grondwater monstertrajecten zijn zo gekozen dat er uit alle drie de anomalieën monsters zijn genomen. Tevens zijn er boven de verhoogde anomalieën referentiemonsters genomen (figuur 15).

De analyseresultaten van de monsters staan in tabel 7. Alle grondwatermonsters, inclusief de referentiemonsters, bevatten hoge PER-gehalten (15 tot 166% van de maximale oplosbaarheid). Alle monsters bevatten zodanig hoge PER-gehalten dat ze duiden op de nabijheid van DNAPL's. Het is echter wel zo dat de hoogste gehalten het dichtst bij de DNAPL verwacht worden.

PER-percentages boven de 100% duiden op de aanwezigheid van druppeltjes puur product DNAPL in de grondwatermonsters.

In de ondiepe ERT-profielen (2.55-9.45 m-mv) zijn drie zones met een verhoogde weerstand (150-400 Ohm-m) waargenomen (figuur 14):

1. *Een diepere zone (7.5 tot >9.45 m-mv)*. De hoogste weerstanden (300-400 Ohm-m), of de kern, van deze zone zit rond boorgat A. De zone loopt door tot ongeveer halverwege vlak AB en tot onder in boorgat D. De zone is ook, maar met veel lagere weerstanden (~160 Ohm-m), waargenomen vanaf boorgat D ongeveer 1.5 m richting boorgaten B en E. Monster 3B (125% maximale PER-oplosbaarheid) ligt in de kern van de zone met de hoogste elektrische weerstand (~400 Ohm-m). Monster 1B (33%) ligt in een deel van de zone met een iets lagere weerstand (~275 Ohm-m). Zeker gezien het extreem hoge PER-gehalte in monster 3B kan geconcludeerd worden dat de hoge weerstanden zijn veroorzaakt door een DNAPL-bronzone. De DNAPL-zone ligt in siltig zand. De verhoogde weerstanden zijn ook aangetroffen in de boorgatmetingen (figuur 15, onderin log A en in mindere mat onderin log D).

2. *Een ondiepere zone in en ongeveer 1.2 m rondom boorgat D (4.3-6.3 m-mv).* De twee grondwatermonsters in deze zone (2B en 2F) laten zeer hoge PER-gehalten zien (respectievelijk 66 en 117% maximale oplosbaarheid). Het hoogste PER-gehalte wordt echter een halve meter onder deze zone gemeten (6.85 m-mv; monster 2C: 166%). Omdat de weerstand van de ondergrond op het monsterpunt niet bijzonder hoog is (~120 Ohm-m), is het zeer waarschijnlijk dat het extreem hoge gehalte in dit watermonster gevoed is door de hierboven gelegen DNAPL bronzone. Mogelijk is tijdens de monstername met behulp van de conesipper een gedeelte van de DNAPL meegevoerd naar dit monsterpunt. De DNAPL bevindt zich in siltig en grindig zand en ligt op een siltige zandlaag. De verhoogde weerstanden zijn ook aangetroffen in de boorgatmeting (figuur 15). De anomalie in de boorgatmeting is zeer hoog (340 Ohm-m).
3. *Onder in boorgat D (~7.4-7.7 m-mv)* is nog een kleine zone (enkele dm) met een verhoogde weerstand (~180 Ohm-m) waargenomen. In monster 2D, dat uit deze zone genomen is, is een zeer hoog PER-gehalte gemeten (150%). Dit duidt er dus op dat op deze positie een DNAPL aanwezig is. Deze DNAPL is waarschijnlijk omlaag gezakt vanuit de hierboven genoemde grotere zone 2. De zone is ook enigszins zichtbaar op de boorgatmeting (figuur 15, log D).

De drie DNAPL-zones staan in het kaartvlak in figuur 16. Er is tevens een 3D figuur gemaakt van de 7 meetvlakken met de verhoogde weerstand (figuur 17).

In de diepe ERT-metingen (17.2-24.1 m-mv, bijlage E2) zijn geen zones met een verhoogde weerstand aangetroffen. Omdat er in dit diepe traject dus geen aanwijzingen voor DNAPL-zinklagen zijn, zijn de metingen in minder detail uitgewerkt. Vlak om enkele elektrodes (1 in A, 1 in D en 1 in E) is wel een iets verhoogde weerstand gemeten (ruim 100 Ohm-m, Meekes meetopstelling). Deze weerstandsverhogingen zijn echter niet zichtbaar in de circulating dipool-dipool metingen of in de boorgatmetingen (bijlage C2). De weerstandsverhogingen hebben waarschijnlijk te maken met een verminderd contact tussen de elektrode en de ondergrond.

Opvallend bij de bestudering van de analyseresultaten is dat er nog steeds sprake is van een vrij zuivere PER. De gehalten van TRI, CIS en VC zijn verwaarloosbaar ten opzichte van het gehalte PER (tabel 7) Tevens valt op dat de DNAPL's nog steeds prominent aanwezig zijn in de zone van 4 tot 9 m-mv. De gehalten wijken niet veel af van degene die circa 10 jaar geleden zijn vastgesteld. Hoewel niet kan worden uitgesloten dat dieper ook DNAPL's aanwezig zijn, lijkt op de locatie de verticale migratie van DNAPL's niet snel te verlopen.

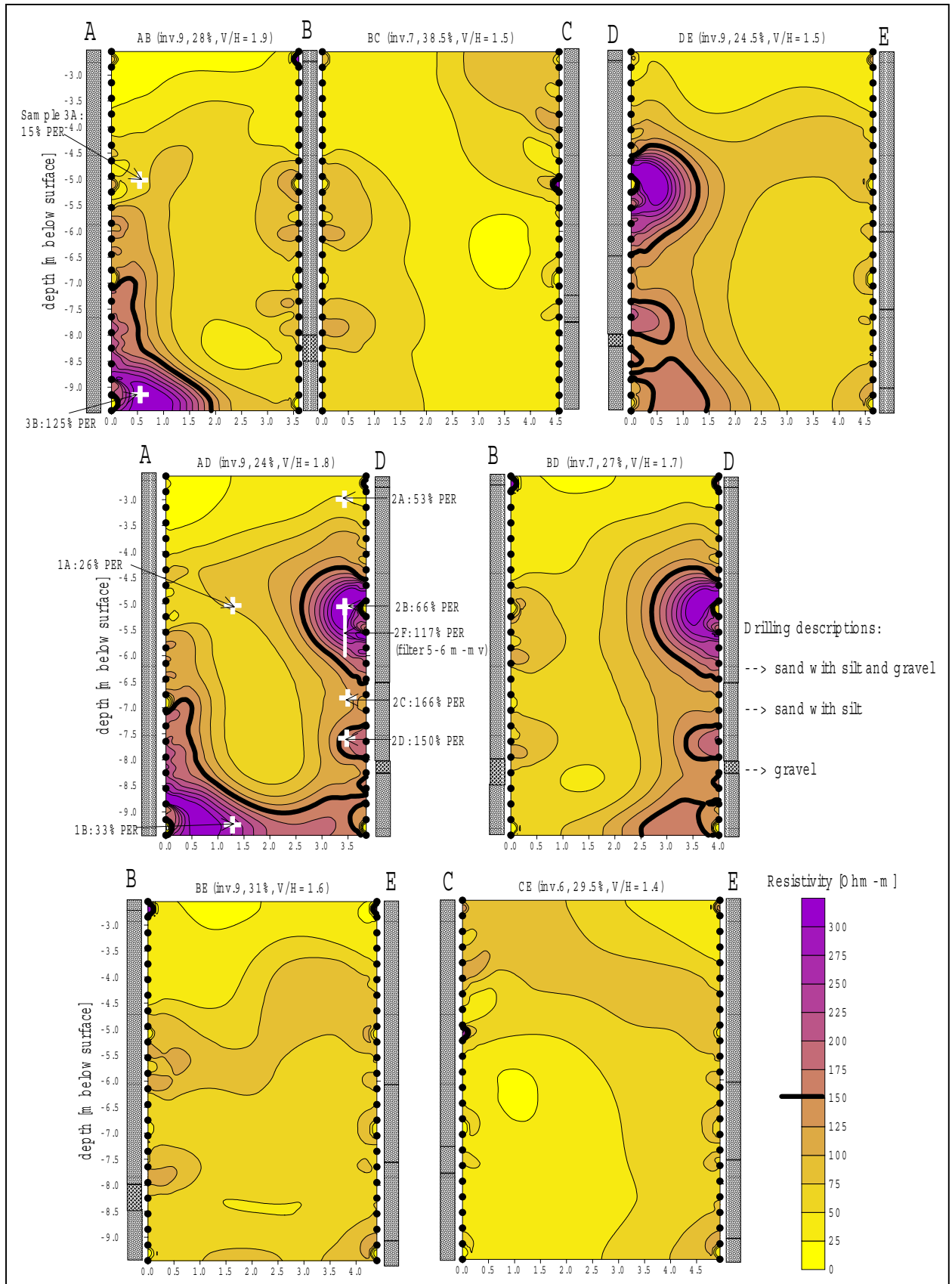


Fig. 14. 2D weerstandsprofielen tussen alle boorgaten voor locatie Drenthe-ondiep (Meekes meetopstelling).

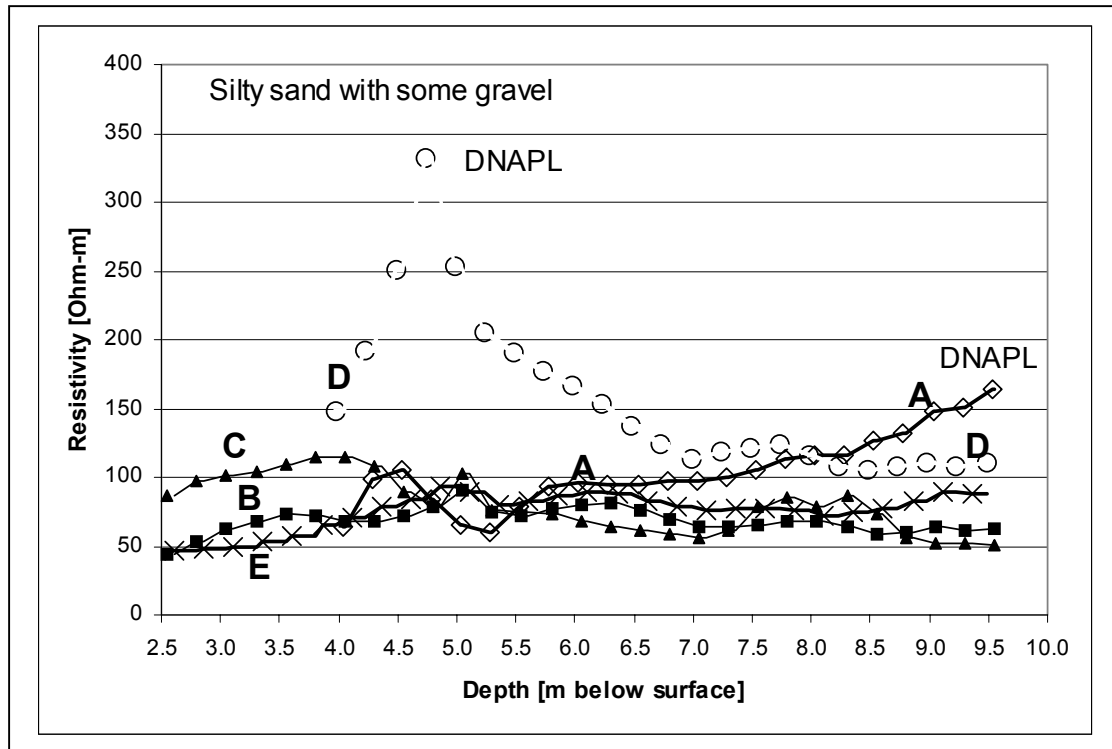


Fig. 15. Geo-elektrische boorgatmetingen (SN) in de vijf boorgaten op locatie Drenthe-ondiep.

Tabel 7 Analyseresultaten van de grondwatermonsters (lengte ~10 cm) op locatie Drenthe [$\mu\text{g/l}$] (locaties monsterpunten in Figuur 14).

no.	Depth m-bs	PER	TRI	CIS	VC	Chloroform	TRANS
1a	5	31000 (26%)	6300 (0.06%)	5300 (0.02%)	160	<10	630
1b	9.15	40000 (33%)	680 (<0.01%)	150 (<0.01%)	<200	46	<40
2a	3	64000 (53%)	150 (<0.01%)	68 (<0.01%)	<100	<10	8
2b	4.95	79000 (66%)	610 (<0.01%)	160 (<0.01%)	<200	<40	<40
2c	6.85	200000 (133-166%)	4100 (0.04%)	1500 (<0.01%)	<200	<40	340
2d	7.65	180000 (120-150%)	2400 (0.02%)	1300 (<0.01%)	<200	<40	<40
2f	5-6 (filter)	140000 (93-117%)	810 (<0.01%)	400 (<0.01%)	<200	<40	<40
3a	5	18000 (15%)	5400 (0.05%)	3700 (<0.01%)	100	<20	59
3b	9.2	150000 (100-125%)	2500 (0.02%)	560 (<0.01%)	<200	<40	<40

1.1 en 1.2-dichloorethaan, 1.1.1 en 1.1.2-trichloorethaan, tetrachloormethaan: alle monsters <40 $\mu\text{g/l}$
dichloormethaan, 1.2-dichloorpropaan: alle monsters <200 $\mu\text{g/l}$

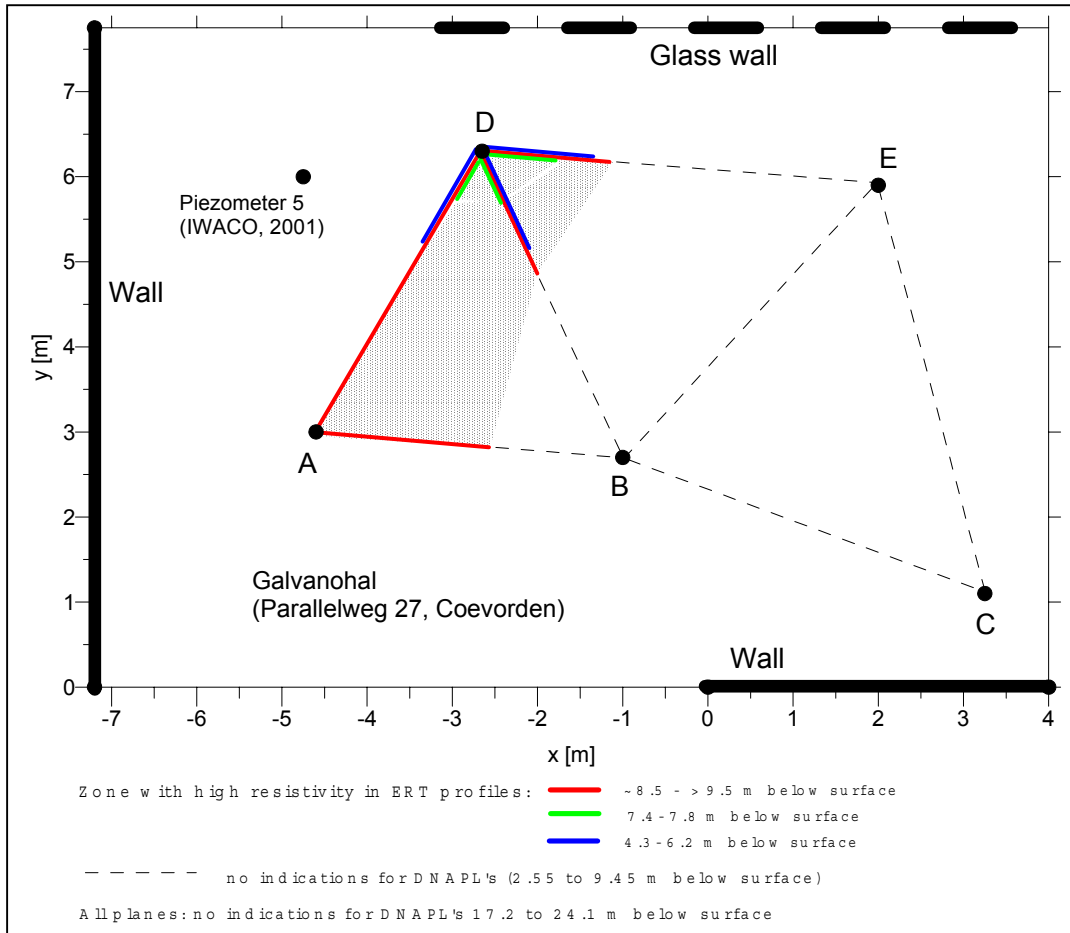


Fig. 16. Locaties van de in de ERT-metingen aangetroffen DNAPL-bronzones op locatie Drenthe-ondiep.

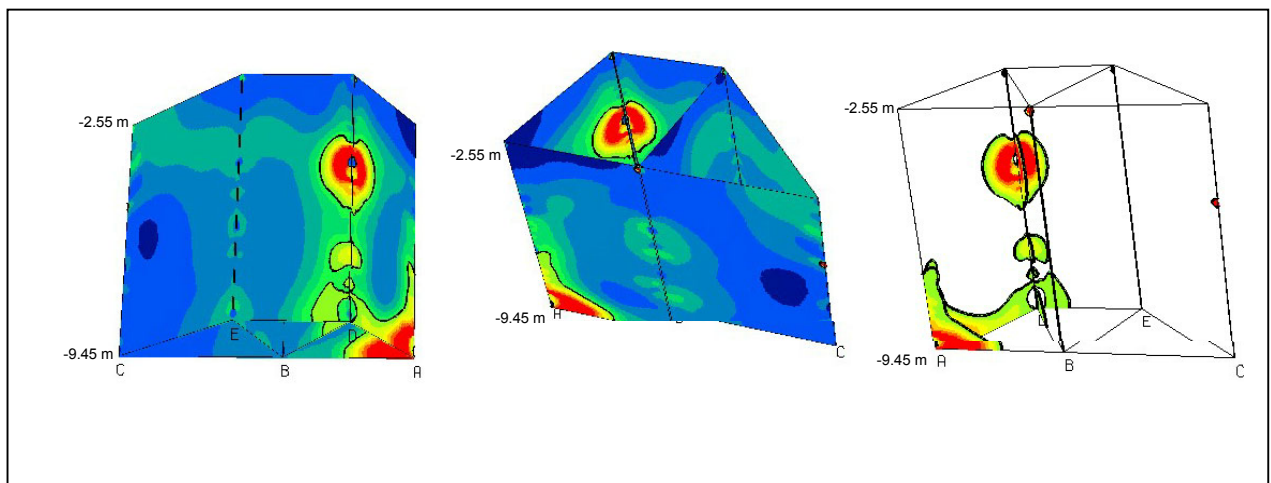


Fig. 17. Semi-3D afbeelding van de 7 ondiepe (2.55-9.45 m-mv) ERT meetvlakken tussen boorgaten A t/m E op locatie Drenthe (omlijnde zones >150 Ohm-m).

Conclusies van het ERT-veldwerk op locatie Drenthe

Resultaten

In de ondiepe (2.55-9.45 m-mv) ERT-metingen zijn twee grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands anomalie (150-400 Ohm-m) binnen een ondergrond met een lagere elektrische weerstand (50-120 Ohm-m). De grootste anomalie zit in een siltig zandpakket onder in boorgat A en (7.5 tot >9.45 m-mv) strekt zich uit tot halverwege richting boorgat B en tot net voorbij boorgat D.

De andere grote anomalie zit in en ongeveer 1.2 m rondom boorgat D (4.3-6.3 m-mv) en ligt op een siltige zandlaag. Hier vlak onder ligt weer een kleine anomalie. DNAPL's werden vooraf ook verwacht op deze diepte (2-10 m-mv), echter de locatie was onbekend.

Alle grondwatermonsters, inclusief de referentiemonsters, bevatten zeer hoge gehalten PER (tot 166% van de maximale oplosbaarheid). De gehalten bij alle monsters duiden op DNAPL's. Het is echter wel zo dat de hoogste gehalten in of zeer dicht bij de zinklagen verwacht worden. Drie van de vier grondwatermonsters bevatten extreem hoge PER-gehalten (117-150% van maximale oplosbaarheid) en komen ieder uit één van de drie zones met een hoge weerstand. Deze zones representeren met zeer grote zekerheid DNAPL's. Het hoogste PER-gehalte (166%) wordt echter een halve meter onder een DNAPL gemeten. Omdat de weerstand van de ondergrond op het monsterpunt niet bijzonder hoog is (~120-m), is het zeer waarschijnlijk dat het extreem hoge gehalte afkomstig is van de erboven gelegen DNAPL. Waarschijnlijk is tijdens de bemonstering met de conesipper een verticaal transport opgetreden van de DNAPL.

Het feit dat er in Drenthe grotere weerstands anomalieën zijn gemeten (150-400 Ohm-m) dan op locatie Utrecht (120-250 Ohm-m) is in overeenstemming met de veel hogere PER-gehalten in het grondwater op locatie Drenthe (>100% maximale oplosbaarheid) dan op locatie Utrecht (5-20%).

In de diepe ERT-profielen (17.2-24.1 m-mv) zijn, in tegenstelling tot de hypothese voor het veldwerk, geen aanwijzingen voor DNAPL's aangetroffen.

ERT vergeleken met eerder bodemonderzoek en implicaties voor sanering

Net als voor locatie Utrecht geldt ook voor locatie Drenthe dat op basis van eerder bodemonderzoek het aannemelijk was dat DNAPL's aanwezig zouden zijn. De precieze diepte en omvang konden op basis van het conventioneel bodemonderzoek echter niet worden vastgesteld. Ter plaatse van de 5 boringen is de locatie van de DNAPL's nauwkeurig vastgesteld met ERT over twee diepte trajecten (2.55-9.45 en 17.2-24.1 m-mv).

In het oorspronkelijk ontwerp voor de sanering is uitgegaan van het voorkomen van DNAPL's rond 5-10 m-mv en rond 20-23 m-mv. Daarom was voorzien in het toepassen van persluchtinjectie op deze twee diepteniveaus (10 en 23 m-mv). Nu de resultaten van ERT aangeven dat er op 20-23 m-mv geen aanwijzingen zijn voor het voorkomen van DNAPL's ter plaatse van de ERT-boringen in de galvanohal zal het ontwerp aangepast worden (pers.com. A. Nipshagen, Royal Haskoning).

Praktische conclusies betreffende de ERT-metingen

De Meekes en de circulating dipool-dipool meetopstellingen geven een sterk vergelijkbare weerstandsverdeling van de ondergrond. De Meekes meetopstelling geeft echter meer horizontale lagen, hetgeen geologisch realistischer is.

De kwaliteit van de geo-elektrische data op locatie Drenthe was erg goed, (beter dan Utrecht) dit komt doordat: bij alle metingen de grootste stroomsterkte kon worden gebruikt (door een beter

contact met de ondergrond?), meetpunten met grote k-waardes (>820) van tevoren uit de tabel waren gehaald en er door de vele dubbelmetingen (met name de Meekes meetopstelling) foute meetwaardes goed konden worden onderscheiden van aan de ondergrond gerelateerde afwijkingen in meetwaardes.

De SN (Short Normal) en Long Normal (LN) weerstanden van de boorgatmetingen komen goed overeen met de SN-weerstanden, gemeten met de boorgatmeettabel van de ERT-opstelling. De ERT-metingen zijn dus betrouwbaar. De LN (Long Normal) waardes van de boorgatmeettabel komen minder goed overeen en hoeven in de toekomst dus niet gemeten te worden.

Het is bij een langer traject met elektrodes (V) inderdaad mogelijk de boorgaten verder uit elkaar te zetten (m.a.w. H groter te maken) met behoud van beeld midden tussen de boorgaten. De in de literatuur aanbevolen minimale V/H verhouding van 1.5 is in Drenthe gevolgd.

Locatie Drenthe was permanent toegankelijk voor de geo-elektrische metingen. Het veldwerk kon, door het geo-elektrische instrument lange meetdagen (~16 uur) te laten maken, veel efficiënter worden uitgevoerd dan op locatie Utrecht (deze locatie was slechts 8 uur per dag toegankelijk).

De ervaring op locatie Drenthe heeft uitgewezen dat de meetkabel zichzelf door zijn eigen gewicht strak trekt wanneer alle 24 elektrodes in het gat hangen en de onderkant van de peilbuis een stuk dieper (>0.5 m) zit dan de onderste elektrode. Het aanbrengen van touwen in de peilbuis met een dergelijke diepte om de kabel strak te trekken is dan niet nodig.

VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE DNAPL-OPSPORINGSTECHNIEKEN

De technieken om DNAPL's op te sporen worden hieronder kort besproken.

5.1 Monsters

Monsters zijn grondwatermonsters (genomen met peilbuis of conesipper) en bodemmonsters. Grondwatermonsters genomen uit peilbuizen of minifilters zijn puntmetingen (0D). Grondwatermonsters genomen met een conesipper en bodemmonsters gecombineerd met Sudan Roodkleur Indicator kunnen ook 1D (kolom) worden uitgevoerd.

5.1.1 *Grondwatermonsters*

Hoge verontreinigingsgraden in het grondwater (o.a. PER en TRI) kunnen een indicatie zijn voor het stroomopwaarts aanwezig zijn van een DNAPL-zinklaag. De waterverontreinigingen kunnen bepaald worden met behulp van een conesipper of filters.

Kanttekeningen bij deze methode zijn (gebaseerd op o.a. [Domenico en Schwartz 1998, Weyting e.a., 2000]):

1. Het zijn puntmetingen en het gevaar bestaat dat net naast de hoge concentratie in de pluim een monster wordt genomen. Er zijn dus zeer veel puntmetingen nodig om een bronzone te karteren;
2. Wanneer er een verhoogde verontreinigingsconcentratie (o.a. PER en TRI) in het grondwater is gemeten dan is er nog geen duidelijkheid over de afstand van de DNAPL tot het meetpunt;
3. De minimale verontreinigingsconcentraties in het grondwater die een aanwijzing vormen voor de aanwezigheid van DNAPL's variëren volgens de literatuur [Weyting e.a., 2000] van minder dan 1% tot 10% van de in tabel 1 gepresenteerde oplosbaarheid;
4. Indien de DNAPL niet uit slechts één product bestaat, maar uit een mengsel, zal de verontreiniging in het grondwater ook slechts een percentage zijn van de maximale oplosbaarheid van de betreffende DNAPL. Lagere concentraties kunnen dan óók duiden op de aanwezigheid van puur product;
5. Er moet rekening worden gehouden met dispersie en diffusie;
6. Het doorboren van een DNAPL-bronzone kan bij het uitvoeren van een puntmeting, als gevolg van verticale verspreiding, leiden tot een te hoge gemeten concentratie in de diepte.

Grondwatermonsters (0-D) kunnen ook geanalyseerd worden op DNAPL's. DNAPL's kunnen in peilbuizen terechtkomen als de peilbuis in of vlak naast een DNAPL-zinklaag staat.

5.1.2 *Bodemmonsters*

Bodemmonsters kunnen, met name wanneer ze in een eventuele zinklaag zitten, worden geanalyseerd op DNAPL's. Het nadeel van bodemmonsters is dat ze bij los sediment niet altijd goed in de monsterbus blijven zitten (zoals op locatie Utrecht). Bodemmonsters hebben als grote voordeel dat het directe metingen zijn van de DNAPL-zinklaag.

Sudan (IV) Roodkleur Indicator kan worden gebruikt op bodemmonsters en verkleurt bij de aanwezigheid van DNAPL's. De indicator kan bijvoorbeeld gebruikt worden op boorkernen (www.flut.com).

5.2 Sonderingen

Sonderingen zijn 1D metingen (kolom). De verschillende sonderingen die aanwijzingen voor DNAPL's kunnen opsporen zijn:

1. Membrane Interfase Probe Sonderingen (MIP), deze sonderingen kunnen vluchtige koolwaterstoffen detecteren;
2. Optische sonderingen, deze sonderingen kunnen zichtbare DNAPL's visueel waarnemen;
3. Diëlectrische constante sonderingen, deze sonderingen meten een verlaging in de diëlektrische constante bij de meeste DNAPL's;
4. Oliesonderingen, deze sonderingen meten Poly Aromatische Koolwaterstoffen die onder instraling van UV-licht fluoriseren.

De sonderingen staan uitgebreid beschreven in tabel 8.

5.3 Monsters - semi-3D

5.3.1 *Partitioning Interwell Tracer Test*

Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) is recent toegepast in het NOBIS-project PITT [Hetterschijt et al., 2000]. De werking van PITT berust op het volledig doorstromen van een DNAPL-bronzone met een conservatieve tracer en met een DNAPL-reagerende (participerende) tracer. Verschillen in doorbraak die worden gemeten in een netwerk van peilbuizen geven een 2D of 3D beeld van de DNAPL-verzadigingsgraad.

De kanttekeningen bij de methode zijn (o.a. gebaseerd op [Hetterschijt e.a., 2000]):

1. Het kan voorkomen dat de tracer niet langs de DNAPL stroomt;
2. Indien de DNAPL-bronzones slecht bereikbaar zijn voor de tracers zal het grootste gedeelte van de tracers en dus ook de participerende tracer al voorbij de DNAPL-bronzone zijn gestroomd voordat er lokaal een evenwichtssituatie is bereikt;
3. De tijdstippen van monsternamen zijn zeer belangrijk; indien de tracer doorbreekt in de peilbuizen voordat er monsters worden genomen dan is het experiment mislukt of wanneer er te weinig monsters zijn genomen dan is de doorbraakcurve moeilijk interpreteerbaar;
4. De invloed van veen op de participerende tracer is niet bekend;
5. Er moet een min of meer stationaire stromingssituatie zijn tijdens het experiment.

5.3.2 *Dynamisch monitoren*

Een recent ontwikkelde opsporingstechniek is 'dynamisch monitoren'. De techniek is toegepast in het NOBIS-project DNAPL-KAR [Weytingh et al., 2000]. De methode is oorspronkelijk ontwikkeld als hulpmiddel om trage 'pump & treat' saneringen aan te passen.

Dynamisch monitoren is een interpretatiemethode van concentratiemetingen, waarbij de gemeeten verontreinigingen (bijvoorbeeld PER en TRI) in grondwatermonsters worden gerelateerd aan de herkomst van het bemonsterde grondwater. Door de grondwaterstroming, ten gevolge van variaties in grondwateronttrekking(en), van richting te veranderen kan uit dezelfde filter water worden bemonsterd dat afkomstig is uit een ander gebied. Op deze manier kan met een beperkt aantal puntmetingen een indicatie worden gekregen van de locatie van een bronzone.

Kanttekeningen bij deze methode zijn:

1. De methode kost veel tijd;
2. Er moet gepompt worden op de locatie;
3. Naar aanleiding van de resultaten kan het nodig blijken om extra peilbuizen te plaatsen voor een nadere kartering van de bronzone;
4. Kanttekeningen 3-5 onder sectie 5.4.1.

5.4 Geofysica

Geofysische metingen leveren 2D doorsneden van de ondergrond (vlakken). Wanneer de vlakken dicht bij elkaar liggen kunnen ze beschouwd worden als semi-3D data. De geofysische methodes die beoordeeld zijn op hun vermogen DNAPL's op te sporen zijn:

1. ERT, het onderwerp van dit rapport;
2. Continue Verticale Elektrische Sonderingen (CVES), 2D geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak;
3. Georadar, een techniek om contrasten in diëlektrische constanten op te sporen;
4. Hoge Resolutie Seismiek, metingen die lagen met contrasterende dichtheden of seismische snelheden opleveren.

De geofysische metingen staan uitgebreid beschreven in tabel 8.

5.5 Toelichting bij tabel met DNAPL opsporingstechnieken

Tabel 8 presenteert 13 technieken om DNAPL's op te sporen. De technieken zijn gerangschikt naar dimensie (0D, 1D en semi-3D) en soort (monsters, sonderingen en geofysica). Voor de technieken zijn 11 eigenschappen en criteria ingevuld. De data in deze tabel zijn gebaseerd op literatuur (o.a., [Weytingh e.a., 2000], [Hetterschijt e.a., 2000] en dit rapport] en de voor dit onderzoek gehouden expertmeeting (hoofdstuk 1).

Eén van de criteria in de tabel is de richtprijs van de techniek (criterium E). Deze richtprijs is opgesteld voor twee hypothetische verontreinigingssituaties. Het gaat hierbij om een gebied van ~1000 m² waarvoor op basis van historische informatie een verkennend onderzoek is uitgevoerd. Het verkennend onderzoek bestaat uit 15 boringen waaruit grondwater- en bodemonsters zijn genomen. De analyses hebben DNAPL's aangetoond in 3 van de 15 boringen. De vraag is: wat is richtprijs van de betreffende techniek om de DNAPL's nabij de 3 boringen in kaart te brengen? Hierbij worden twee situaties onderscheiden; een ondiepe (~5 m-mv) en een diepe (~15 m-mv) verontreiniging.

5.6 Het gebruik van DNAPL opsporingstechnieken in bodemonderzoek

5.6.1 De plaats van semi 3D technieken in het bodemonderzoek

In het algemeen zal een bodemonderzoekstraject naar het mogelijk voorkomen van DNAPL's op verontreinigde locaties bestaan uit twee of drie fases.

- 1) Een verkennend onderzoek
Een verkennend onderzoek, bestaande uit een historisch onderzoek en een aantal puntmetingen (0D en/of 1D) en/of sonderingen.
- 2) Het nader in kaart brengen
Het nader in kaart brengen van de verdachte plekken waar verontreinigingen zijn aangetroffen. Dit kan gebeuren door meer 0D of 1D technieken in te zetten of door een semi-3D onderzoekstechniek in te zetten. Het uitvoeren van meer 0D, of conventionele, metingen is standaard in de 'bodemwereld'. De technieken zijn namelijk bekend bij de eindgebruiker en relatief goedkoop. 1D metingen worden nog relatief weinig uitgevoerd, maar er is wel groei in de inzet van deze technieken.
- 3) Een saneringsgericht onderzoek
Een saneringsgericht onderzoek heeft geen status en wordt slechts uitgevoerd bij de overtuigingskracht van de probleembezitter of de adviseur. Wanneer blijkt dat er sprake is van de noodzaak tot een sanering wordt er in de bodemwereld bijna altijd van uitgegaan dat het conventionele onderzoek voldoende data heeft opgeleverd om de sanering goed uit te voeren. Hier zit in veel gevallen een probleem, omdat uit dit rapport duidelijk naar voren is gekomen (Utrecht en Drenthe) dat de locaties van DNAPL's in de bodem niet kunnen worden

vastgesteld met conventioneel bodemonderzoek. Voor een succesvolle aanpak van DNAPL's is kennis over de locaties van brongebieden echter essentieel om tot een goed ontwerp van de (in-situ) saneringstechnieken te komen. In deze context dienen semi 3D technieken, zoals ERT, gezien te worden als een techniek die het mogelijk maakt om een verdenking van DNAPL's te verifiëren en deze te lokaliseren voor een gerichte sanering.

5.6.2 *Verschillende semi-3D technieken vergeleken*

De semi-3D technieken, die staan beschreven in tabel 8, worden hieronder vergeleken.

De meeste geofysische technieken (CVES, GPR en HRS) hebben geen groot perspectief om op grote schaal te worden ingezet om DNAPL's op te sporen, omdat de technieken zich nog niet bewezen hebben voor deze toepassing (HRS). Voor de meeste situaties geldt dat deze geofysische technieken niet in staat zijn de DNAPL's adequaat in kaart te brengen, omdat de verontreinigde locaties te heterogeen zijn en/of teveel antropogene objecten bevatten.

ERT en PITT hebben een onderscheidend vermogen dat veel hoger is dan van dynamisch monitoren. ERT heeft een veel hogere ruimtelijke resolutie (dm) dan PITT (5 m) en dynamisch monitoren (10 m). Aan de andere kant bestrijken PITT en dynamisch monitoren een groter gebied dan ERT. PITT en ERT hebben ook als voordeel, ten opzichte van dynamisch monitoren, dat ze een gradatie geven voor de DNAPL-concentratie. De meettijd van ERT is veel lager (dagen) dan dynamisch monitoren (3-6 maanden) of PITT (1-3 maanden). PITT heeft de hoogste richtprijs (60-65.000 Euro), dan volgen ERT (50-60.000 Euro) en dynamisch monitoren (40-50.000 Euro). Dynamisch monitoren wordt vanwege de lange meettijd, de beperkte resolutie en het beperkte onderscheidend vermogen niet vaak ingezet. Dynamisch monitoren is het overwegen waard in combinatie met een pump en treat sanering. Echter, met name de hoge prijs beperkt de kans voor PITT om op grote schaal in te zetten. De richtprijs voor PITT kan waarschijnlijk nauwelijks omlaag doordat de uitvoering van de techniek al zeer efficiënt is. Voor diepere (vanaf 8 á 10 m-mv) verontreinigingsproblemen stijgt de prijs van puntmetingen waardoor ERT, volgens de expertmeeting, de enige beschouwde semi-3D techniek met perspectief om op grotere schaal ingezet te worden.

Deze conclusie is gebaseerd op: de hoge ruimtelijke resolutie, de korte meettijd en de mogelijkheid de richtprijs omlaag te brengen. Zoals uitgevoerd in dit project is namelijk nog geen efficiëntieslag over ERT gegaan (zie aanbevelingen hoofdstuk 6.2).

5.6.3 *De economie van ERT*

In de huidige situatie kan ERT niet financieel concurreren met een conventioneel bodemonderzoek dat tot doel heeft de omvang van de verontreiniging te bepalen. Dit moet ook niet worden nagestreefd aangezien dan veelvuldig zal worden geconstateerd dat ERT geen meerwaarde heeft (geen DNAPL's aanwezig). ERT wordt pas interessant wanneer uit eerder onderzoek is gebleken dat er sprake is van een saneringsnoodzaak en wanneer er DNAPL's aanwezig kunnen zijn. De inzet van ERT kan eenvoudig worden gespiegeld aan een reductie van de saneringskosten die worden bereikt. Bovendien speelt de bodemopbouw van een locatie een belangrijke rol.

De volgende bodemopbouwfactoren zijn van belang bij de overweging om ERT in te zetten:

- Indien sprake is van een slecht doorlatende bodem zal de saneringsoplossing snel worden gezocht in ontgraving van grond. De exacte lokalisering van DNAPL's is dan weinig relevant voor de sanering;
- Wanneer sprake is van een heterogene bodemopbouw, zoals tijdens dit project op locatie Utrecht, kan ERT absoluut een meerwaarde hebben. Op locatie Utrecht leek de saneringsaanpak voor de deklaag, waar de DNAPL werd verwacht, vooraf duidelijk. Het vinden van een DNAPL onder de deklaag was onverwacht, maar achteraf zeer relevant;

- De meerwaarde van ERT op locaties waar DNAPL's zich relatief ongehinderd verticaal kunnen verspreiden is groot. Op voorhand is duidelijk dat de uitvoering van een sanering op deze locaties erg duur is. Het is dan ook niet verbazingwekkend dat veel van deze locaties nog niet gesaneerd zijn. De uitkomsten van ERT laten zich direct vertalen naar minderkosten bij de sanering door optimale plaatsing van onttrekkingsystemen en een kortere saneringsduur.

In de nabije toekomst zijn er aanpassingen te verwachten die de inzet van ERT economischer zullen maken. Het betreft onder andere reductie in de kosten die gemoeid zijn met het plaatsen van de elektroden en het efficiënter maken van de verwerking van de data (hoofdstuk 6.2).

Tabel 8. Toepasbaarheid van de verschillende DNAPL-opsporingstechnieken.

Technieken	Monsters (0D of 1D)				Sonderingen (1D)				Monsters (semi 3D)			Geofysica (2D of semi 3D)				
	1	2	3A	3B	4	5	6	7	8	9A	9B	10	11	12	13	
Criteria	Grondwatermonster uit filter (0D)	Grondwatermonster met conesipper	Bodemmonsters	Bodemmonsters + Sudan rood kleurindicator	Membrane Interfase Probe sondering (MIP)	Optische sondering, camerasonde	Dielectrische constante sondering	ROST, Oliesonde	Filters + dynamisch monitoren	Filters + Partitioning Interwell Tracer Test (PITT)	Filters + Interfacial tracer test	Electrical Resistivity Tomography (ERT)	Continue Vertikale Elektrische Sonderingen (CVES)	Georadar (GPR)	Hoge Resolutie Seismiek (HRS)	
A	Korte omschrijving techniek	Grondwatermonsters uit (mini)filters analyseren op verontreinigingen.	Grondwatermonsters met conesipper nemen die in grond gedrukt wordt, hierna analyse in lab.	Bodemmonster nemen in monsterbus bij boring, hierna analyse in lab.	Kleurindicator verkleurt bij aanwezigheid van DNAPL's in bodemmonster.	Het analyseren van in een sondeerconus opgevangen, bodemgas op vluchtige koolwaterstoffen.	DNAPL visueel waarnemen met camera in sondeerkop.	Meeste DNAPL's veroorzaken afname in de dielectrische constante, opsporen met speciale sondering.	Onder instraling van UV licht fluoriseren Poly Aromatische Koolwaterstoffen, opsporen met speciale sondering.	Grondwatermonsters uit (mini)filters analyseren bij verschillende pompregimes.	Het monitoren van een conservatief en met DNAPL's reagerende tracer in verschillende filters.	Een tracer test waarmee de vorm van DNAPL's wordt bepaald, residuair of zaklagen.	DNAPL's hebben hoge elektrische weerstand, opsporen met geoelektriek tussen boorgaten.	DNAPL's hebben hoge elektrische weerstand, opsporen met geoelektriek van oppervlak.	Meeste DNAPL's veroorzaken afname in de dielectrische constante, opsporen met GPR.	Wellicht hebben op DNAPL's gereflecteerde seismische golven een afwijkende amplitude.
B	Welke parameter wordt gemeten	Grondwater verontreinigingen (PER, TRI, etc.)	Grondwater verontreinigingen (PER, TRI, etc.)	Grondwater verontreinigingen (PER, TRI, etc.) en DNAPL's in bodem	Verkleuring indicator bij aanwezigheid DNAPL's	Vluchtige koolwaterstoffen in bodemgas	Visuele waarneming.	Dielectrische constante.	Sterkte fluorescentie	Grondwater verontreinigingen (PER, TRI, etc.)	Concentratie van tracers in het grondwater	Concentratie van tracers in het grondwater, is DNAPL residuair of een pool?	Elektrische weerstand (gebaseerd op V en I)	Elektrische weerstand (gebaseerd op V en I)	Contrasten in dielectrische constanten.	Contrasten in dichtheid of seismische snelheid.
C	Ruimtelijke resolutie	laag - puntmeting: afstand tussen de monsterpunten	laag - puntmeting: afstand tussen de monsterpunten	laag - puntmeting: afstand tussen de monsterpunten	laag - puntmeting: afstand tussen de monsterpunten	~ 0.1 m verticaal	~ 0.1 m verticaal	~ 0.1 m verticaal	~ 0.1 m verticaal	10 m	5 m	5 m	0.15 m (boorgat) tot ~0.5 m (midden tussen gaten)	0.2 (1 m-mv) tot 2 m (12 m-mv)	0.1 tot 1 m (afhankelijk van frequentie)	0.1 tot 1 m
D	Onderscheidend vermogen voor DNAPL's	beperkt - redelijk	redelijk	redelijk - hoog	hoog	redelijk	beperkt	beperkt	redelijk	beperkt - redelijk	zeer hoog	hoog	zeer hoog	beperkt	slecht	slecht
E	Kostenposten	Plaatsen filters, monstername, analyse monsters, interpretatie resultaten	Sondering, analyse monsters, interpretatie resultaten	Monstername, analyse monsters, interpretatie resultaten	Monstername, kleurenindicator, interpretatie resultaten	Speciale sondering	Speciale sondering	Speciale sondering	Speciale sondering	Plaatsen filters, pompen, regelmatig analyseren van monsters, modellering resultaten	Plaatsen filters, tracer inbrengen, monitoren tracers, modellering resultaten	Plaatsen filters, tracer inbrengen, monitoren tracers, modellering resultaten	Boringen, metingen (~0.5 mandagen per vlak), uitwerken (0.4-1 mandagen per vlak), outillage, monsters	Veldwerk (1 mandag per 500 m), uitwerken (2 mandagen per 500 m), outillage, monsters	Veldwerk (2 mandagen), uitwerken (1 mandag per 500 m), outillage, monsters	Veldwerk (hoge mob-demob, 3-8 man per dag), uitwerken (week per km), outillage, monsters
	Richtprijs [kEURO] voor in kaart brengen ondiepe vervuiling (5 m-mv)*	20	20	20	20	30	30	30	30	40	60	Kosten PITT + 7	50	10	10	n.v.t.
	Richtprijs [kEURO] voor in kaart brengen diepe vervuiling (15 m-mv)*	50	30	50	50	40	40	40	40	50	65	Kosten PITT + 7.5	60	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
F	Meettijd	~5 monsters per dag (incl. plaatsen)	5-10 monsters per dag (incl. plaatsen)	~10 monsters per dag	~10 monsters per dag	3-6 per dag (10 m-mv)	3-6 per dag (10 m-mv)	3-6 per dag (10 m-mv)	3-6 per dag (10 m-mv)	3-6 maanden (combineren met pump & treat saneringen)	1-3 maanden	1-3 maanden	1-2 dagen per vlak (incl. plaatsen)	300-600 m per dag	enkele 100en m tot enkele km per dag	paar 100 m per dag
G	Toepasbaar voor monitoring	ja	ja, geen praktijk	nee	nee	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nee
H	Kans op verticale verspreiding van verontreiniging op locatie?	ja (bij plaatsen peilbuizen)	ja (bij sondering)	ja (bij boring)	ja (bij boring)	ja (bij sondering)	ja (bij sondering)	ja (bij sondering)	ja (bij sondering)	ja (bij plaatsen peilbuizen en pomputten)	ja (bij plaatsen peilbuizen)	ja (bij plaatsen peilbuizen)	ja (bij plaatsen peilbuizen)	nee	nee	nee
I	Gevoeligheid voor bovengrondse objecten (bijvoorbeeld: bebouwing, rails, hoogspanningsleidingen, etc.)	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	Gevoelig voor stroomlekken in de grond nabij de elektrodes	Oppervlak moet onverhard zijn, gevoelig voor: metalen, hoogspanning, etc.	Gevoelig voor: metalen objecten, stroombronnen en FM zenders	Gevoelig voor: trillingsbronnen
J	Gevoeligheid voor ondergrondse objecten en natuurlijke heterogeniteiten (bijvoorbeeld: AVI slakken, beton, puin, kabels, leidingen, brak grondwater, veen, klei, etc.)	Geen (sommige objecten mogen niet worden doorboord)	Door harde objecten kan niet gesondeerd worden (soms voorboren)	Geen (sommige objecten mogen niet worden doorboord)	Geen (sommige objecten mogen niet worden doorboord)	Door harde objecten kan niet gesondeerd worden (soms voorboren)	Door harde objecten kan niet gesondeerd worden (soms voorboren)	Door harde objecten kan niet gesondeerd worden (soms voorboren)	Door harde objecten kan niet gesondeerd worden (soms voorboren)	Voor grondwater stroming slecht bereikbare DNAPL's worden niet waargenomen	Voor grondwater stroming slecht bereikbare DNAPL's worden niet waargenomen, invloed veen?	Voor grondwater stroming slecht bereikbare DNAPL's worden niet waargenomen	Gevoelig voor: niet natuurlijke objecten op de diepte van de elektrodes, beperkt elektrisch contrast bij DNAPL's in grindige afzettingen	Gevoelig voor: hoge weerstands toplaag, variaties in onverzadigde zone bij monitoring, kabels/leidingen	Lage doordringing in bodem met lage elektrische weerstand, gevoelig voor: kabels/leidingen en metalen, hoe dikker de deklaag (beton, stenen) hoe slechter datakwaliteit	Gevoelig voor: gas in bodem
K	Verdere kanttekeningen	Watermonster interpretatie niet altijd eenduidig	Watermonster interpretatie niet altijd eenduidig, kans op verstoring als gevolg van georceerde uitgassing	Bij los sediment blijft monster niet altijd goed in monsterbus zitten	Bij los sediment blijft monster niet altijd goed in monsterbus zitten, mogelijk vervluchtiging stoffen bij beluchting, meet geen concentraties.	De concentraties zijn relatief	Alleen voor zichtbare verontreinigingen	Indirecte meting	Alleen geschikt voor koolwaterstoffen	Interpretatie niet altijd eenduidig, afvoer opgepompt vervuild water, soms na resultaten nieuwe peilbuizen plaatsen	Tijdstip monsternames cruciaal	Tijdstip monsternames cruciaal	De afstand tussen de boorgaten is beperkt (V/H>1.4), enkele verificatie monsters nodig	Resolutie neemt sterk af met de diepte, verificatie monsters nodig	Meeste voorbeelden uit literatuur zijn gecontroleerde experimenten, lastig DNAPL contrasten te onderscheiden van natuurlijke contrasten, verificatie monsters nodig	Onder Nederlandse omstandigheden geeft HRS pas beeld vanaf 20 m-mv, techniek heeft zich (nog) niet bewezen voor deze toepassing

* Gebied van 1000 m² met historische info en verkennend onderzoek (15 boringen) --> in 3 boringen in puur product verontreiniging --> vraag: wat is richtprijs om de puur product zones bij de 3 boringen in kaart te brengen?

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Algemene conclusies

Er is aangetoond dat ERT goed werkt voor de opsporing van DNAPL's in veel voorkomende typen Nederlandse ondergrond (water verzadigd: zand, silt, klei, veen en licht grindig zand). Ook bij verontreinigde locaties met in de bodem veel infrastructuur (kabels, leidingen, beton, kruipruimtes, etc.) werkt ERT goed. Op locaties met sediment met een hoge elektrische weerstand (bijvoorbeeld sterk grindig sediment) of waar gebiedsvreemde objecten (bijvoorbeeld vaten) op dezelfde diepte zitten als de meetkabels zal ERT niet goed werken. Bij de voor dit onderzoek gebruikte elektrode-afstand van 0.3 m varieert de resolutie van ~0.15 m direct langs de boorgaten tot ~0.5 m midden tussen de boorgaten. De nauwkeurigheid van de ERT-metingen, of het onderscheidend vermogen voor de detectie van DNAPL's, is het hoogst wanneer de ondergrond relatief homogeen is. In een normale Nederlandse ondergrond zullen DNAPL's duidelijk waarneembaar zijn met ERT wanneer het poriënvolume van zand voor ~35% of meer gevuld is met DNAPL's. Echter, wanneer de geo-elektrische weerstandsopbouw van de ondergrond goed bekend en relatief homogeen is dan zullen lagere percentages DNAPL's gedetecteerd kunnen worden. De resultaten van de ERT-metingen zijn belangrijk voor de beoordeling van mogelijkheden voor sanering of beheersing van verontreinigde locaties.

ERT is volgens de expertmeting de enige beschouwde semi-3D techniek met perspectief om op grotere schaal ingezet te worden. Deze conclusie is gebaseerd op: de hoge ruimtelijke resolutie, de korte meettijd en de mogelijkheid de richtprijs omlaag te brengen.

In de huidige situatie kan ERT bij ondiepe verontreinigingen (< ~10 m-mv) niet financieel concurreren met een conventioneel bodemonderzoek dat tot doel heeft de omvang van de verontreiniging te bepalen. Dit moet ook niet worden nagestreefd aangezien dan veelvuldig zal worden geconstateerd dat ERT geen meerwaarde heeft (geen DNAPL's aanwezig). ERT wordt pas interessant wanneer uit eerder onderzoek is gebleken dat sprake is van een saneringsnoodzaak en wanneer er DNAPL's aanwezig kunnen zijn. De inzet van ERT kan eenvoudig worden gespiegeld aan een reductie van de saneringskosten die worden bereikt. Met name op locaties waar DNAPL's zich relatief ongehinderd verticaal kunnen verspreiden is de meerwaarde van ERT groot. Wanneer sprake is van een heterogene bodemopbouw, zoals tijdens dit project op locatie Utrecht, kan ERT ook een meerwaarde hebben.

Conclusies met betrekking tot locaties Utrecht en Drenthe

In de ERT profielen op locatie Utrecht zijn één grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands anomalie. Grondwatermonsters hebben aangetoond dat de grote zone is veroorzaakt door pure DNAPL's. De kleine weerstands anomalie heeft een andere oorzaak (waarschijnlijk grover sediment). De aangetroffen DNAPL ligt echter niet, zoals verwacht, bovenop de slecht doorlatende laag, maar hieronder in een over het algemeen goed doorlatend zandpakket. De onttrekkingssystemen voor de ophanden zijnde sanering van de locatie zijn aangepast aan dit nieuwe inzicht. De meerwaarde van ERT in vergelijking tot het eerder uitgevoerd bodemonderzoek is dus de markering van een brongebied met x-y-z coördinaten.

In de ondiepe (2.55-9.45 m-mv) ERT profielen op locatie Drenthe zijn twee grote en één kleine zone gevonden met een hoge weerstands anomalie. DNAPL's werden vooraf ook verwacht op deze diepte (2-10 m-mv), echter de locatie was onbekend. Alle grondwatermonsters bevatten zeer hoge gehalten PER (tot 166% van de maximale oplosbaarheid). De gehalten bij alle mon-

sters duiden op DNAPL's. Het is echter wel zo dat de hoogste gehalten in of zeer dicht bij de zinklagen verwacht worden. Drie van de vier grondwatermonsters bevatten extreem hoge PER-gehalten (117-150% van de maximale oplosbaarheid) en komen ieder uit één van de drie zones met een hoge weerstand. Deze zones representeren met zeer grote zekerheid DNAPL's. Het hoogste PER-gehalte (166%) wordt echter een halve meter onder een DNAPL gemeten. Omdat de weerstand van de ondergrond op het monsterpunt niet bijzonder hoog is, is het zeer waarschijnlijk dat het extreem hoge gehalte afkomstig is van de erboven gelegen DNAPL. Waarschijnlijk is tijdens de bemonstering met de conesipper een verticaal transport opgetreden van de DNAPL.

In de diepe ERT-profielen (17.2-24.1 m-mv) op locatie Drenthe zijn, in tegenstelling tot de hypothese voor het veldwerk, geen aanwijzingen voor DNAPL-bronzones aangetroffen. In het oorspronkelijk ontwerp voor de sanering op locatie Drenthe was voorzien in het toepassen van persluchtinjectie op deze twee diepteniveaus (10 en 23 m-mv). Nu de resultaten van ERT aangeven dat er op 20-23 m-mv geen aanwijzingen zijn voor het voorkomen van DNAPL's ter plaatse van de ERT-boringen in de galvanohal zal het ontwerp aangepast worden.

Conclusies met betrekking tot meetopstelling en veldwerk

De ERT-meetopstelling kan ook gebruikt worden om betrouwbare boorgatmetingen te maken. De boorgatmetingen zijn handig om de via inversie verkregen ERT-weerstanden van de ondergrond te controleren. De met de boorgatmetingen gemeten weerstanden representeren namelijk direct, zonder inversie, de weerstand van de ondergrond.

De nieuwe ontwikkelde Meekes elektroden meetopstelling gaf op beide testlocaties de beste resultaten. De veel in het buitenland gebruikte circulating dipool-dipool elektroden meetopstelling gaf op locatie Drenthe ook redelijk goede resultaten. Echter, midden tussen de boorgaten neemt de resolutie van deze meetopstelling duidelijk af.

Een verhouding van V (het deel van het boorgat waarin de elektrodes hangen) tot H (afstand tussen de boorgaten) van 1.4 of meer is noodzakelijk om de elektrische weerstand midden tussen de boorgaten met ERT goed in beeld te kunnen brengen.

De Back Projection (Universiteit van Lancaster) inversie geeft vergelijkbare resultaten als de voor dit project gebruikte Occam's inversie methode. Voor de Meekes tabel geeft de Back Projection inversie methode iets meer realistische waarden.

De keuze om geen oppervlakkige elektrodes te gebruiken voor de ERT-metingen is op beide verontreinigde testlocaties een goede geweest. Op locatie Utrecht had de inzet van oppervlakkige elektrodes geen zin vanwege de hele hoge elektrische weerstand van de toplaag. Op locatie Drenthe was het gebruik van elektrodes aan het oppervlak niet mogelijk vanwege locatieomstandigheden (o.a. gewapende beton en kruipruimte).

Er kunnen zowel grondwater- als bodemonsters worden genomen om de resultaten van de ERT-metingen te controleren. Grondwatermonsters zijn goedkoper en makkelijker te nemen met een zogenaamde 'conesipper' dan bodemonsters waarvoor geboord moet worden. DNAPL-concentraties in grondwatermonsters hebben echter alleen een indirecte relatie met ERT-metingen, omdat hoge elektrische weerstanden worden veroorzaakt door DNAPL's. Het is echter wel zo dat de hoogste DNAPL-concentraties in het grondwater in of zeer dicht bij de DNAPL-zones zijn aangetroffen. Gemeten DNAPL-concentraties in bodemonsters hebben wel een directe relatie met DNAPL-bronzones.

6.2 Aanbevelingen

Praktische aanbevelingen

Het doen van dubbelmetingen (met name bij de Meekes meetopstelling) zorgt voor een significante verbetering van de datakwaliteit, omdat foute meetwaarden goed kunnen worden onderscheiden van aan de ondergrond gerelateerde afwijkingen in meetwaarden. Ook het van tevoren verwijderen van meetpunten met grote k-waardes (>820) zorgt voor een verbetering van de datakwaliteit.

In verband met het ontwikkelen van een aanslag op de elektrodes is het verstandig de elektrokabel op verontreinigde locaties zo kort mogelijk in de grond te houden.

Wanneer de meetlocatie permanent toegankelijk en beschermd is dan kan het geo-elektrische instrument veel efficiënter worden ingezet door het lange meetdagen te laten maken.

Voor de ERT-metingen is het handig een zo lang mogelijk volkomen filter in de boorgaten te gebruiken, omdat de diepte van de DNAPL-bronzonzone vooraf meestal niet bekend is. Als de volkomen filter langer is dan het deel van het boorgat waarin de elektrodes hangen (6.9 m) dan kunnen er meerdere boven elkaar liggende ERT-meetvlakken worden gemeten.

De ervaring op locatie Drenthe heeft uitgewezen dat de meetkabel zichzelf door zijn eigen gewicht strak trekt wanneer alle 24 elektrodes in het gat hangen en de onderkant van de peilbuis een stuk dieper (>0.5 m) zit dan de onderste elektrode. Het aanbrengen van een dubbeltouw in de peilbuis om de meetkabel strak te trekken is dan niet meer nodig.

Aanbevelingen voor verdere ontwikkeling

Er is een aantal verbeteringen mogelijk om de inzet van ERT efficiënter en dus goedkoper te maken. Deze verbeteringen worden met name relevant als ERT op grote schaal ingezet wordt. De volgende verbeteringen zijn mogelijk:

1. Om de ERT-meettijd drastisch te verkorten zouden er meerdere geo-elektrische metingen tegelijkertijd kunnen worden uitgevoerd; een zogenaamde meerkanaalsmeting. Bij een meerkanaalse geo-elektrische meting wordt over twee elektrodes een stroom in de grond gebracht, terwijl over meerdere elektrodeparen tegelijkertijd (meestal 3) het potentiaalverschil wordt gemeten. Dit vergt aanpassingen aan het geo-elektrische instrument. Wanneer de voor dit onderzoek gebruikte ABEM SAS4000 wordt aangepast (een tweede ES464 huren/kopen en extra verbindingkabels kopen) dan kan de meetsnelheid met 50 tot 66% toenemen;
2. De verwerking van de data (data kwaliteitscontrole en inversie) kan deels gestandaardiseerd worden;
3. De elektrodes kunnen mogelijk op een goedkopere manier in de grond worden gebracht (zie volgende pagina).

Het gebruik van meetkabels in volkomen filters zou in verband met een mogelijke versnelde verticale verspreiding van verontreiniging, bezwaarlijk kunnen zijn. De meetkabels zijn echter te duur (circa 6.000 EURO per stuk) om ze in de grond te laten zitten. De elektrodes kunnen daarom wellicht op een alternatieve manier worden aangebracht. Hierbij kan gedacht worden aan PVC-buizen zonder filters met ronde elektrodes op de peilbuizen. Een andere mogelijkheid is wellicht een speciale sondering (CPT) waarbij een stang/kabel met elektrodes de grond in wordt gedrukt. Een andere optie is om de multi-elektrodekabel aan de buitenkant van de PVC-buis vast te maken. Hergebruik van de kabel is dan waarschijnlijk niet mogelijk. Deze opties zouden samen met diverse technici nader uitgewerkt kunnen worden.

Wanneer DNAPL's in-situ gesaneerd worden dan kunnen met behulp van ERT-verschilmetingen de afname in de elektrische weerstand, en hiermee de afname van de concentraties, gemonitord worden. Dit is eerder in de Verenigde Staten gebeurd [Newmark et al., 1998].

Een andere mogelijke toepassing van ERT in de bodemsaneringswereld is monitoring van perslucht-injectie in de bodem. Lucht heeft namelijk ook een hele hoge elektrische weerstand.

LITERATUUR

Abem 1999. Instruction Manual - Terrameter SAS4000. Sweden (www.abem.com).

Bing, Z. and S.A. Greenhalgh (2000). Crosshole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting*, 48: 887-912.

DHV (1992). Nader onderzoek bodemverontreiniging Parallelweg 27 Coevorden. Chromplating Production Coevorden B.V., DHV-rapport: G-3162-01-001.

Domenico, P.A. and F.W. Schwartz (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, UK.

Fechner, T. (2000). SensInv2D - Manual and Software. Geotomographie.

Greenhalgh, S., B. Zhou and J. Zhe (2000). Crosshole resistivity imaging properties. *Exploration Geophysics*, Vol 31, Nos. 1 and 2, pp. 315-320.

Hetterschijt, R.A.A., Valstar, J.R., van Zutphen, M., Schuren, C.H.J.E., Eskes, S,J,T, van den Brink, K.M.J. en Reimer, K., 2000. Karakterisatie van DNAPL-bronzones van Partitioning Interwell Tracer Test (PITT). TNO-NITG Rapp. No. 99-176-A.

Iwaco (2001). Integrale rapportage grondwaterverontreiniging (> 5 m-mv) De Holwert te Coevorden. Stichting Coevorden Industriebelangen. Iwaco rapport: 25380A.

Morelli, G. and D.J. Labrecque (1996). Advances in ERT inverse modelling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 1. 171-186.

Newmark, R.L., W.D. Daily, K.R. Kyle and A.L. Ramirez (1998). Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, V3, 1, p.7-13.

Ramirez, A.L., W.D. Daily and R.L. Newmark (1995). Electrical Resistance Tomography for steam injection and process control. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, V0, no. 1, p.39-51.

Ramirez, A, W. Daily, A. Binley, D. LaBrecque and D. Roelant (1996). Detection of leaks in underground storage tanks using electrical resistance methods. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. Vol.1, 3, pp.189-203.

Schneider, G.W. and J.P. Greenhouse (1992). Geophysical detection of perchloroethylene in a sandy aquifer using resistivity and nuclear logging techniques. SAGEEP (EEGS Conference). Slater, L., A.M. Binley, W. Daily and R. Johnson (2000). Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journal of Applied Geophysics* 44, pp. 85-102.

Sullivan, E. and D.J. LaBrecque (1998). Optimisation of ERT surveys. In: SAGEEP Proceedings 1998, p.571-581.

Westerhoff, R.S. en J.A.C. Meekes (2001). TOMOSO fase 1: haalbaarheid en demonstratie. Delftse Cluster Rapport.

Weyting, K.R., van de Velde, A.H., van Zutphen, M. en Vasak, L., 2000. Karakterisatie van DNAPL-sites (DNAPLKAR). NOBIS 95-2-10, Gouda.

BIJLAGE A

MODELLERING

TOELICHTING MODELLERING

Inleiding modellering

Het inversieprogramma SensInv2D (zie paragraaf 3.9) kan ook gebruikt worden om een kunstmatige dataset met 'meetwaardes' te simuleren. Als invoer is het volgende nodig: 1) een ondergrondmodel, 2) een tabel met een meetprogramma volgens een bepaalde elektrodeconfiguratie en 3) de posities van de elektrodes. De kunstmatige meetwaardes kunnen met een inversie weer omgezet worden in een weerstandsmodel van de ondergrond. Vergelijking van het weerstandsmodel dat uit de inversie komt en het oorspronkelijke ondergrondmodel, levert informatie over de mogelijke geschiktheid van de elektrodeconfiguratie om DNAPL's te detecteren. Verstoringen die in velddata altijd voorkomen (zwerfstromen, slecht elektrodecontact, etc.) zijn niet in de kunstmatige meetwaardes gebracht.

Het belangrijkste doel van de modellering is de selectie van een beperkt aantal elektrodeconfiguraties dat het meest geschikt is voor het detecteren van DNAPL's. In de beperkte meettijd (5-7 dagen) kunnen namelijk niet alle in hoofdstuk 3 behandelde elektrodeconfiguraties in het veld worden gemeten. De vragen voor de modellering zijn gebaseerd op hoofdstuk 3 en worden hieronder gepresenteerd.

Vragen met betrekking tot de meetopstelling:

- welke crosshole dipool-dipool configuratie is beter: AM-BN of AM-NB?
- welke configuratie voldoet beter; crosshole dipool-dipool of circulating dipool-dipool?
- wat is de meest geschikte elektrode-afstand bij de circulating dipool-dipool opstelling (AB=MN=1.5, 1.8 of 2.1 m)?
- wat is de invloed van de afstand tussen de boorgaten op ERT-resultaten en is de verhouding Verticaal/Horizontaal =1.5 een goede verhouding?

Vragen met betrekking tot de DNAPL's:

- zijn zeer dunne (0.05 m) DNAPL-lagen detecteerbaar met ERT?
- is een dunne (0.10 m) DNAPL-laag detecteerbaar wanneer deze de boorgaten niet kruist?

Gebruikte modellen locatie Utrecht

De positie van de elektrodes in de modellering is dezelfde als op de eerste demonstratielocatie (Utrecht). De elektrode-opstelling is als volgt:

- 2 boorgaten met ieder 16 elektrodes;
- elektrode-afstand: 0.3 m;
- diepte traject waarover de elektroden zitten: 1.2 tot 5.7 m-mv;
- afstand tussen de boorgaten: 3 m (V/H= 1.5).

Er zijn 4 ondergrondmodellen gemaakt. De modellen zijn ook getekend in figuren in bijlage A2.

- Model A: twee continue DNAPL-lagen die de boorgaten kruisen (0.05 en 0.10 m dik);
- Model B: één continue DNAPL-laag (0.05 m dik) en één 1.5 m brede DNAPL-laag (0.10 m dik) die tussen de boorgaten ligt;
- Model C: één 1.5 m brede DNAPL-laag (0.10 m dik) die tussen de boorgaten ligt;
- Model D: één 1.5 m brede DNAPL-laag (0.40 m dik) die tussen de boorgaten ligt.

Voor de 0.10 m dikke DNAPL-laag (2.90 m-mv) is uitgegaan van een relatief lage specifieke weerstand van 650 Ohm-m; dit komt overeen met PER-verzadiging van ongeveer 65% van het porievolume voor een zandig aquifer (bijlage A2, model A). De 0.05 m dunne DNAPL-laag (5.15 m-mv) heeft een weerstand van 800 Ohm-m (~70% verzadiging).

Resultaten van de Utrecht modellering

Er zijn ongeveer 60 inversies uitgevoerd voor de verschillende elektrodeconfiguraties uit hoofdstuk 3. De resultaten staan in de figuren in bijlage A2 en zijn samengevat in onderstaande tabel A1.1. De puntjes in de figuren zijn de 2x16 elektrodes. Op de x-as staat de positie aan het oppervlak en op de y-as staat de diepte. De kleuren in de figuren representeren de elektrische weerstand van de ondergrond, zoals deze uit de inversie komt. Een elektrodeconfiguratie levert goede resultaten als op de locaties van de DNAPL's in het uitgangsmodel (bijlage A2) de weerstand in het geïnverteerde model verhoogd (rood) is. Bij het beoordelen van de figuren wordt alleen gelet op het gebied tussen de elektrodes in de beide boorgaten. Het gebied midden tussen de twee bovenste en de twee onderste elektrodes wordt, vanwege de lage meetbedekking, ook niet mee genomen in de beoordeling van de elektrodeconfiguraties.

Andere factoren die van belang zijn bij de beoordeling van een elektrodeconfiguratie zijn: het aantal meetpunten (hoe minder meetpunten hoe lager de meettijd) en de grootte van de geometrische factoren (zie paragraaf 3.6).

Tabel A1.1. Samenvatting van de resultaten van de modellering (figuren in bijlage A3 t/m A7).

Resultaten Model A (Bijlage A3)	Configuraties
Beide DNAPL-lagen als continu gedetecteerd 1 van de 2 DNAPL-lagen als continu gedetecteerd Beide DNAPL-lagen gedetecteerd, maar niet continu Rommelig beeld	Meekes, (normal well log) AM-BN, AM-NB, normal well log complete Circulating dipool-dipool (1.5 en 2.1 m) Wenner
Resultaten Model B (Bijlage A4) Continue en korte DNAPL-laag gedetecteerd Continue DNAPL-laag gedetecteerd, korte laag niet gedetecteerd DNAPL-laag gedetecteerd, maar niet als continu, korte laag niet gedetecteerd Rommelig beeld	Meekes-long (normal well log, Wenner) AM-BN, AM-NB, circulating dipool-dipool (2.1 m) Circulating dipool-dipool (1.5 m)
Resultaten Model C (Bijlage A5) Korte 0.1 m dunne DNAPL-laag gedetecteerd Korte 0.1 m dunne DNAPL-laag niet gedetecteerd	Meekes-long AM-BN, normal well log, circulating dip.-dip. (1.5 en 2.1 m)
Resultaten Model D (Bijlage A6) Korte 0.4 m dikke DNAPL-laag gedetecteerd Korte 0.4 m dikke DNAPL-laag niet gedetecteerd	AM-BN, AM-NB (beide dubbele anomalie), normal well log, circulating dipool-dipool (2.1 m), Meekes Ingekorte AM-BN configuraties, circulating dipool-dipool (1.5 en 1.8 m)
Verschillende afstanden tussen boorgaten (Bijlage A7) DNAPL alleen goed waarneembaar met de kortste afstand tussen de boorgaten (3 m, V/H=1.5), enigszins waarneembaar bij een afstand van 4 m (V/H=1.13), niet waarneembaar bij een afstand van 5.3 m (V/H=0.85)	Model D met circulating dipool-dipool configuratie Model C met de Meekes configuratie

De onderstaande conclusies zijn getrokken uit de resultaten van de modellering:

Uit bovenstaande tabel A1.1 en bijlage A3 t/m A7 blijkt dat de Meekes' configuratie in de modellering het best voldoet. Het is de enige configuratie die de korte 0.1 m dunne DNAPL-laag heeft waargenomen (model C). De normal well log configuratie levert ook redelijk goede resultaten. Beide opstellingen hebben vergeleken bij de meeste andere configuraties bovendien nog relatief weinig meetpunten en dus een beperkte meettijd. De twee configuraties worden daarom op alle 9 vlakken op de eerste demonstratielocatie gemeten.

Voor een boorgatafstand van 3 m levert een elektrode-afstand van 2.1 m (AB en MN) in de dipool-dipool configuratie de beste resultaten (model D: figuren 9-14).

De AM-BN en de AM-NB opstellingen leveren vrijwel identieke resultaten. Deze opstellingen zijn beter dan de circulating dipool-dipool opstelling in het detecteren van continue DNAPL-lagen (model A). De circulating dipool-dipool opstelling (AB=MN=2.1 m) is echter beter in het detecteren van korte, dunne DNAPL-lagen (model D) dan de crosshole dipool-dipool opstellingen (AM-BN en AM-NB).

De circulating dipool-dipool data is de enige configuratie waarbij de inversiefout meestal niet geleidelijk afneemt met het aantal inversies; de inversie is onstabiel.

Er is gekozen om op de eerste demonstratielocatie alle 9 vlakken ook met de circulating dipool-dipool configuratie door te meten. Dit is gedaan omdat: het voorkomen van korte DNAPL-lagen het meest realistisch wordt geacht en de configuratie veruit het meest is gebruikt in de ERT-onderzoeken uit de literatuur. De AM-BN configuratie zal op de eerste demonstratielocatie op één kort (3 m breed) en één lang (5.8 m breed) meetvlak worden getest.

De AM-BN meettabel (684 metingen) kan niet worden ingekort, want dit gaat ten koste van de datakwaliteit (Model D, plaatjes 1-5). De circulating dipool-dipool meettabel (AB=MN=2.1 m) kan met de helft wordt ingekort (van 928 naar 464 metingen) met behoud van de datakwaliteit (Model D, plaatjes 13 en 15). In de verkorte circulating dipool-dipool tabel zitten echter geen reciproke metingen die handig zijn voor de kwaliteitscontrole (paragraaf zie 3.7).

De Wenner metingen leveren rommelige resultaten en zullen daarom niet in het veld worden gemeten.

Wanneer verschillende elektrode-opstellingen in één inversie worden gecombineerd dan levert dit geen betere resultaten (bijlage A2: modellen A en B) op.

Wanneer de verhouding tussen de lengte in het boorgat waarover de elektrodes zitten en de afstand tussen de boorgaten kleiner wordt dan 1.5 dan neemt de kans op detectie van DNAPL's snel af. Wanneer de verhouding kleiner is dan 1.1 dan is de detectiekans van DNAPL's die niet vlak langs de boorgaten liggen minimaal.

Drenthe modellering

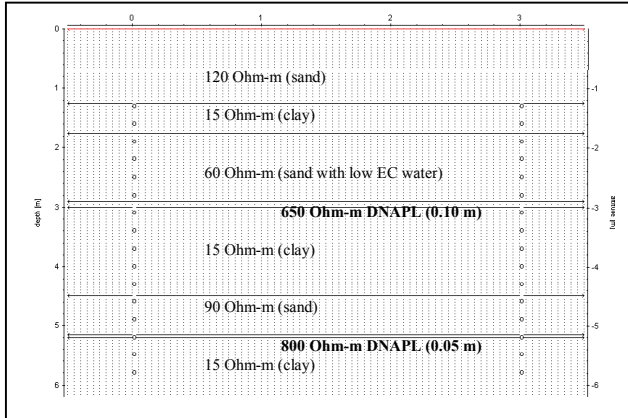
Ter voorbereiding op de veldmetingen op de tweede demonstratielocatie (Coevorden, Drenthe) is een korte modelleersessie gehouden met de Meekes en de circulating dipool-dipool configuraties. De resultaten staan in bijlage A8. Beide configuraties hebben de DNAPL in het model opgespoord. In tegenstelling tot de Utrecht metingen en de Utrecht modellering geeft de circulating dipool-dipool configuratie (long en short) betere resultaten dan de Meekes configuratie (long en short). De afstand tussen de boorgaten (Utrecht: 3 m en Drenthe: 4.5 m) en het aantal elektrodes (Utrecht: 16 per boorgat en Drenthe: 24 per boorgat) spelen hierin waarschijnlijk een belangrijke rol.

De Meekes short tabel, waarin alleen de diepste en ondiepste elektrodes als stroomelektrodes worden gebruikt, geeft betere resultaten dan de Meekes long tabel. Bij de Utrecht modellering was al iets soortgelijks geconstateerd; wanneer verschillende configuraties worden meegenomen in één inversie dan is het resultaat vergelijkbaar of minder dan het resultaat van de beste individuele configuratie. Dit komt doordat meetpunten die niet door de anomalie worden beïnvloed de anomalie in het uiteindelijke inversieresultaat doen vervagen. Naast de Meekes en well log tabellen zal er op locatie Coevorden dus ook gemeten worden met de circulating dipool-dipool tabel (short).

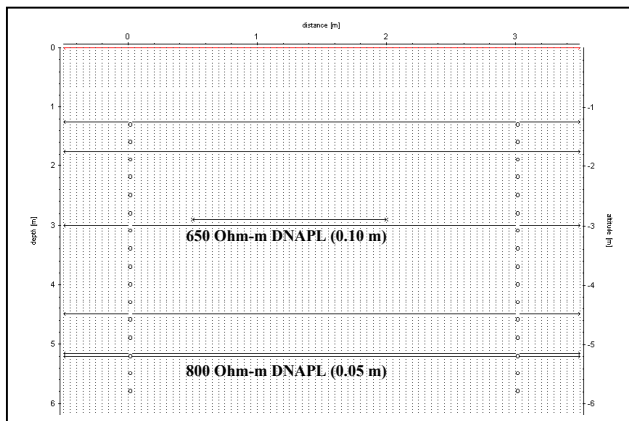
BIJLAGE A2

MODELLEN A, B, C EN D (UTRECHT)

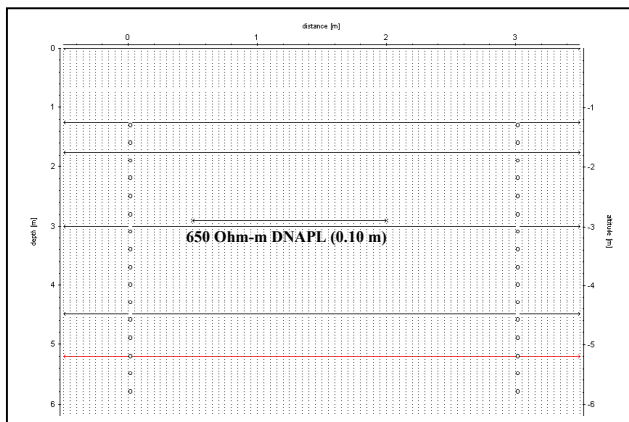
model A



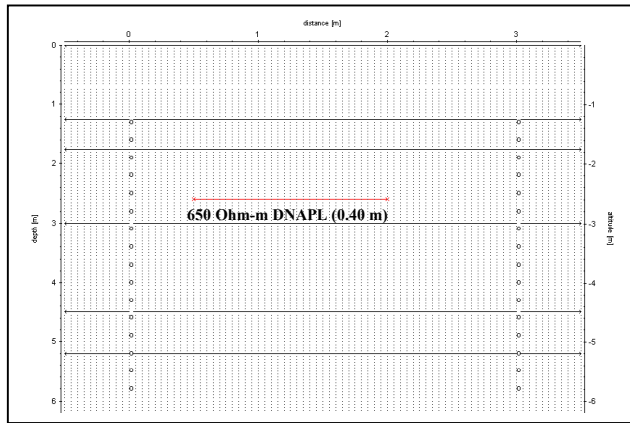
model B



model C



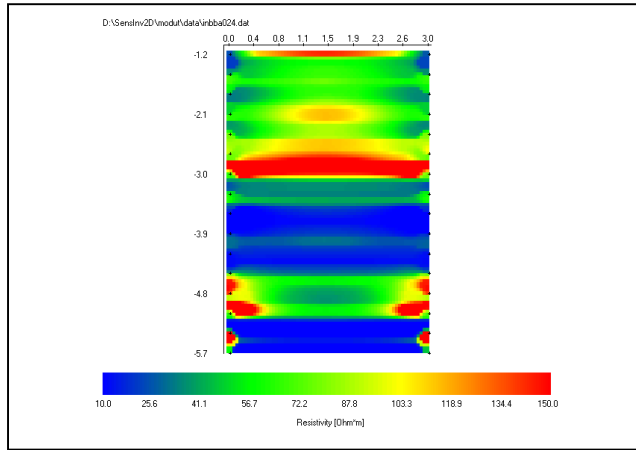
Model D



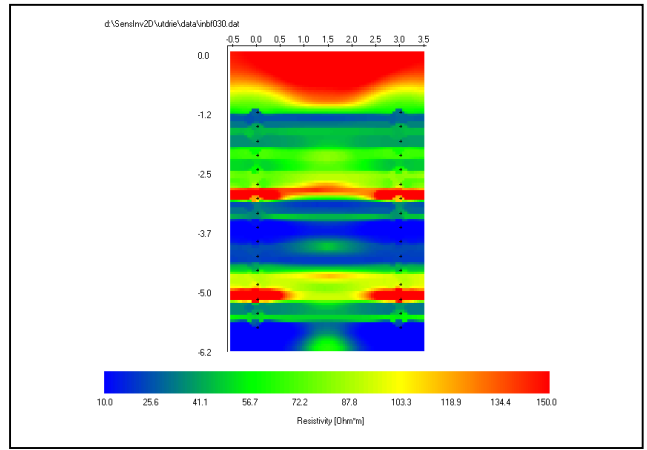
BIJLAGE A3

MODELLEREN MET MODEL A (UTRECHT)

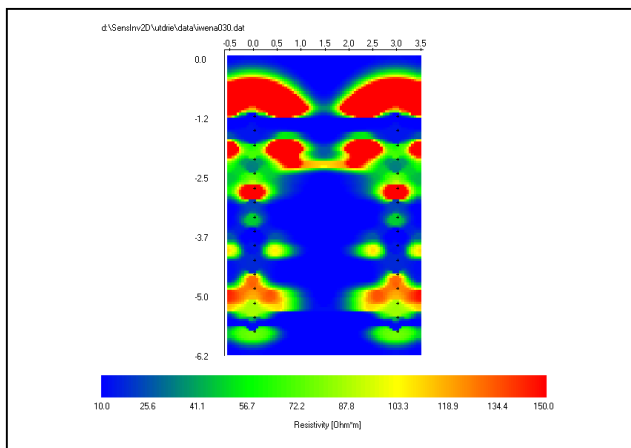
1) AM-BN (684: skip 0,2,4 6,8,10,12,13,14;
10-150 Ohm)



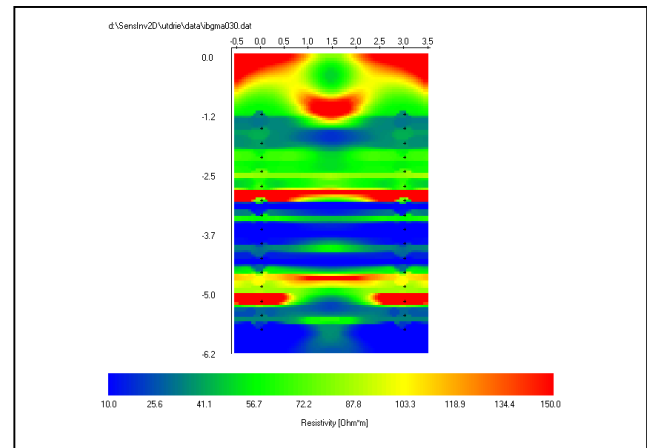
2) AM-NB (675: skip 0, 2, 4, 6, 8, 11,
12, 13, 14; 10-150 Ohm-m)



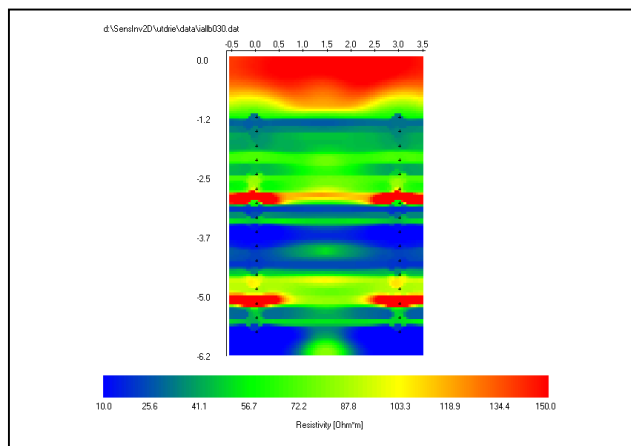
3) AMNB = Wenner (35; 10-150 Ohm-m)



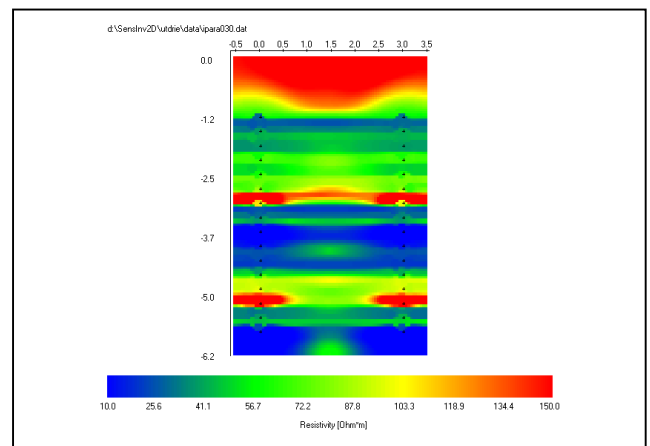
4) NMA-B, AMN-B = well logging (96: skip
0, 2; 10-150 Ohm-m)



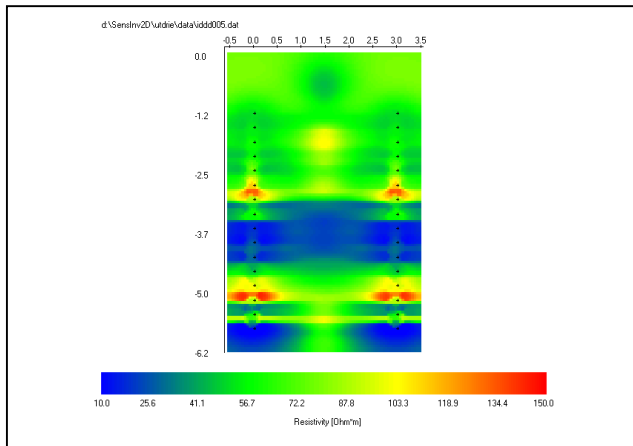
5) combination of 2, 3 & 4
(806; 10-150 Ohm-m)



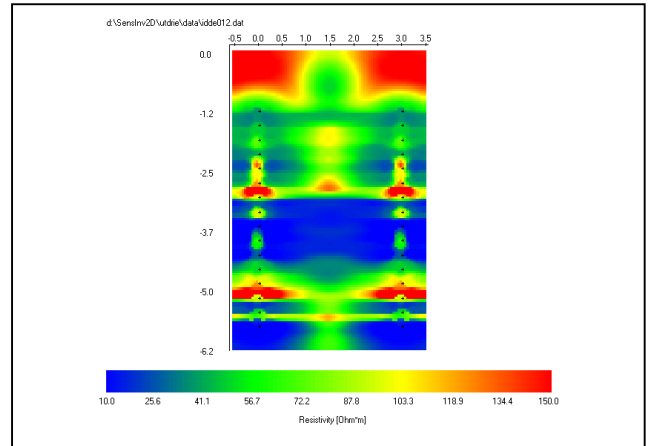
6) combination of 2 & 4
(771; 10-150 Ohm-m)



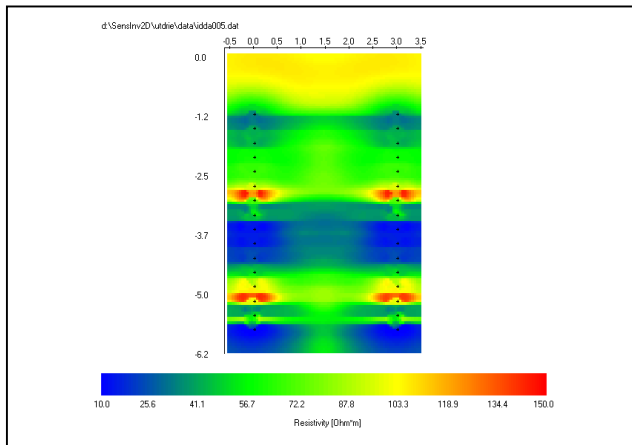
7) circ.dip.dip (928: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



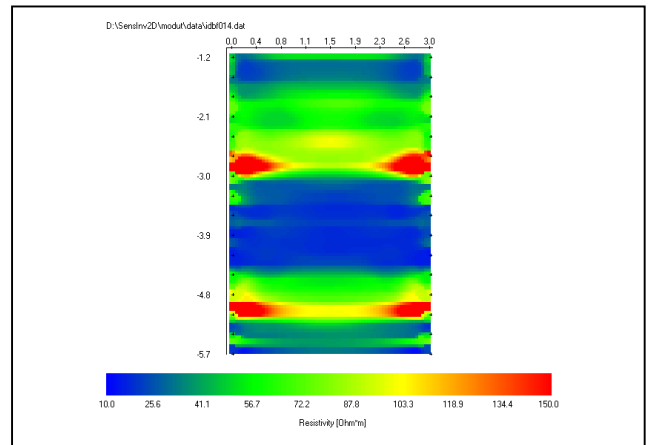
8) circ.dip.dip. edit (860: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



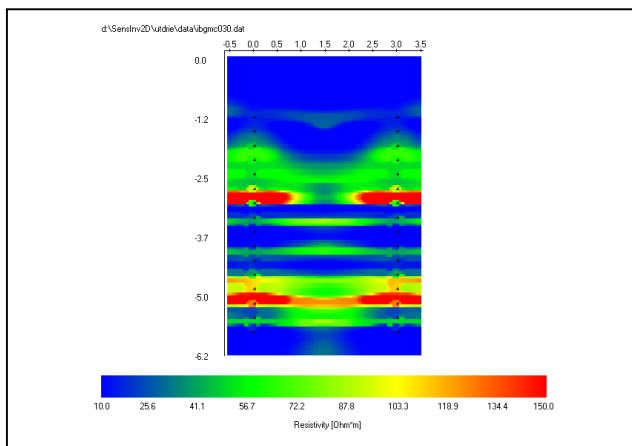
9) circ.dip.dip (928: AB=MN=2.1 m;
10-150 Ohm-m)



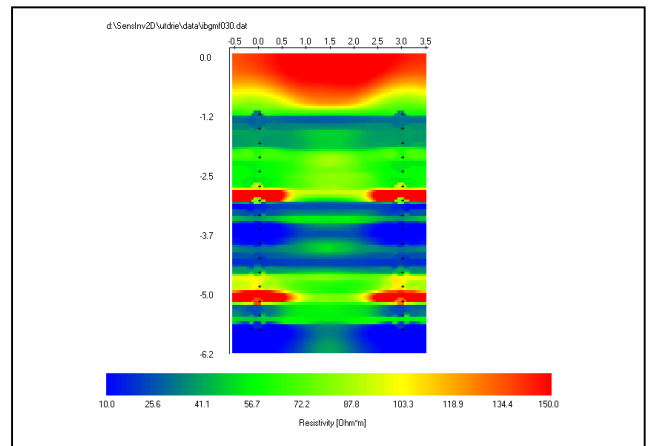
10) circ.dip.dip. edit (916: AB=MN=2.1 m;
10-150 Ohm-m)



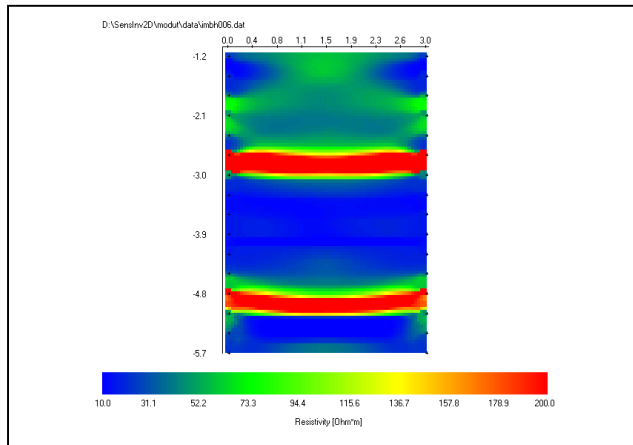
11) NMA-B, B-AMN = well log compl.
(768; 10-150 Ohm-m)



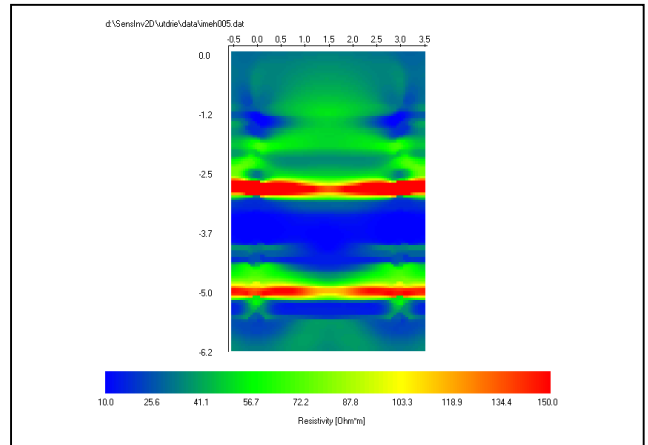
12) combination of 2 and 11 (1443;
10-150 Ohm-m)



13) A-MN B, MN A-B = Meekes short
(84; 10-200 Ohm-m)



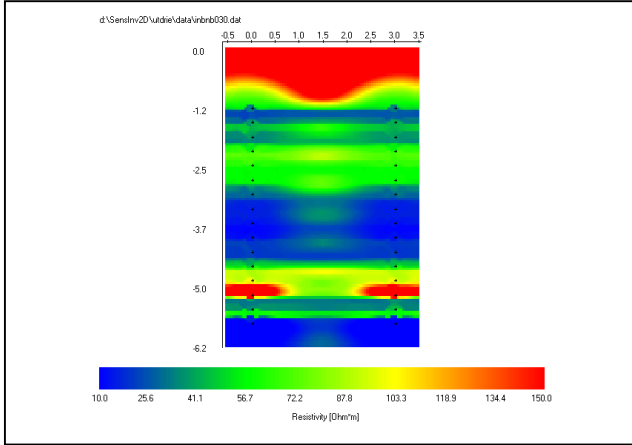
14) A-MN B, MN A-B = Meekes long
long (148; 10-150 Ohm-m)



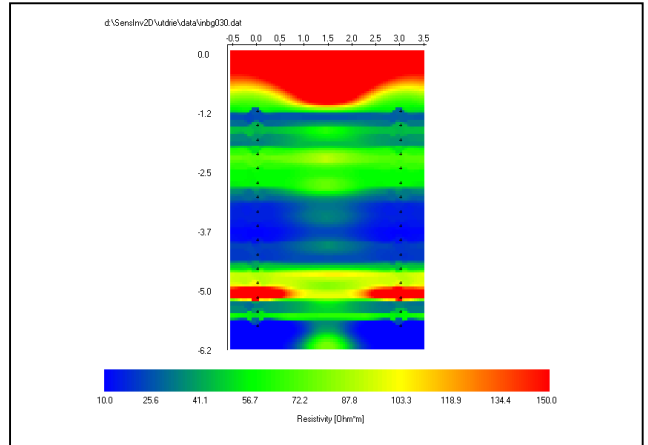
BIJLAGE A4

MODELLEREN MET MODEL B (UTRECHT)

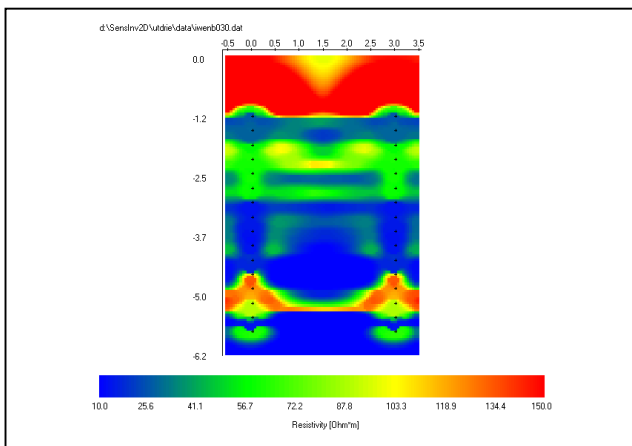
1) AM-BN (684: skip 0,2,4,6,8,10,12,13,14;
10-150 Ohm)



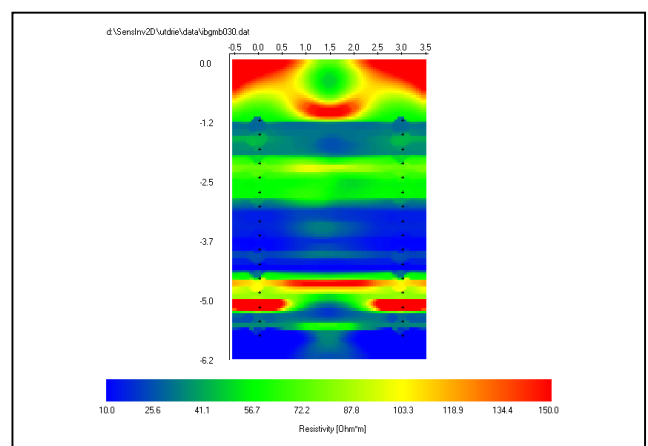
2) AM-NB (675: skip 0, 2, 4, 6, 8, 11, 12,
13, 14, 10-150 Ohm-m)



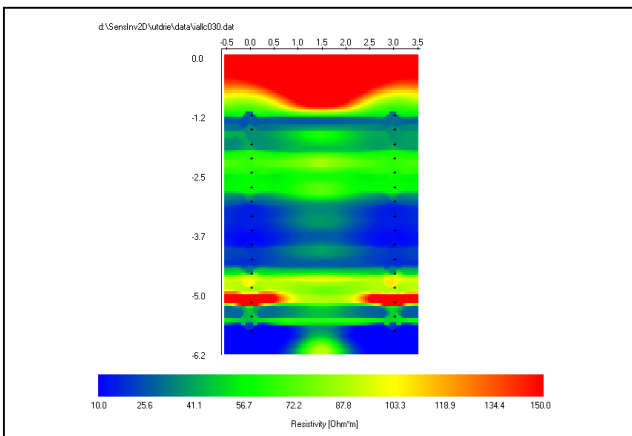
3) AMNB = Wenner (35; 10-150 Ohm-m)



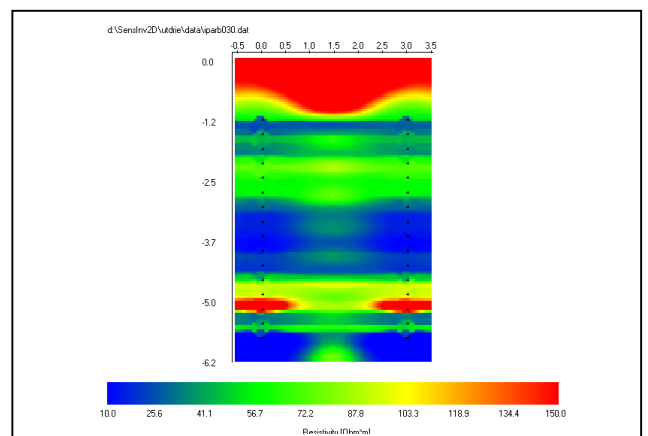
4) NMA-B, AMN-B = well logging (96: skip
0, 2; 10-150 Ohm-m)



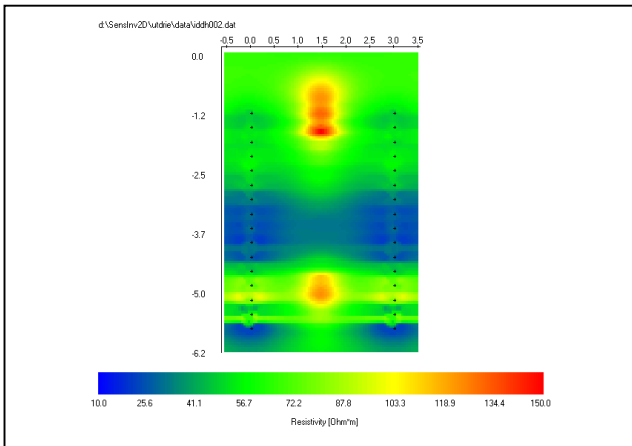
5) combination of 2, 3 & 4 (806;
10-150 Ohm-m)



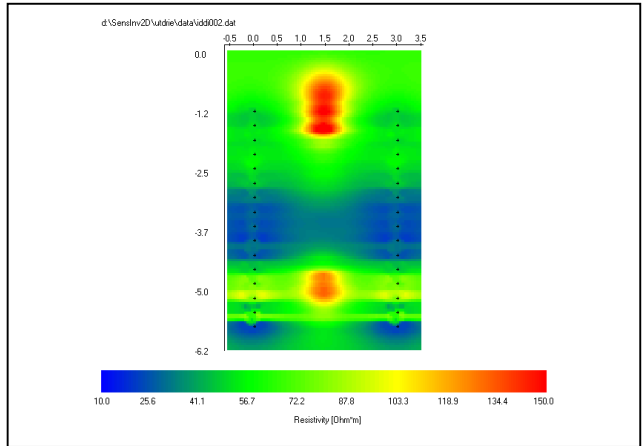
6) combination of 2 & 4 (771;
10-150 Ohm-m)



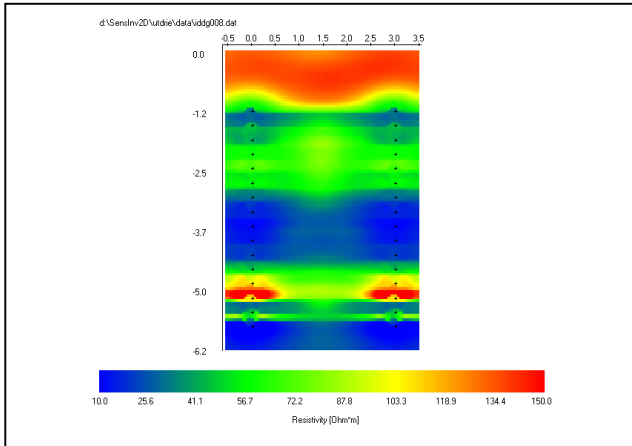
7) circ.dip.dip (928: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



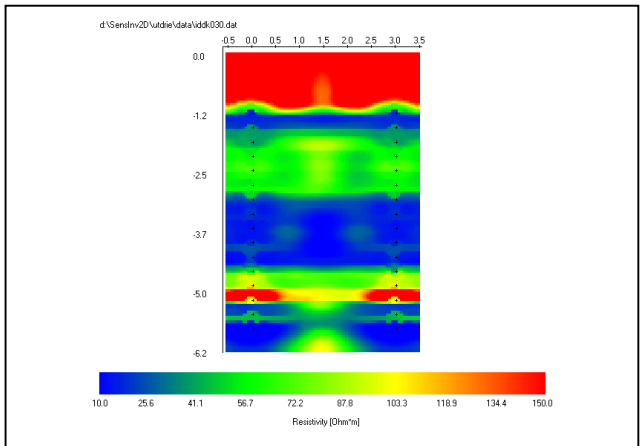
8) circ.dip.dip. edit (860: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



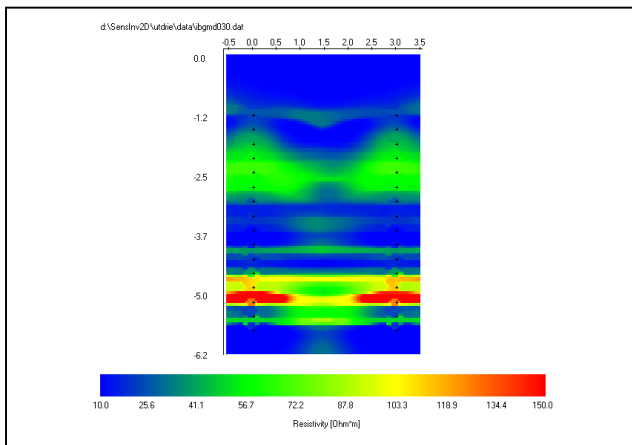
9) circ.dip.dip (928: AB=MN=2.1 m;
10-150 Ohm-m)



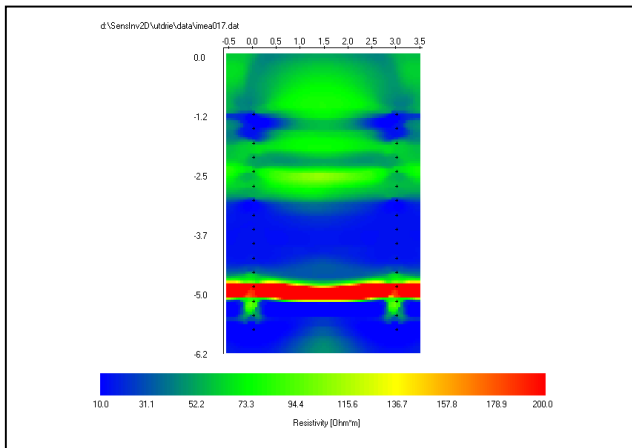
10) circ.dip.dip. edit (916:
AB=MN=2.1 m; 10-150 Ohm-m)



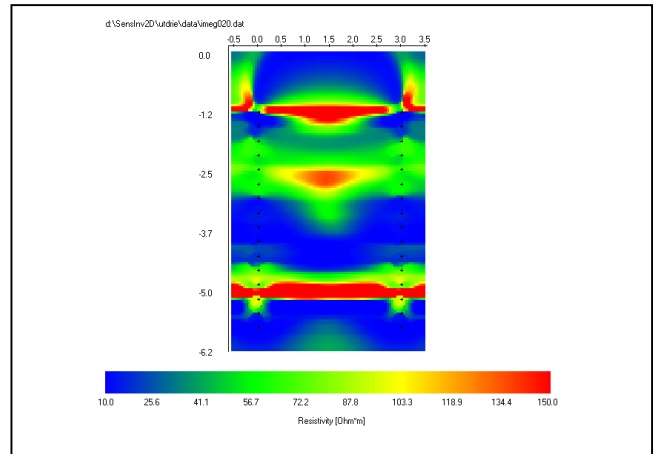
11) NMA-B, B-AMN = well logging complete
(768; 10-150 Ohm-m)



12) A-MN B, MN A-B = Meekes short
(84; 10-200 Ohm-m)



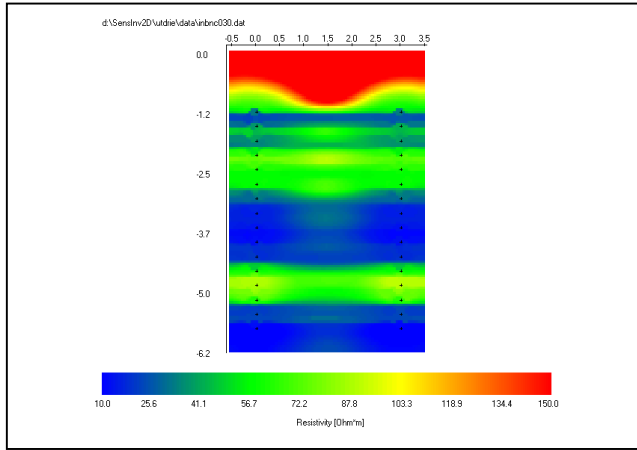
13) A-MN B, MN A-B = Meekes long
long (148; 10-150 Ohm-m)



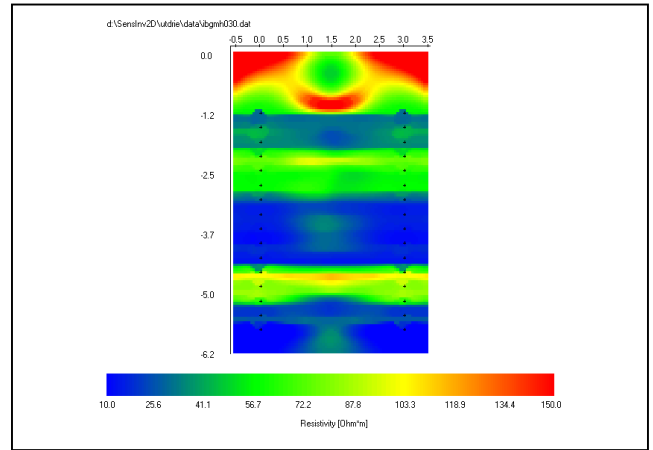
BIJLAGE A5

MODELLEREN MET MODEL C (UTRECHT)

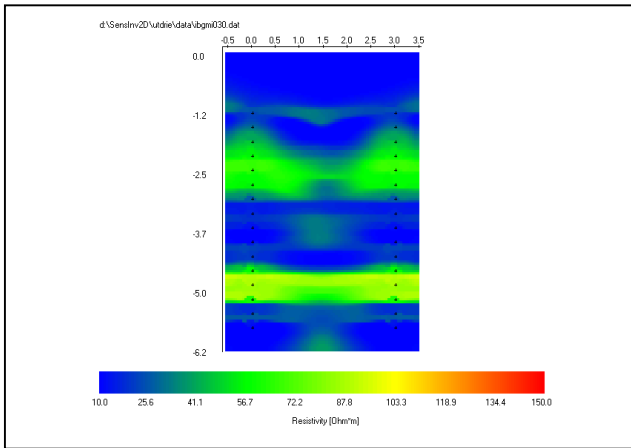
1) AM-BN (684: skip 0,2,4,6,8,10,12,13,14;
10-150 Ohm-m)



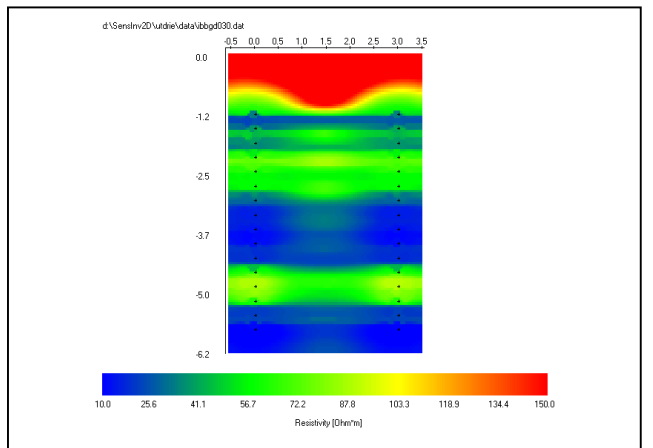
2) NMA-B, AMN-B = well log
96; skip 0,2; 10-150 Ohm)



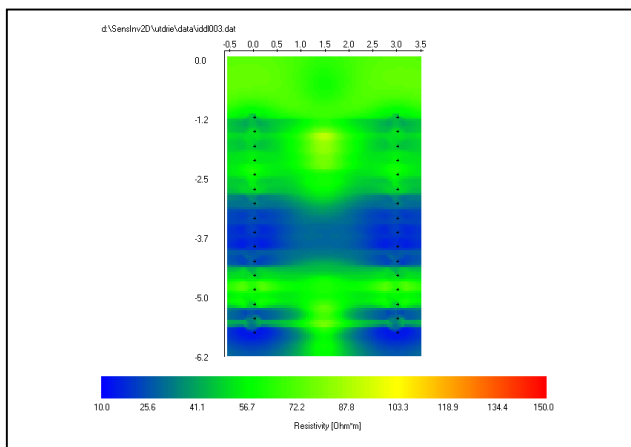
3) NMA-B, B-AMN = well log comp.
(768; 10-150 Ohm-m)



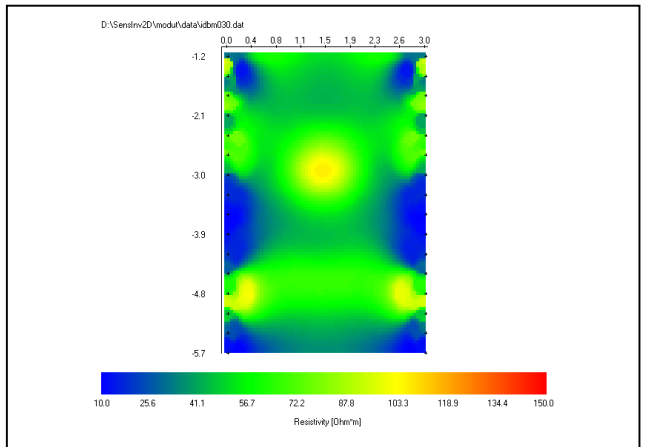
4) combination of 1 & 2 (780;10-150
10-150 Ohm-m)



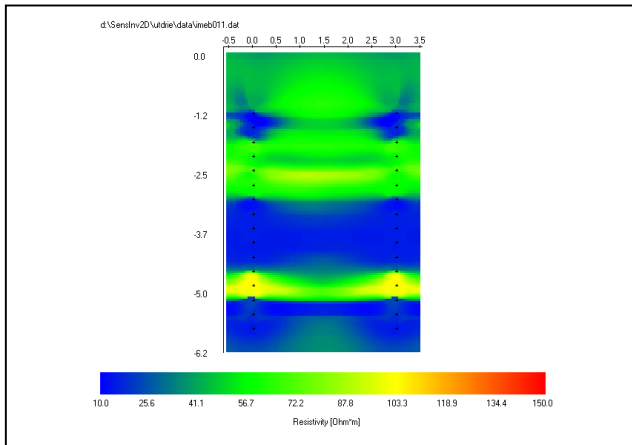
5) circ.dip.dip (928: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



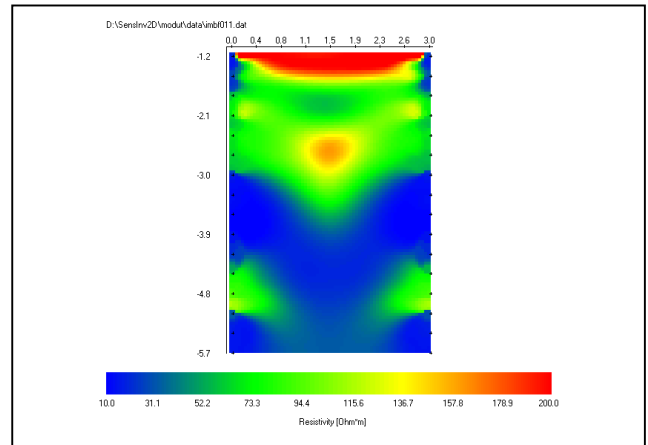
6) circ.dip.dip (928: AB=MN=2.1 m;
10-150 Ohm-m)



7) A-MN B, MN A-B = Meekes short
(84; 10-150 Ohm-m)



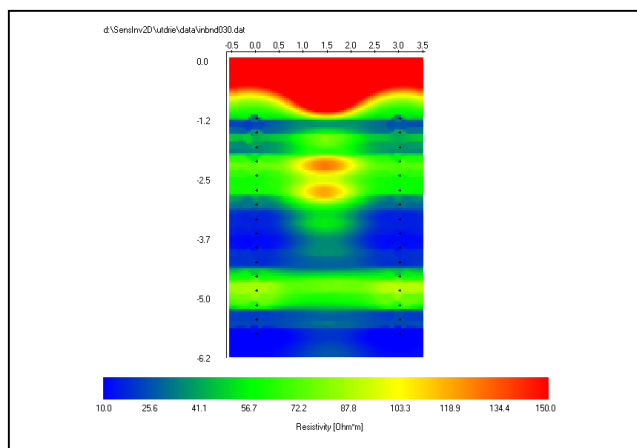
8) A-MN B, MN A-B = Meekes long
(148; 10-200 Ohm-m)



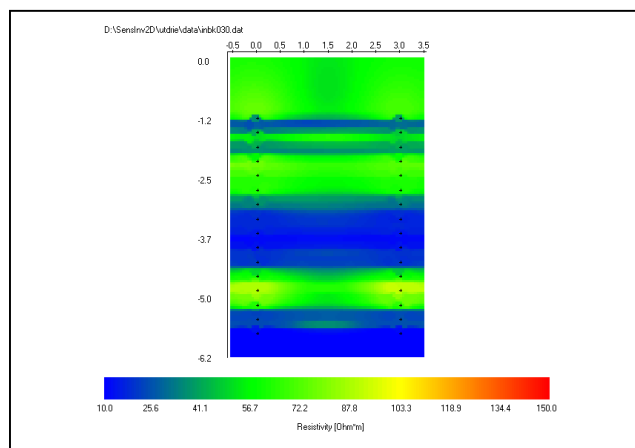
BIJLAGE A6

MODELLEREN MET MODEL D (UTRECHT)

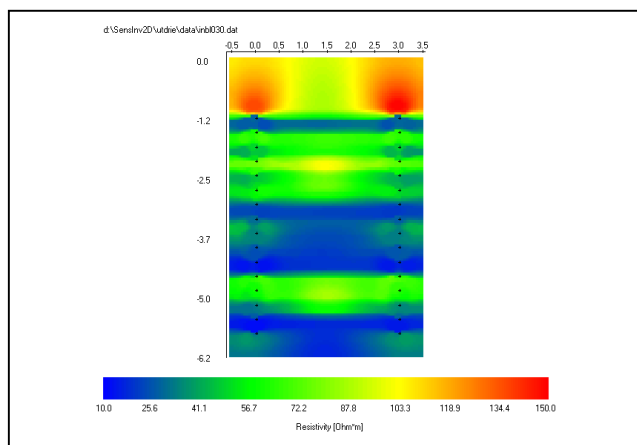
1) AM-BN (684: skip 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14; 10-150 Ohm-m)



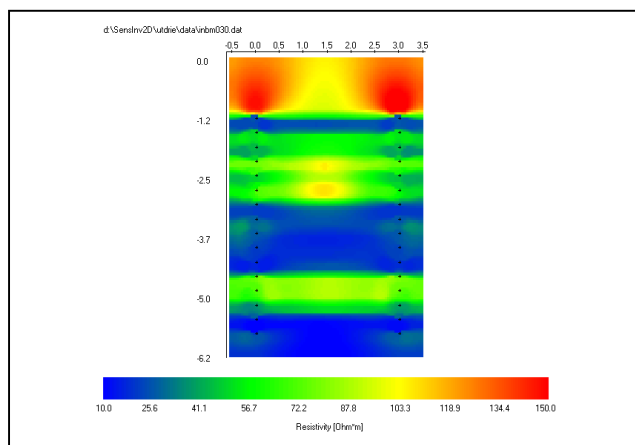
2) AM-BN (225: skip 0; 10-150 Ohm-m)



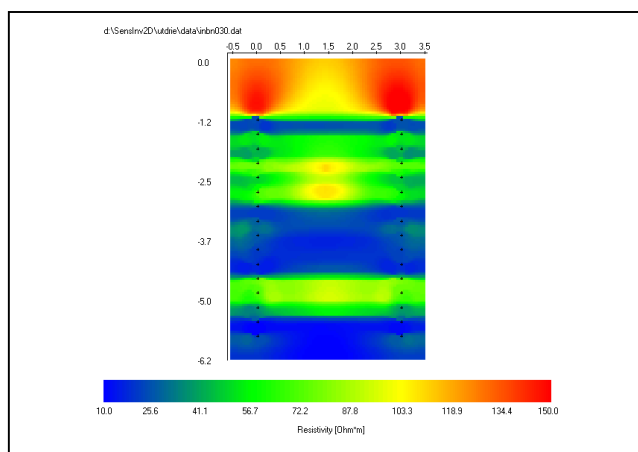
3) AM-BN (279: skip 2, 6, 10 & 13; 10-150 Ohm-m)



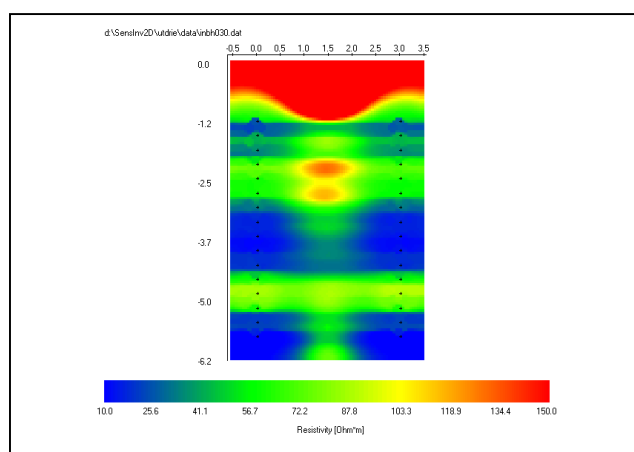
4) AM-BN (410: skip 2, 4, 6, 10, 12, 13, 14; 10-150 Ohm-m)



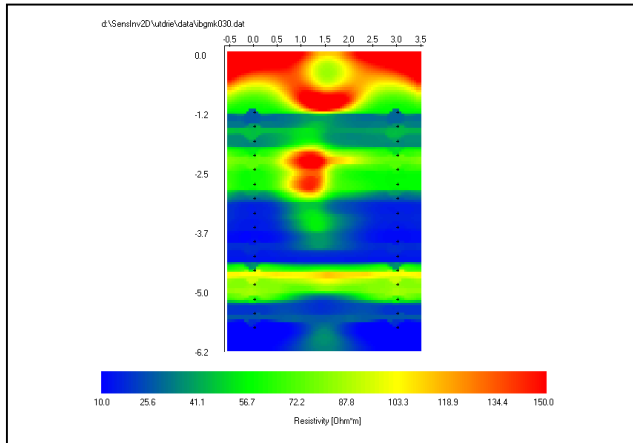
5) AM-BN (459: skip 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14; 10-150 Ohm-m)



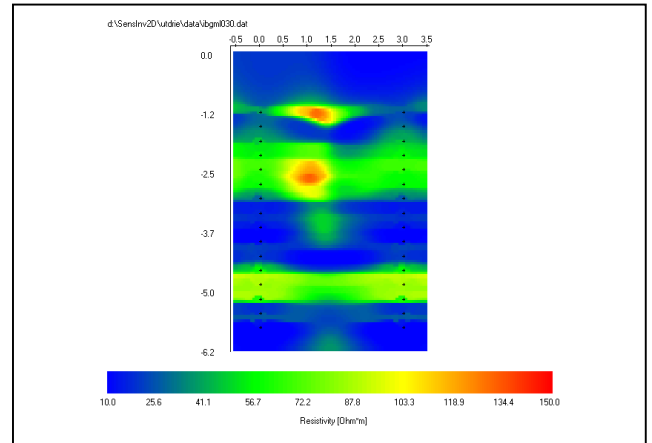
6) AM-NB (675: skip 0, 2, 4, 6, 8, 11, 12, 13, 14; 10-150 Ohm-m)



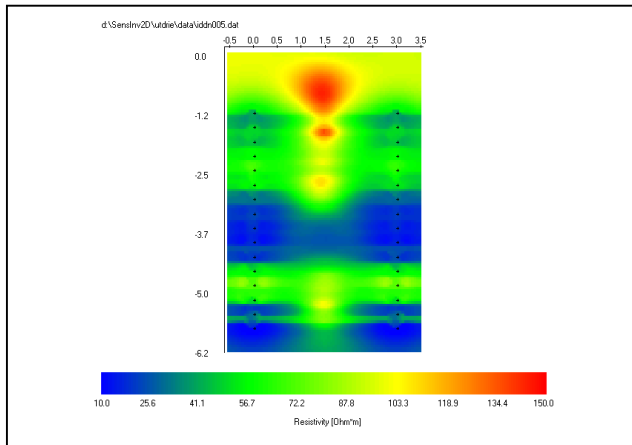
7) NMA-B, AMN-B = well log (96: skip 0, 2;
10-150 Ohm-m)



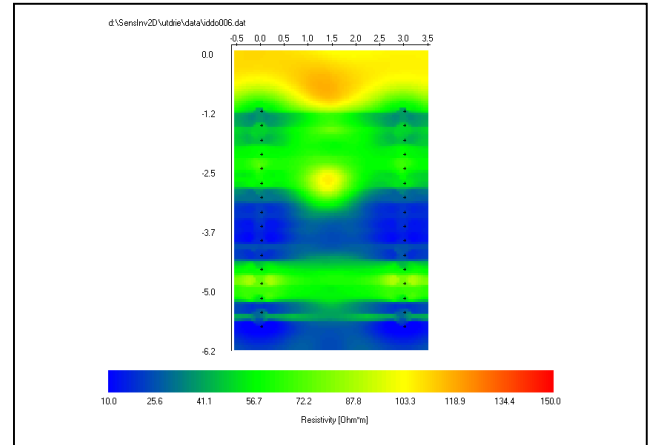
8) NMA-B, B-AMN = well log.
compl. (768; 10-150 Ohm-m)



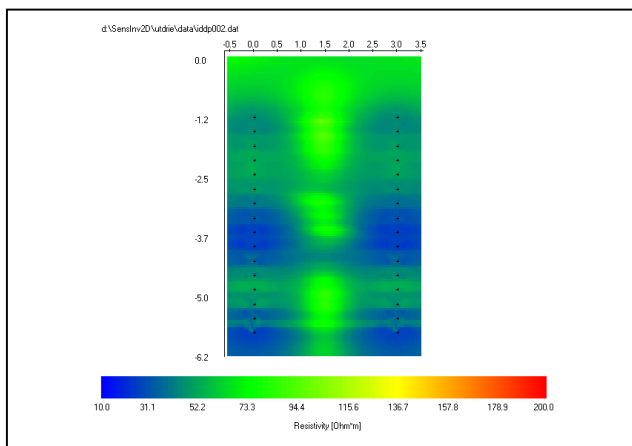
9) circ.dip.dip (928: AB=MN=1.5 m;
10-150 Ohm-m)



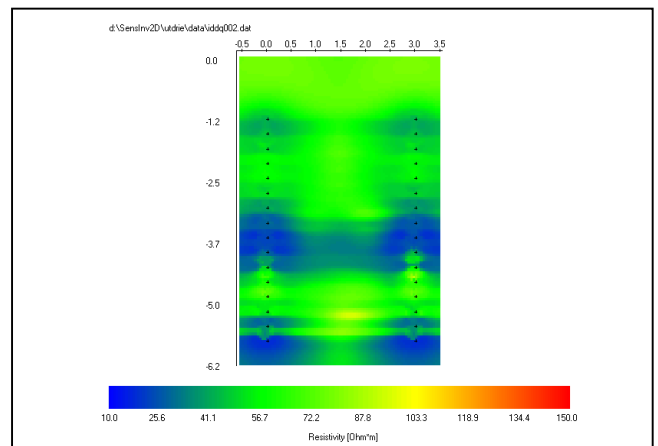
10) circ.dip.dip. edit (860:
AB=MN=1.5 m; 10-150 Ohm-m)



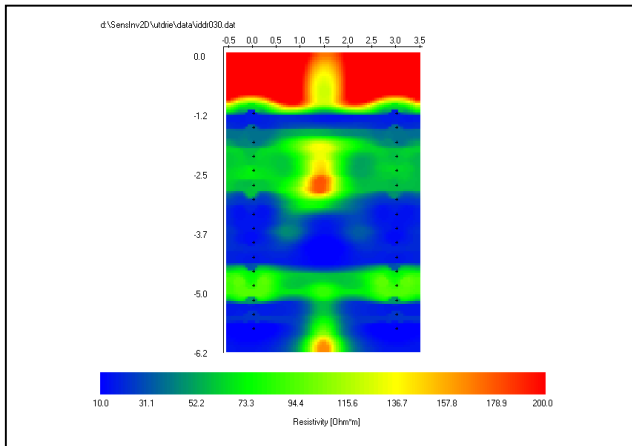
11) circ.dip.dip (919: AB=MN=1.8 m;
10-150 Ohm-m)



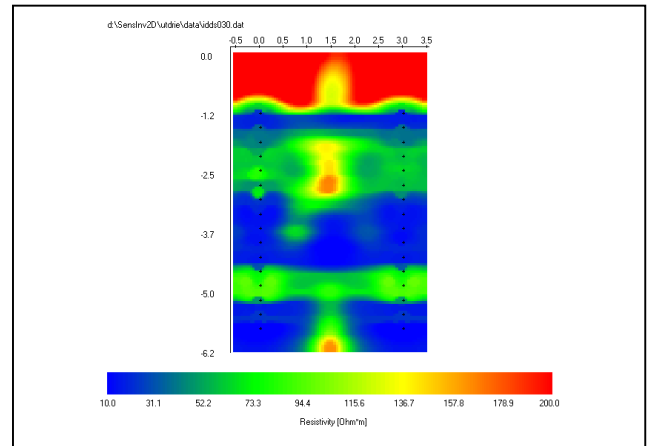
12) circ.dip.dip. edit (871: AB=MN=1.8m;
10-150 Ohm-m)



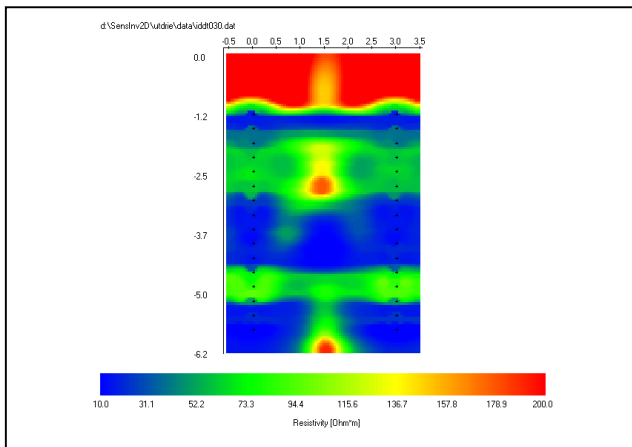
13) circ.dip.dip (928: AB=MN=2.1 m;
10-200 Ohm-m)



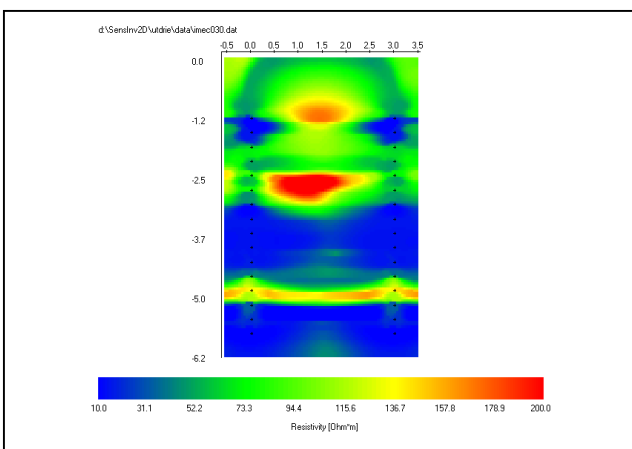
14) circ.dip.dip. edit (916: AB=MN=2.1 m;
10-200 Ohm-m)



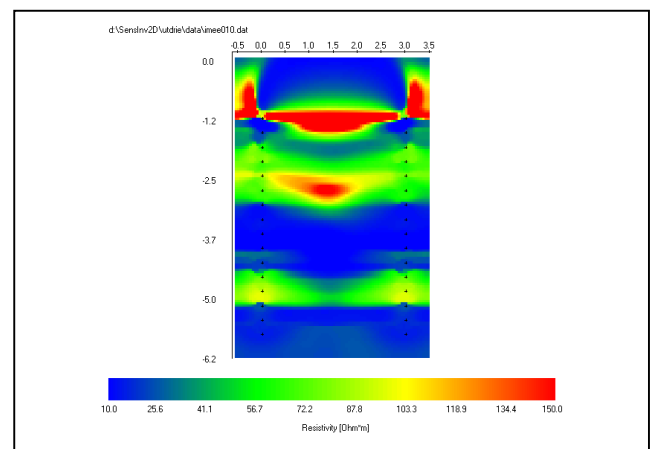
15) circ.dip.dip short (464: AB=MN=2.1 m;
10-200 Ohm-m)



16) A-MN B, MN A-B = Meekes short
(84; 10-200 Ohm-m)



17) A-MN B, MN A-B = Meekes
long (148; 10-150 Ohm-m)

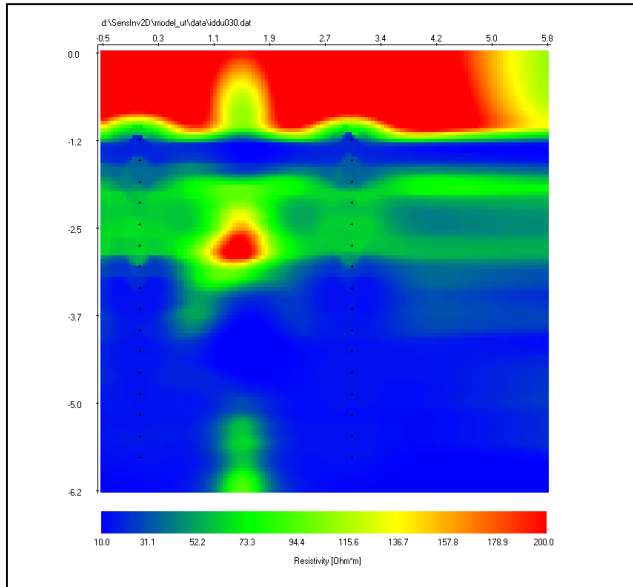


BIJLAGE A7

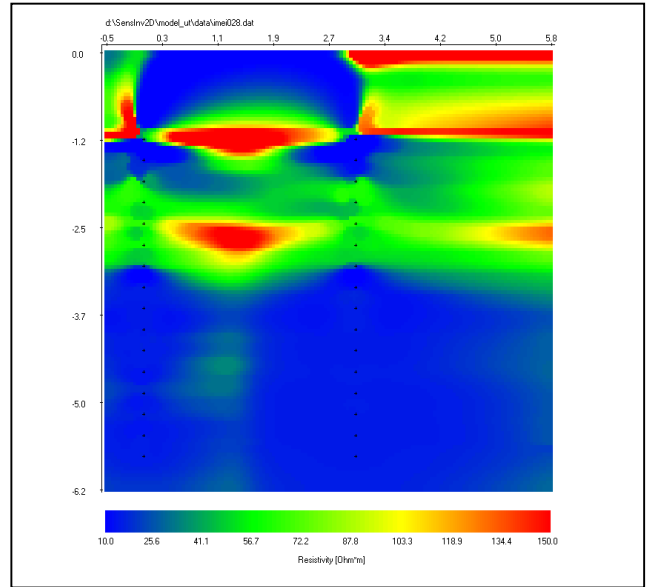
MODELLEREN MET VERSCHILLENDE BOORGATAFSTANDEN (UTRECHT)

Distance between boreholes: 3 m (V/H=1.5)

Model D: circ.dip.dip short (10-200 Ohm-m)

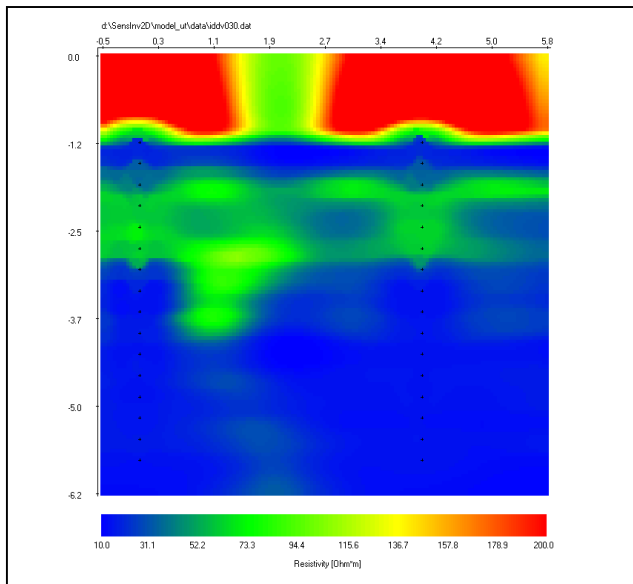


Model C: Meekes long (10-150 Ohm-m)

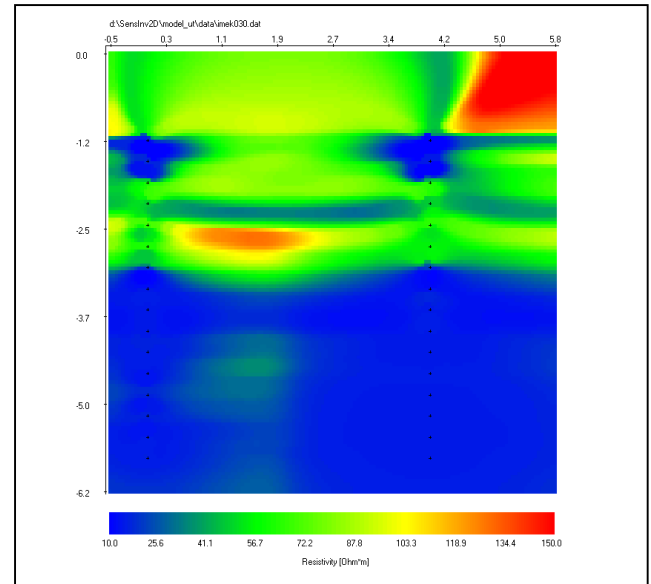


Distance between boreholes: 4 m (V/H=1.13)

Model D: circ.dip.dip short (10-200 Ohm-m)

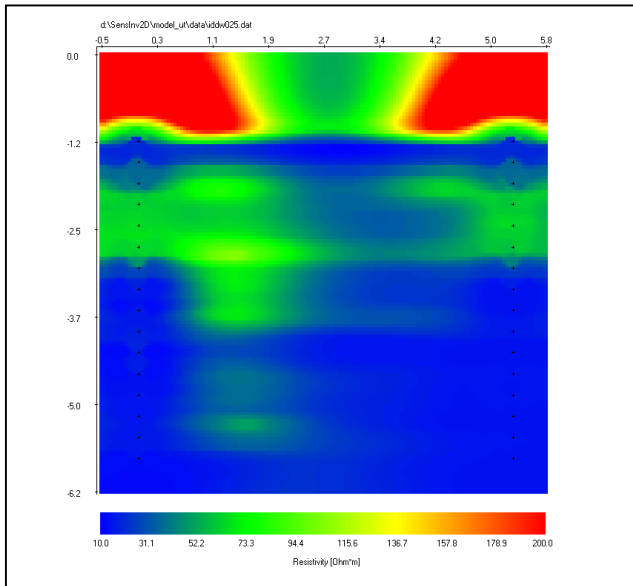


Model C: Meekes long (10-150 Ohm-m)

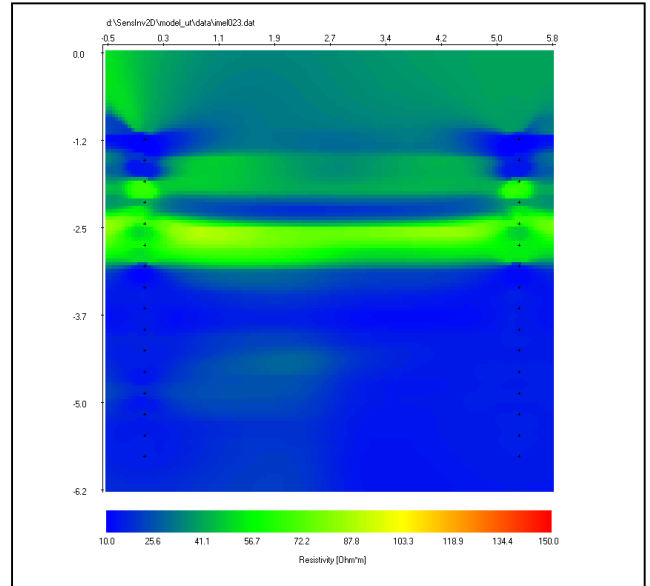


Distance between boreholes: 5.3 m (V/H=0.85)

Model D: circ.dip.dip short (10-200 Ohm-m)

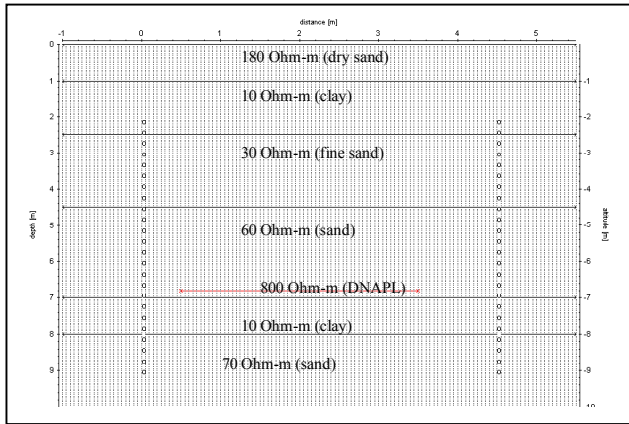


Model C: Meekes long (10-150 Ohm-m)

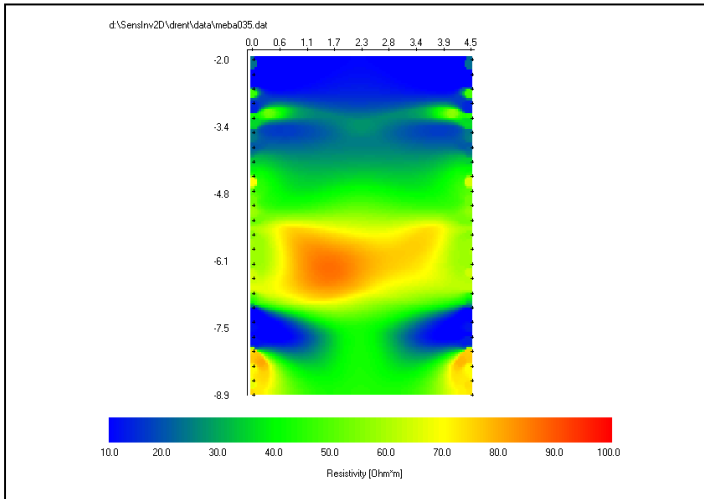


BIJLAGE A8

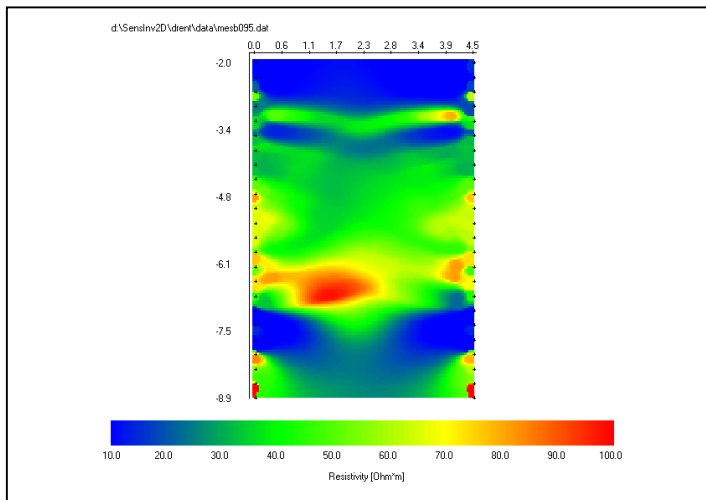
MODELLEREN VOOR LOCATIE DRENTHE



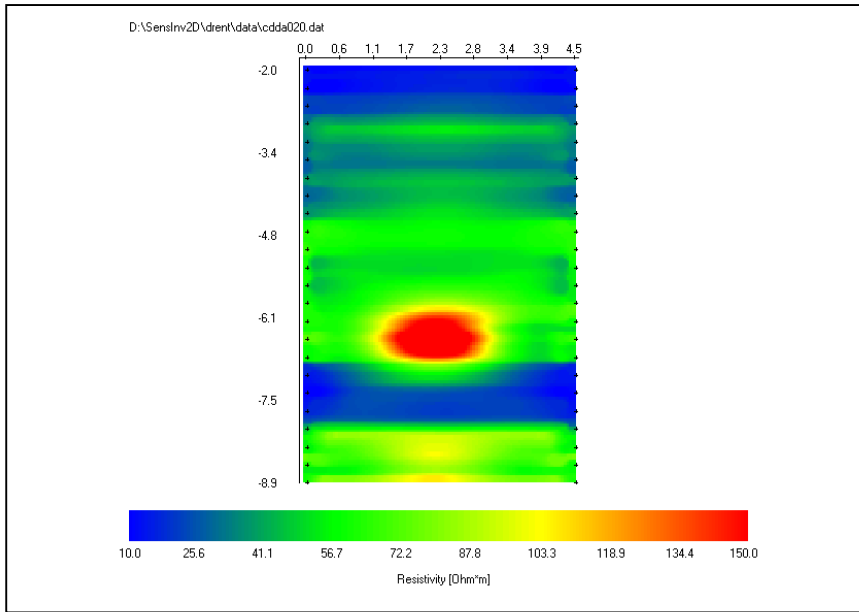
Meekes long (376, 9%)



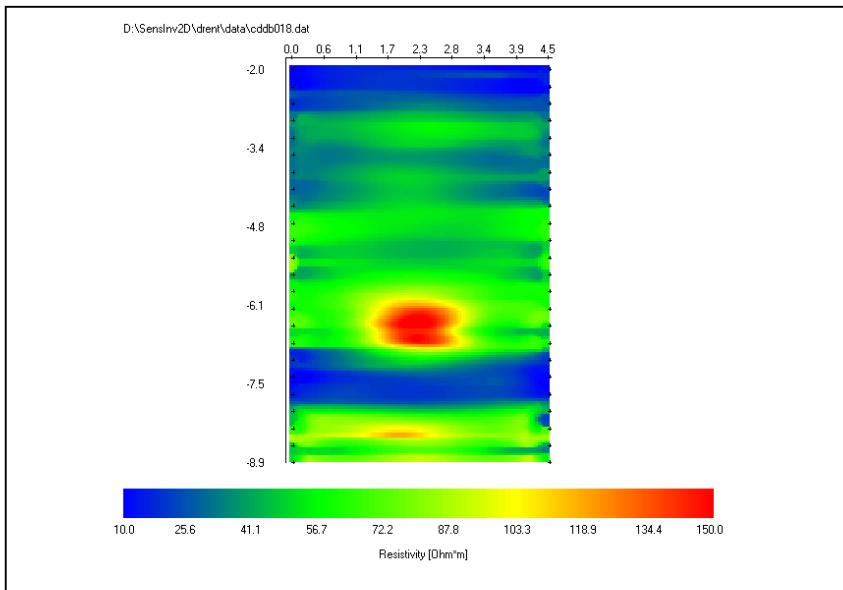
Meekes short (168; 7%)



Circulating dipole-dipole long (1029, 15%, 20 inv, 10-150.)



Circulating dipole-dipole short (518, 15%, 18 inv, 10-150)



BIJLAGE B

OVERZICHTEN UITGEVOERD VELDWERK

BIJLAGE B1

OVERZICHT UITGEVOERD VELDWERK OP LOCATIE UTRECHT

Het hieronder beschreven veldwerk is uitgevoerd in maart (onderdelen 1-4) en juni (onderdeel 5) 2002.

- 1) Drie evenwijdige continue geo-elektrische profielen zijn gemeten vanaf het oppervlak (TNO-NITG). Lijn 1 loopt over boorgaten A, B en C, lijn 3 over boorgaten E en F, en lijn 2 ligt hier midden tussen (figuur 4).
- 2) Er zijn vijf peilbuizen gezet volgens de in figuur 4 getoonde plattegrond (Grontmij). De eigenschappen van de peilbuizen staan in onderstaande tabel B1.1.

Tabel B1.1. Karakteristieken van de peilbuizen op locatie Utrecht.

Einddiepte	6 m-mv
Boormethode	pulsboring 90 mm
Omstorting filter	0.8-1.8 m-mv bentoniet, >1.8 m-mv niets
Diepte volkomen filter	1-6 m-mv
Breedte verfiltering	0.8 mm
Buitendiameter peilbuis	66 mm (2 duims)
Binnendiameter peilbuis	50 mm
Materiaal peilbuis	PVC
Filterkous	vergeten
Traject waarover de 16 actieve elektrodes zitten	1.3-5.8 m-mv

- 3) De ERT-kabels zijn geplaatst (Grontmij en TNO-NITG). Tijdens het plaatsen van de kabels moest er gepompt worden, omdat de buizen vanwege de grote filters en de afwezigheid van een filterkous, snel volliepen met sediment. Een andere complicatie was dat er maar een enkel touwtje aan de haak in de bodem van de peilbuis was bevestigd (zie paragraaf 2.3). Dit was een vergissing. Om de ERT-kabel toch strak in het boorgat te krijgen waren er gedurende het veldwerk stukjes PVCpijp tussen de elektrodes aan de kabel bevestigd.
- 4) Het uitvoeren van de ERT-metingen (TNO-NITG). Onderstaande tabellen B1.2 en B1.3 geven een overzicht van de uitgevoerde ERT-metingen.

Tabel B1.2. Aantal metingen per meetvlak voor Utrecht (9 meetvlakken, 2x16 elektrodes).

Configuratie	Aantal metingen	Uitgevoerd tussen boorgaten
AM-BN (crosshole dipool-dipool)	(684 ^a)	AB (3 m breed), AE (5.8 m breed)
NMA-B, AMN-B (normal well log)	96	alle (9 vlakken)
A-MN B, MN A-B (Meekes-long)	148 ^c	alle
Circulating dip.-dip.-kort AB=MN= 2.1 m	458 ^b	alle
Aantal metingen per vlak	702 (1386)	

^a metingen met skip: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14

^b de MN metingen zijn gehalveerd (geen reciproke metingen)

^c minimaal 2 maximaal 3 stacks, rest van de configuraties 1 stack

Tabel B1.3. Aantal controlemetingen op locatie Utrecht tussen boringen A en B).

Type metingen	Aantal
Dubbelmetingen	148 (Meekes) 96 (normal well log) 100 (deel van de cdd)
Spanningscontrole	116
Reciprokemetingen	93 (circulating dipool-dipool)
Totaal aantal controlemetingen	553

- 5) Het nemen van grondwatermonsters met de Consipper op 3 boorpunten (2 of 3 verschillende dieptes, Grontmij). De monsters zijn genomen voor verificatie van de ERT-metingen. Het sedimentmonster bleef niet in de monsterbus zitten. Het sediment was waarschijnlijk te los en daarom konden er geen grondmonsters worden genomen (3x geprobeerd).

Vanwege de grote snelheid waarmee het sediment na het pompen weer het boorgat inliep was het niet mogelijk om geofysische boorgatmetingen (logging) te verrichten.

BIJLAGE B2

OVERZICHT UITGEVOERD VELDWERK OP LOCATIE DRENTHE

Het hieronder beschreven veldwerk is uitgevoerd in juni (onderdelen 1-5) en september (onderdeel 6) 2002.

- 1) De ingang tot de galvanohal is verbreed en het dak boven de 5-boorpunten is uitgebroken, door een voor het project ingehuurde sloper, om ruimte te maken voor de boorstelling.
- 2) Er zijn vijf peilbuizen gezet volgens de in figuur 4 getoonde plattegrond (Grontmij). De eigenschappen van de peilbuizen staan in onderstaande tabel B2.1. Om miscommunicatie met de boorploeg te voorkomen zijn de filters op locatie uitgelegd en is er in de onderkant van de peilbuizen door twee geboorde gaatjes een kunststof 'tie-wrap' aangebracht. Door de tie-wrap en de peilbuis is een dubbel vliegertouwje aangebracht (Grontmij en TNO-NITG). De twee uiteinden van het dubbele touwtje zijn aan het oppervlak door de boorploeg aan de peilbuis vastgetapet. Het eventueel aanwezige sediment is uit de peilbuizen gepompt.

Tabel B2.1. Karakteristieken van de peilbuizen op locatie Drenthe.

	ondiepe peilbuis	diepe peilbuis
Einddiepte [m-mv]	10	25
Boormethode	pulsboring	pulsboring
Diepte volkomen filter	2-10 [m-mv]	17-25 [m-mv]
Breedte verfiltering	1 mm	1 mm
Lengte verticale filters	4 cm	4 cm
Afstand tussen de filters	4 cm	4 cm
Buitendiameter peilbuis	50 mm	50 mm
Binnendiameter peilbuis	44 mm	44 mm
Materiaal peilbuis	PVC	PVC
Filterkous	aangebracht	aangebracht
Traject waarover de 24 actieve elektrodes zitten	2.55-9.45 [m-mv]	17.2-24.1 [m-mv]

- 3) De ERT-kabels zijn in de boorgaten geplaatst door de onderkant van de kabel aan het ene uiteinde van het vliegertouw te knopen en met het andere uiteinde de ERT-kabel strak te trekken (TNO-NITG).
- 4) Het uitvoeren van de ERT-metingen (TNO-NITG). Het meetprogramma is gebaseerd op: de ervaring op locatie Utrecht (zie paragraaf 4.2) en de Drenthe modellering (zie bijlage A). De lange circulating dipool-dipool tabel (1029 metingen per vlak) viel af. Ook zijn de 2x2 meetvlakken met de afstand die veel langer is dan de maximaal aanbevolen afstand, die bij Utrecht metingen geen resultaat opleverden, niet gemeten. De AM-BN cross-hole metingen zijn ook afgefallen wegens gebrek aan resultaat op locatie Utrecht. Desondanks zijn er op locatie Drenthe bijna 2 keer zoveel metingen uitgevoerd als op locatie Utrecht, omdat: er op twee, in plaats van de oorspronkelijk geplande één, dieptes is gemeten en er 24 elektrodes per boorgat zitten (16 in Utrecht). Het uitvoeren van 2 keer zoveel metingen was mogelijk in ongeveer hetzelfde aantal dagen als op locatie Utrecht, omdat de locatie permanent toegankelijk was voor de metingen en er dus lange meetdagen konden worden gemaakt (7 dagen van ~16 uur).

Tabel B2.2 geeft een overzicht van de uitgevoerde ERT metingen.

Tabel B2.2. Aantal metingen per meetvlak voor Drenthe (7 meetvlakken op twee dieptes, 2x24 elektrodes).

Configuratie	Aantal metingen per vlak	Uitgevoerd tussen boorgaten
NMA-B (normal well log)	86*	alle (2x7 vlakken)
A-MN B, MN A-B (Meekes)	376 (dubbelmeting)	alle
circulating dip.dip. short (skip 6)	518*	alle
Aantal metingen per vlak	1356 (~ 5 uur)	

* over twee vlakken een dubbelmeting

- 4) Direct na de laatste ERT-metingen zijn er geo-elektrische boorgatmetingen in alle gaten verricht (TNO-NITG). De gemeten elektrische weerstanden kunnen gebruikt worden als vergelijking met de weerstanden gemeten met de ERT-metingen.
- 5) Het nemen van 8 grondwatermonsters over die verticalen ter verificatie van de ERT-metingen (Grontmij).

Vanwege het verharde oppervlak (betonnen vloer met hier en daar kelders eronder) konden er op deze locatie geen geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak worden uitgevoerd.

BIJLAGE C

NAUWKEURIGHIED VAN METINGEN

BIJLAGE C1

NAUWKEURIGHEID VAN DE METINGEN OP LOCATIE UTRECHT

Na ruim 1 week in het vervuilde water te hebben gezeten waren de elektrodes van de ERT-kabels beslagen met een bruin/zwarte aanslag. De kunststof kabel was niet aangetast. De aanslag kon met een ijzerborstel en een verplosser slechts ten dele worden verwijderd. De aanslag had geen invloed op de stroomsterkte.

De spanningsmetingen die zijn gemaakt om te controleren of de elektroden een coherent beeld vertonen leverden goede resultaten op. De direct gemeten en de uit twee elektrodecombinaties berekende voltages zijn vergelijkbaar; 82% van de meetpunten heeft een afwijking die kleiner is dan 10 mV en 54% van de punten heeft zelfs een afwijking die kleiner is dan 2 mV (gemiddelde meetwaarde 300 mV). Dit duidt erop dat eventueel aanwezige SP-effecten als gevolg van zwerfstromen in de mV range zitten en dat er geen andere (onbekende) factoren zijn die de metingen constant verstoren.

In onderstaande tabel C1.1. staat een overzicht van de stroomsterktes (I), de gemeten potentiaalverschillen (V), de grootte van de geometrische factoren (k) en de afwijkingen tussen de dubbelmetingen. Op basis van met name deze tabel is een aantal observaties over de datakwaliteit gemaakt.

Algemene observaties met betrekking tot de metingen:

- V neemt af bij een toenemende configuratiefactor ($V > 1000$ mV als $k < 7$, $V < 10$ mV als $k > \sim 100-500$);
- het elektrische contact tussen de elektrodes in boorgat E en de ondergrond was het slechtst van alle boorgaten, want alle metingen met elektrodes in dit boorgat bevatten relatief veel meetpunten met een lage stroomsterkte (50 mA);
- de metingen met de grote boorgatafstanden (vlakken AE en CD die ~ 5.3 m breed zijn) leveren geen lagere V of I dan de overige vlakken (~ 3 m breed);
- vlak voor de accu van het geo-elektrische instrument verwisselt moet worden wegens een te lage spanning daalt de stroomsterkte van de meting niet;
- bij het stacken van de metingen zijn de afwijkingen tussen beide gemeten potentiaalwaardes procentueel klein (96-100% van de metingen $< 3\%$ afwijking);
- het herhalen van een meting op een andere tijdstip kan wel grote verschillen opleveren (1-13% heeft een afwijking van $> 40\%$).

Observaties met betrekking tot de Meekes metingen:

- de grote afwijking tussen de dubbelmetingen (13-16% een V/I verschil van $> 40\%$), de relatief grote k-factoren en de hiermee samenhangende lage potentiaalverschillen (47% < 30 mV) duiden erop dat deze configuratie zeer gevoelig is;
- de dubbelmetingen met de grote afwijkingen zijn niet duidelijk gerelateerd aan grote configuratiefactoren en/of lage stroomsterktes.

Observaties met betrekking tot de normal well logging metingen:

- de kleine k-factoren en de grote potentiaalverschillen (97% > 30 mV) leiden tot een goede datakwaliteit;
- echter 5% van dubbel gemeten data laat een V/I afwijking zien van groter dan 40%.

Observaties met betrekking tot de AM-BN cross-hole metingen:

- er zijn geen dubbelmetingen verricht met deze configuratie, maar de relatief grote potentiaalverschillen (98% > 30 mV) en de grote stroomsterktes (89% 200 mA) duiden op een goede datakwaliteit;
- bij het eerste meetpunt waar de stroomelektrode (A) één plek versprongen is, is de stroomsterkte vaak verlaagd (100 of 50 mA i.p.v. 200 mA).

Observaties met betrekking tot de circulating dipool-dipool metingen:

- de grote potentiaalverschillen (86% > 30 mV) en de beperkte afwijking tussen de dubbelmetingen (1% >40% afwijking) duiden op een goede datakwaliteit;
- de elektrodeposities waarbij de rechte lijnen tussen de stroom- en de potentiaalelektrodes elkaar ongeveer loodrecht kruisen leveren vaak slechte data (een grote reciproke fout en een verkeerd teken bij het potentiaalverschil); voor een betere inversie moeten deze punten uit de dataset gefilterd worden.

Tabel C.1.1 Overzicht kwaliteit ERT-metingen Utrecht.

Electrode configuration	Boreholes	Date	Number of points	Current strength - I [mA]	Potential difference - V [mV]	Configuration factor - k	V/I difference 1st and 2nd round	Wrong sign (+/-)														
				200 100 50 20	>100 30-100 10-30 <10	<10 10-30 30-100 100-250 >250	<20% 20-40% >40%															
Circulating dipole-dipole	AB (2.95 m)	20-Mar-02	464	88%	12%	0%	0%	62%	25%	8%	4%	33%	22%	20%	23%	2%	92%*	7%*	1%*	7%		
	AB (2.95 m)	20-Mar-02	93	89%	11%	0%	0%	52%	28%	13%	7%	94%**	3%**	3%**	10%							
	AD (2.90 m)	20-Mar-02	464	100%	0%	0%	0%	68%	22%	6%	4%				6%							
	BC (3.1 m)	25-Mar-02	406	80%	20%	0%	0%	63%	23%	11%	3%				6%							
	BD (3.05 m)	22-Mar-02	463	84%	16%	0%	0%	63%	24%	9%	4%				6%							
	BE (3.0 m)	21-Mar-02	464	75%	19%	6%	0%	62%	23%	10%	5%				10%							
	CE (3.0 m)	25-Mar-02	405	86%	8%	6%	0%	69%	20%	7%	4%				12%							
	DE (3.25 m)	22-Mar-02	464	91%	3%	6%	0%	61%	25%	10%	4%				5%							
	AE (5.25 m)	21-Mar-02	464	93%	1%	6%	0%	62%	20%	14%	4%				1%							
	CD (5.4 m)	25-Mar-02	405	90%	10%	0%	0%	69%	13%	10%	8%				1%							
	Mean				88%	10%	2%	0%	63%	22%	10%	5%									6%	
	Well logging	AB (2.95 m)	19-Mar-02	96	38%	61%	1%	0%	71%	28%	1%	0%	54%	46%	0%	0%	0%	75%	20%	5%	0%	
		AB (2.95 m)	25-Mar-02	96	64%	36%	0%	0%	82%	18%	0%	0%				0%						
AD (2.90 m)		20-Mar-02	96	65%	35%	0%	0%	80%	19%	1%	0%				0%							
BC (3.1 m)		25-Mar-02	92	24%	76%	0%	0%	76%	24%	0%	0%				0%							
BD (3.05 m)		22-Mar-02	96	32%	67%	1%	0%	78%	22%	0%	0%				0%							
BE (3.0 m)		21-Mar-02	96	23%	47%	30%	0%	71%	23%	6%	0%				0%							
CE (3.0 m)		25-Mar-02	94	24%	50%	26%	0%	68%	23%	7%	2%				2%							
DE (3.25 m)		22-Mar-02	96	59%	14%	27%	0%	74%	19%	7%	0%				0%							
AE (5.25 m)		21-Mar-02	96	70%	3%	27%	0%	70%	23%	7%	0%				0%							
CD (5.4 m)		25-Mar-02	92	46%	54%	0%	0%	72%	28%	0%	0%				0%							
Mean					45%	44%	11%	0%	74%	23%	3%	0%									0%	
Meekes		AB (2.95 m)	19-Mar-02	148	27%	72%	1%	0%	19%	35%	35%	11%	16%	12%	27%	25%	20%	68%	16%	16%	1%	
		AB (2.95 m)	22-Mar-02	148	46%	54%	0%	0%	27%	30%	31%	12%										0%
	AD (2.90 m)	20-Mar-02	147	61%	39%	0%	0%	29%	32%	29%	10%										0%	
	BC (3.1 m)	25-Mar-02	142	17%	83%	0%	0%	20%	36%	32%	12%										0%	
	BD (3.05 m)	22-Mar-02	148	26%	74%	0%	0%	22%	39%	28%	11%										0%	
	BE (3.0 m)	21-Mar-02	148	26%	36%	38%	0%	19%	29%	31%	21%										2%	
	CE (3.0 m)	25-Mar-02	144	35%	33%	32%	0%	19%	29%	36%	16%										2%	
	DE (3.25 m)	22-Mar-02	148	45%	19%	36%	0%	20%	28%	29%	23%										1%	
	AE (5.25 m)	21-Mar-02	148	68%	0%	32%	0%	20%	30%	36%	14%										1%	
	CD (5.4 m)	25-Mar-02	144	35%	65%	0%	0%	19%	23%	35%	23%										0%	
	Mean				39%	48%	14%	0%	21%	31%	32%	15%										1%
	Crosshole AM-BN	AB (2.95 m)	20-Mar-02	684	90%	10%	0%	0%	78%	20%	2%	0%	56%	18%	22%	2%	0%					0%
		AE (5.25 m)	21-Mar-02	684	88%	2%	10%	0%	92%	6%	2%	0%	56%	29%	13%	0%	0%					0%
Mean				89%	6%	5%	0%	85%	13%	2%	0%										0%	

* based on 100 duplicate measurement points

BIJLAGE C2

NAUWKEURIGHEID VAN DE METINGEN OP LOCATIE DRENTHE

In de tabellen C2.1 en C2.2 (ondiep en diep) staan overzichten van de stroomsterktes (I), de gemeten potentiaalverschillen (V), de grootte van de geometrische factoren (k) en de afwijkingen tussen de dubbelmetingen. Op basis van deze tabellen is een aantal observaties over de datakwaliteit gemaakt.

Algemene observaties met betrekking tot alle metingen:

- alle meetpunten hebben een stroomsterkte van 200 mA; dit duidt op een zeer goede datakwaliteit;
- de metingen van de ondiepe vlakken hebben een iets betere kwaliteit (dubbelmetingen iets kleinere afwijking, potentiaalverschillen iets groter) dan de metingen van de diepe vlakken, wellicht heeft dit te maken met het feit dat de ondiepe vlakken iets korter (H iets kleiner) zijn dan de diepe vlakken.

Observaties met betrekking tot de Meekes metingen:

- de afwijkingen tussen de dubbelmetingen zijn, zeker vergeleken met de Utrecht metingen, klein (95.5% < 20% afwijking, 2.5% > 40% afwijking), dit komt waarschijnlijk doordat meetpunten met zeer grote k -factoren (> 820) van tevoren uit de tabel zijn gehaald en mede hieruit volgen de grote stroomsterktes;
- het aantal metingen met een klein potentiaalverschil (<10 mV: 2.5% van de data) is veel kleiner dan bij de Utrecht metingen (15% van de data);
- het feit dat alle metingen dubbel zijn gemeten heeft geholpen om te zien of afwijkende meetwaarden door fouten of door daadwerkelijke afwijkingen in de ondergrond veroorzaakt zijn;
- het aantal metingen met lagere potentiaalverschillen (10-30 mV, <10 mV) is over het algemeen iets groter in metingen over de vlakken met de grootste boorgatafstanden (met name CE).

De volgende observaties met betrekking tot de circulating dipool-dipool metingen duiden erop dat de datakwaliteit goed is:

- grote potentiaalverschillen (88% >30 mV, 1% <10 mV);
- kleine afwijkingen tussen de dubbelmetingen (98% van de metingen <20% afwijking, 1% van de metingen >40% afwijking).

De volgende observaties met betrekking tot de normal well logging metingen duiden erop dat de datakwaliteit zeer goed is:

- zeer kleine k -factoren (<10);
- zeer grote potentiaalverschillen (>100 mV);
- kleine afwijkingen tussen de dubbelmetingen (93% van de metingen <20% afwijking, 0% van de metingen >40% afwijking);
- de SN-weerstanden van de boorgatmetingen komen goed overeen met de SN-en LN-weerstanden gemeten met de boorgatmeettabel van de ERT-opstelling (zie grafieken op volgende pagina).

Tabel C2.1. Overzicht kwaliteit Drenthe metingen (ondiepe vlakken).

Electrode configuration	Boreholes	V/H	Date	Numb. of points	Current strength 200 [mA]	Potential difference - V [mV]				Configuration factor - k				V/I difference 1st and 2nd round			Bad points		
						>100	30-100	10-30	<10	<10	10-30	30-100	100-250	>250	<20%	20-40%	>40%		
Circulating dipole-dipole	AB (3.6 m)	1.9	25/6/2002	518	100%	82%	14%	4%	1.4%	23%	19%	29%	20%	9%				7	
	AD (3.85 m)	1.8	25/6/2002	518	100%	86%	10%	3%	1.0%	23%	19%	26%	20%	13%				8	
	BD (4 m)	1.7	26/6/2002	518	100%	77%	19%	3%	0.6%	23%	19%	26%	19%	14%				6	
	BE (4.4 m)	1.6	27/6/2002	518	100%	71%	22%	7%	0.2%	23%	19%	26%	9%	25%				6	
	BC (4.55 m)	1.5	26/6/2002	518	100%	66%	20%	11%	3.1%	23%	19%	26%	6%	27%				6	
	DE (4.65 m)	1.5	25/6/2002	518	100%	73%	21%	6%	0.0%	23%	19%	26%	6%	27%				0	
		26/6/2002		518	100%	73%	21%	6%	0.0%						99.4%	0.4%	0.2%	18	
	CE (4.95 m)	1.4	27/6/2002	518	100%	68%	13%	19%	1%	23%	17%	27%	7%	26%				7	
	Mean				100%	75%	17%	7%	1%	23%	19%	26%	12%	20%	99%	0%	0%	0%	7
	Well logging	AB (3.6 m)		25/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0
AD (3.85 m)			25/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0	
BD (4 m)			26/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0	
BE (4.4 m)			27/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0	
BC (4.55 m)			26/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0	
DE (4.65 m)			25/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%				0	
				26/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0	
CE (4.95 m)			27/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0	
Mean					100%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0
Meekes		AB (3.6 m)	1.9	25/6/2002	376	100%	50%	36%	13%	1%	6%	10%	22%	31%	31%	93.1%	2.1%	4.8%	3
	AD (3.85 m)	1.8	25/6/2002	376	100%	51%	34%	14%	1%	6%	10%	22%	30%	32%				0	
	BD (4 m)	1.7	26/6/2002	376	100%	58%	32%	9%	1%	6%	10%	22%	30%	32%	98.4%	0.8%	0.8%	3	
	BE (4.4 m)	1.6	27/6/2002	376	100%	56%	31%	10%	3%	6%	10%	22%	29%	33%	94.7%	2.4%	2.9%	6	
	BC (4.55 m)	1.5	26/6/2002	376	100%	46%	35%	17%	1%	6%	10%	22%	29%	33%	97.3%	1.1%	1.6%	7	
	DE (4.65 m)	1.5	25/6/2002	376	100%	43%	32%	23%	2%	6%	10%	22%	29%	33%	91.5%	5.6%	2.9%	0	
				26/6/2002	376	100%	43%	32%	23%	2%	6%	10%	22%	29%	100%	0%	0%	0	
	CE (4.95 m)	1.4	27/6/2002	376	100%	43%	34%	22%	2%	6%	10%	20%	28%	36%	98.1%	1.3%	0.5%	2	
	Mean				100%	50%	33%	16%	1%	6%	10%	22%	29%	33%	96%	2%	2%	3	

Tabel C2.2. Overzicht kwaliteit Drenthe metingen (diepe vlakken).

Electrode configuration	Boreholes	V/H	Date	Numb. of points	Current strength 200 [mA]	Potential difference - V [mV]				Configuration factor - k				V/I difference 1st and 2nd round			Bad points	
						>100	30-100	10-30	<10	<10	10-30	30-100	100-250	>250	<20%	20-40%		>40%
dipole-dipole	AB (3.65 m)	1.9	20/6/2002	518	100%	69%	23%	7%	1%	23%	19%	29%	20%	9%			0	
	AD (3.9 m)	1.8	21/6/2002	518	100%	71%	22%	6%	1%	23%	19%	26%	20%	13%			0	
	BD (4.1 m)	1.7	24/6/2002	518	100%	65%	25%	10%	1%	23%	19%	26%	14%	19%			3	
	BE (4.45 m)	1.6	21/6/2002	518	100%	61%	22%	16%	1%	23%	19%	26%	9%	25%			0	
	BC (4.55 m)	1.5	20/6/2002	518	100%	59%	21%	20%	0%	23%	19%	26%	6%	27%			0	
				24/6/2002	480	100%	60%	19%	20%	1%	23%	19%	26%	6%	27%	1.5%	2.1%	2
	DE (4.7 m)	1.5	21/6/2002	518	100%	64%	19%	18%	0%	23%	19%	26%	6%	27%			2	
	CE (5.0 m)	1.4	20/6/2002	518	100%	60%	14%	25%	2%	23%	17%	27%	7%	26%			20	
	Mean					100%	63%	21%	15%	1%	23%	19%	26%	12%	21%	97%	2%	4
	Well logging	AB (3.65 m)		20/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0
AD (3.9 m)			21/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0	
BD (4.1 m)			24/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0	
BE (4.45 m)			21/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0	
BC (4.55 m)			20/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0	
				24/6/2002	80	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%			0	
DE (4.7 m)			21/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	86.2%	13.8%	0.0%	0
CE (5.0 m)			20/6/2002	86	100%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%			0	
Mean						100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	86%	14%	0%	0
Meekes		AB (3.65 m)	1.9	20/6/2002	376	100%	35%	39%	26%	1%	6%	10%	22%	30%	32%	93.0%	1.6%	5.3%
			24/6/2002	376	100%	35%	38%	25%	2%									2
	AD (3.9 m)	1.8	21/6/2002	376	100%	38%	37%	24%	1%	6%	10%	22%	30%	32%	98.0%	0.3%	1.9%	0
			24/6/2002	376	100%	38%	36%	24%	2%									3
	BD (4.1 m)	1.7	24/6/2002	376	100%	35%	36%	27%	2%	6%	10%	22%	29%	33%	95.5%	3.2%	1.3%	0
			24/6/2002	376	100%	35%	36%	27%	2%									0
	BE (4.45 m)	1.6	21/6/2002	376	100%	34%	33%	30%	3%	6%	10%	22%	29%	33%	94.4%	2.4%	3.2%	0
			25/6/2002	376	100%	34%	33%	30%	3%									0
	BC (4.55 m)	1.5	20/6/2002	376	100%	29%	32%	32%	7%	6%	10%	22%	29%	33%	91.8%	2.3%	5.9%	0
			24/6/2002	306	100%	31%	30%	31%	9%									0
DE (4.7 m)	1.5	21/6/2002	376	100%	36%	35%	27%	2%	6%	10%	20%	30%	34%	99.5%	0.5%	0.0%	0	
		24/6/2002	376	100%	36%	34%	27%	2%									0	
CE (5.0 m)	1.4	20/6/2002	376	100%	31%	32%	31%	7%	6%	10%	20%	28%	36%	93.2%	0.9%	5.9%	0	
		24/6/2002	324	100%	33%	28%	32%	7%	6%	10%	22%	29%	33%	95%	2%	3%	1	
Mean					100%	34%	34%	28%	4%	6%	10%	22%	29%	33%	95%	2%	3%	1

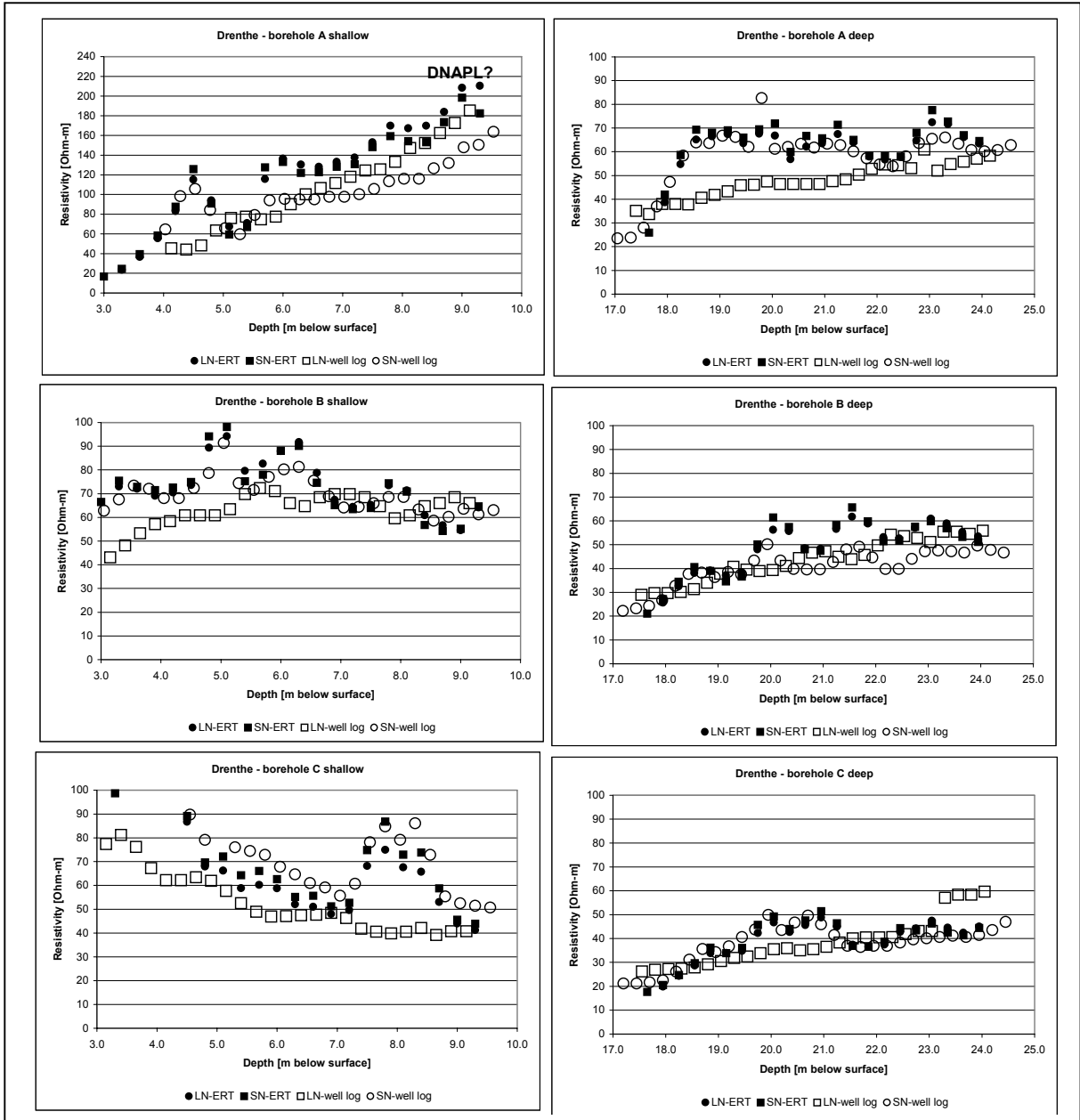


Fig. C2.1 Standaard en ERT-boorgatmetingen - Drenthe.

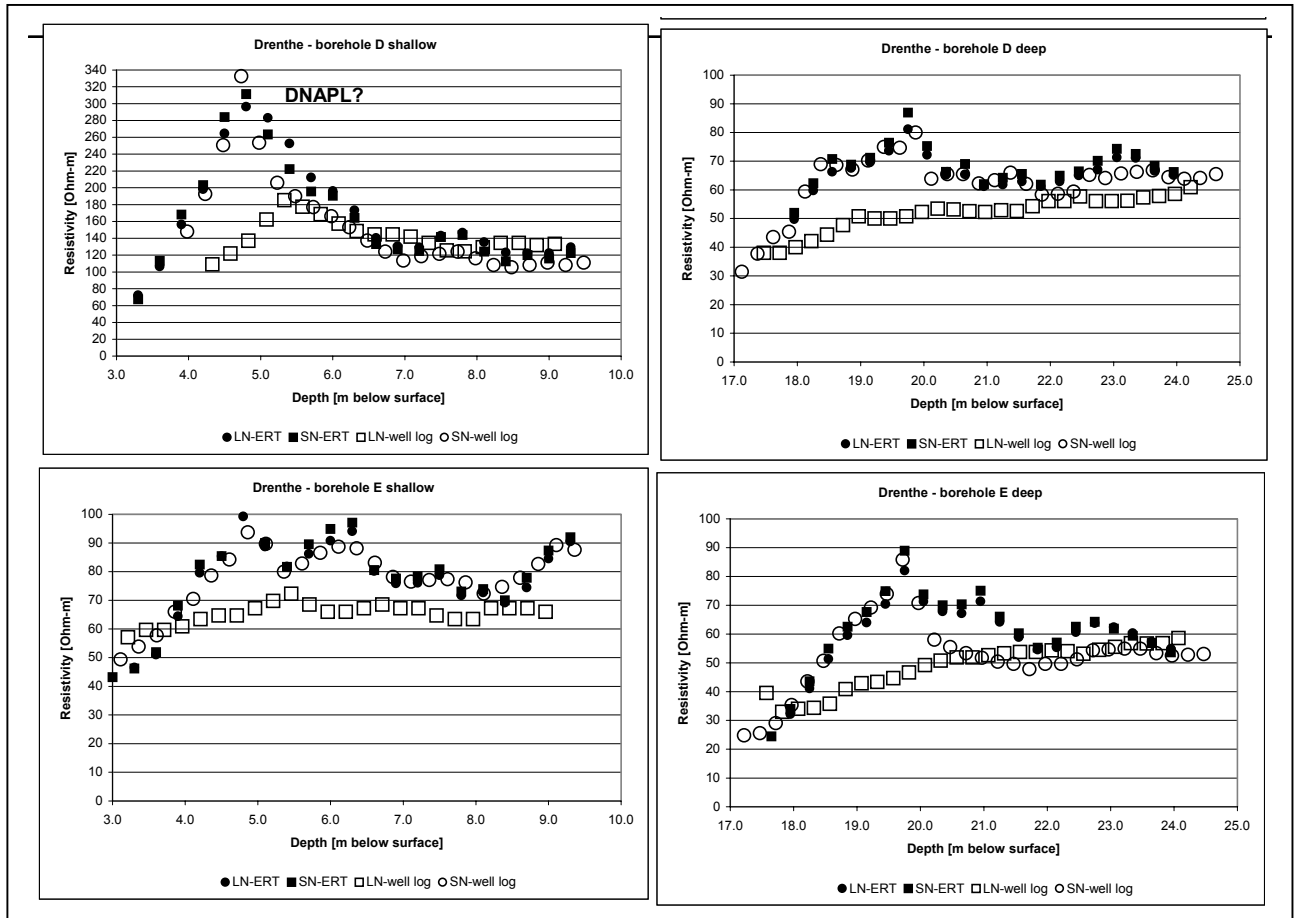
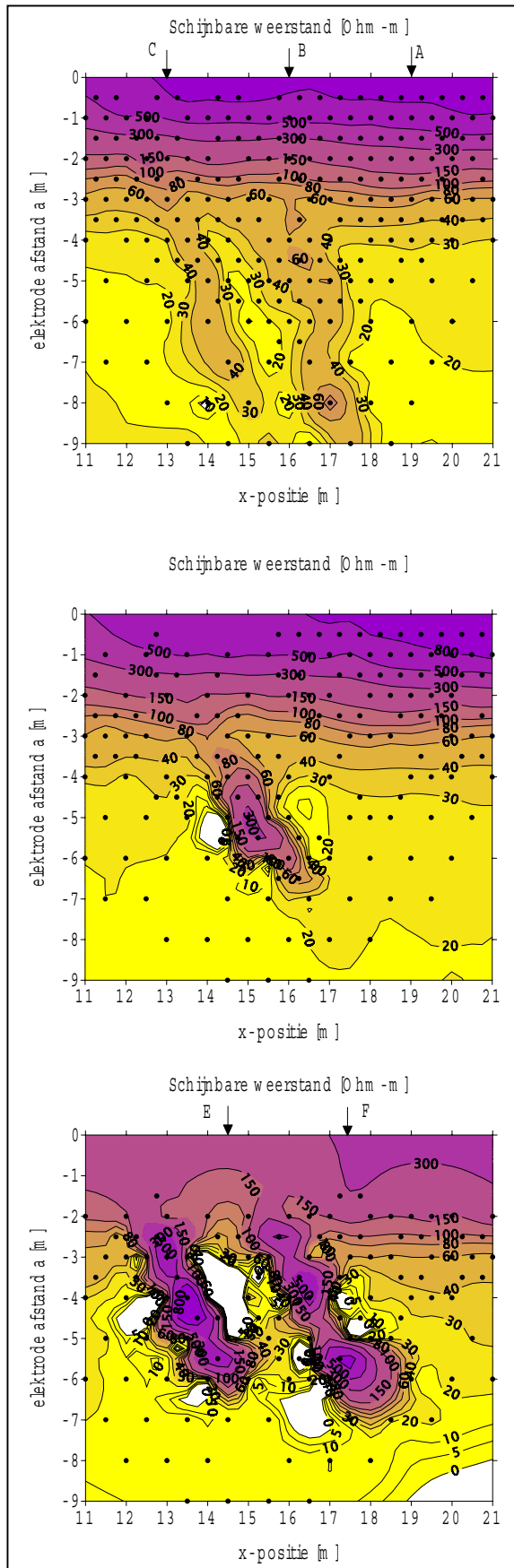


Fig. C2.1 Standaard en ERT-boorgatmetingen - Drenthe (vervolg).

BIJLAGE D

GEO-ELEKTRISCHE PROFIELEN VANAF HET OPPERVLAK (UTRECHT)



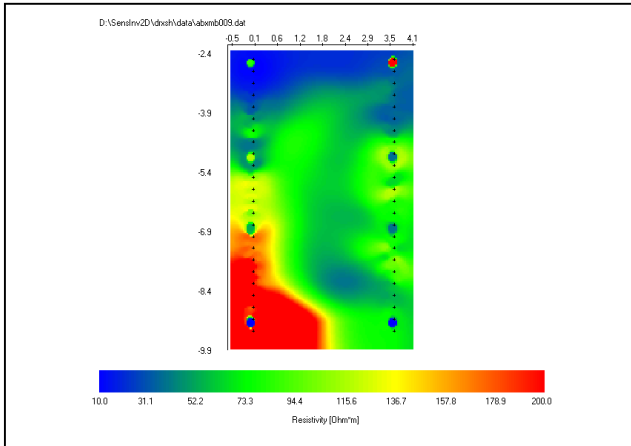
BIJLAGE E

ERT-METINGEN DRENTHE

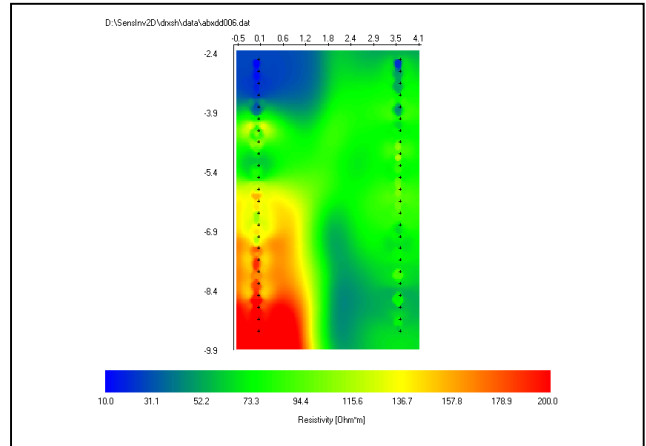
BIJLAGE E1

ERT-METINGEN DRENTHE ONDIEP (MEEKES EN CDD)

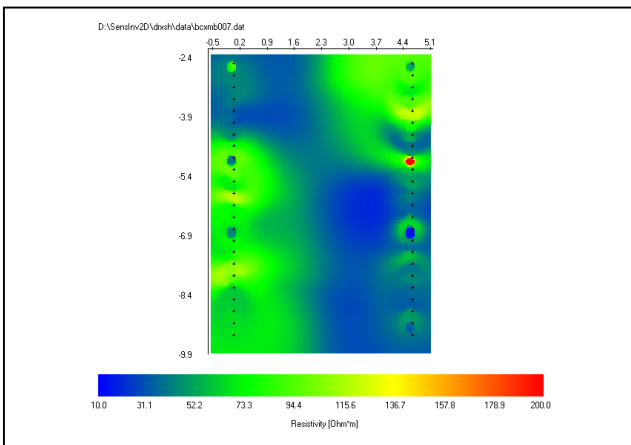
AB - Meekes (373, inv.9, 28%)



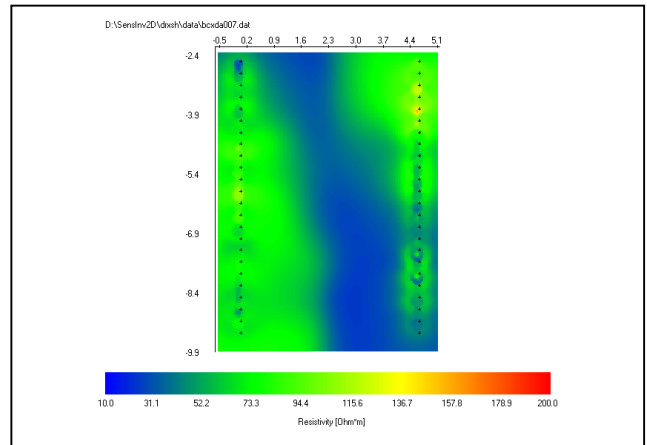
AB - cdd (511, inv.6, 25.8%)



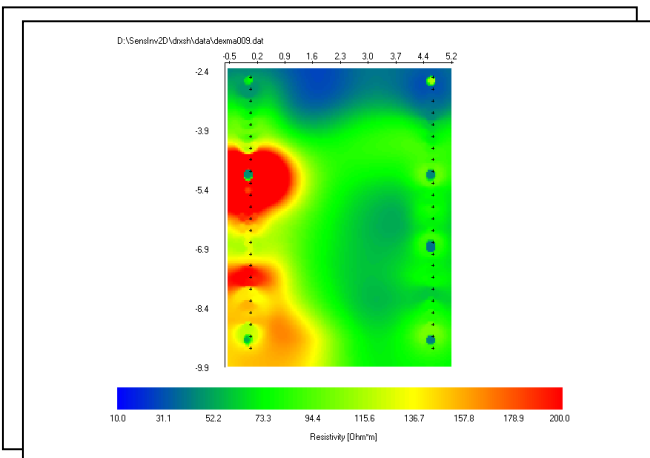
BC - Meekes (368, inv.7, 38.5%)



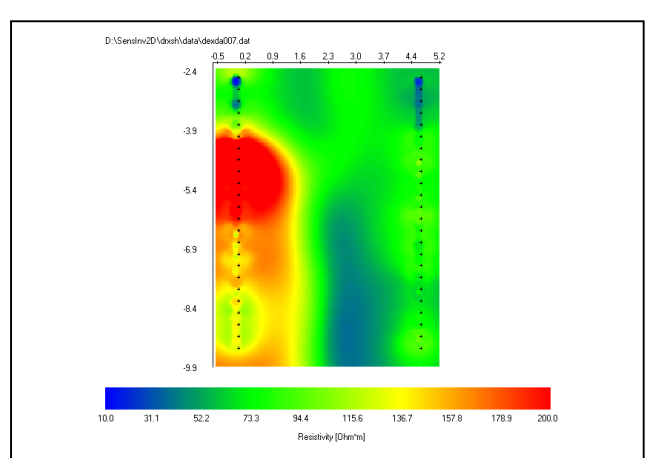
BC - cdd (512, inv.7, 28%)



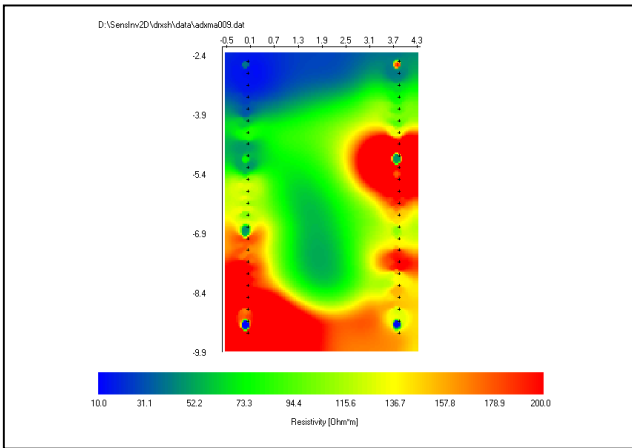
DE - Meekes (376, inv.9, 24.5%)



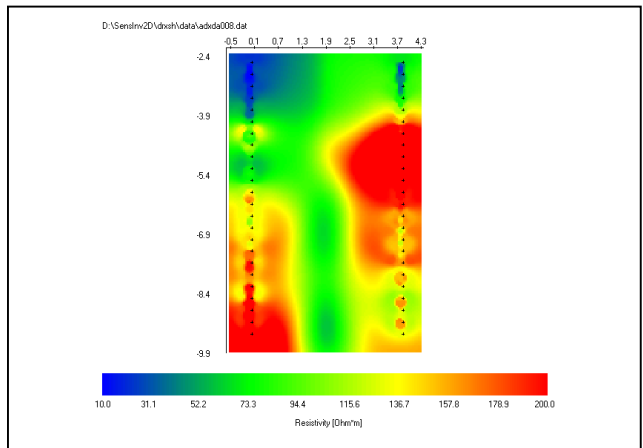
DE - cdd (518, inv.7, 24.5%)



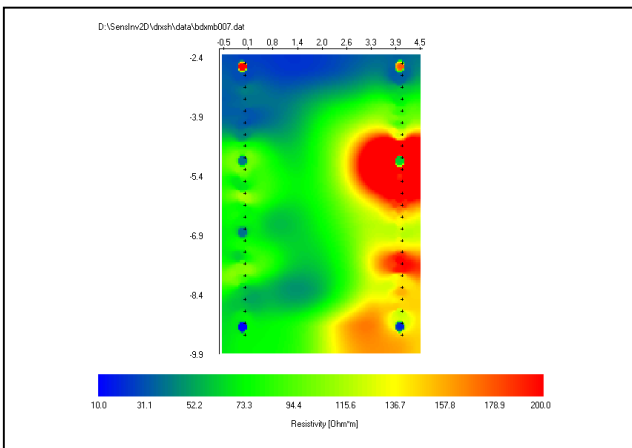
AD - Meekes (376, inv.9, 24%)



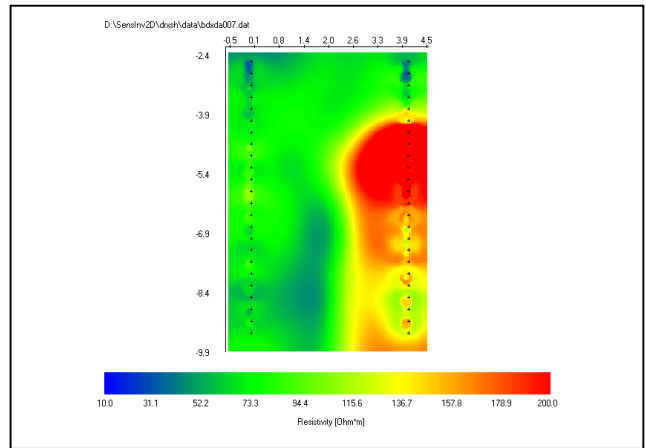
AD - cdd (510, inv.8, 26.2%)



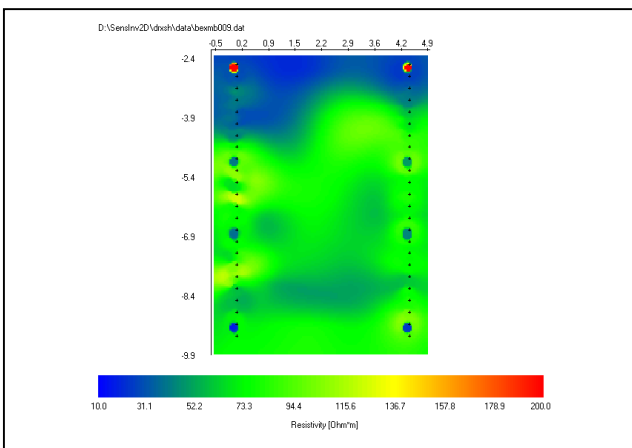
BD - Meekes (372, inv.7, 27%)



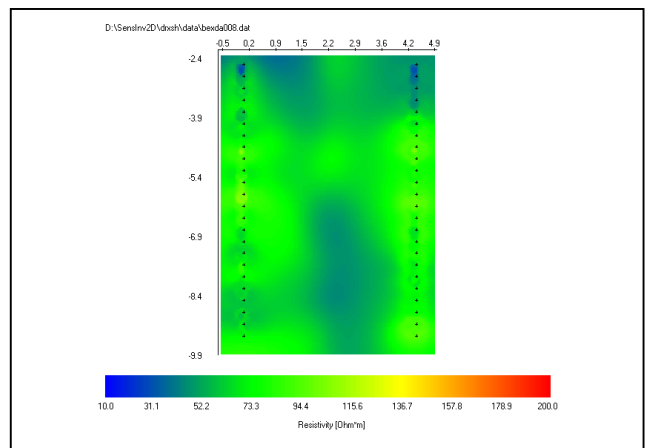
BD - cdd (512, inv.7, 24.5%)



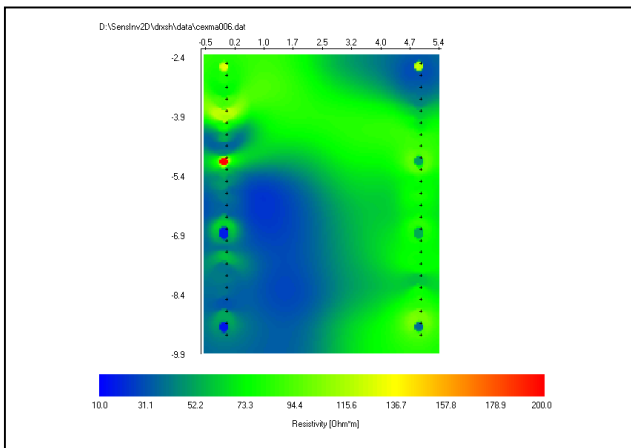
BE - Meekes (369, inv.9, 31%)



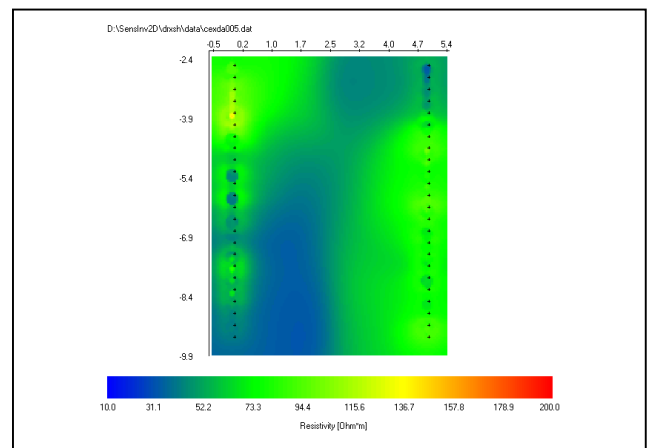
BE - cdd (512, inv.8, 21%)



CE - Meekes (374, inv.6, 29.5%)



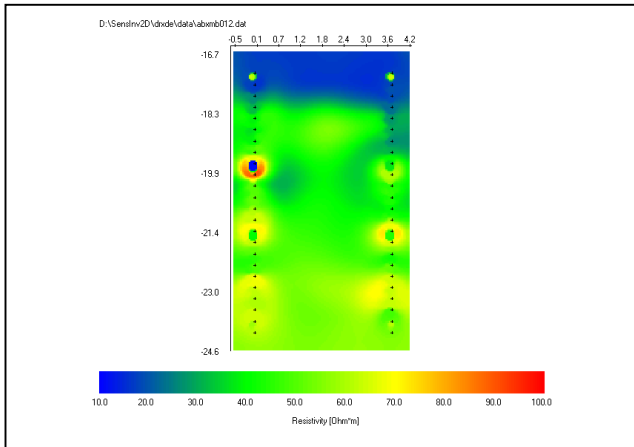
CE - cdd (500, inv.5, 19%)



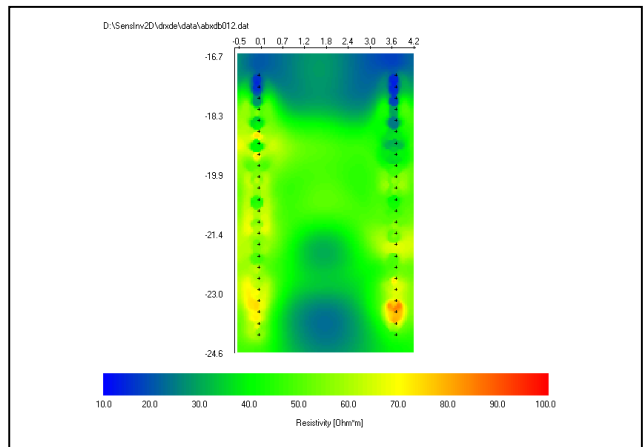
BIJLAGE E2

ERT-METINGEN DRENTHE DIEP (MEEKES EN CDD)

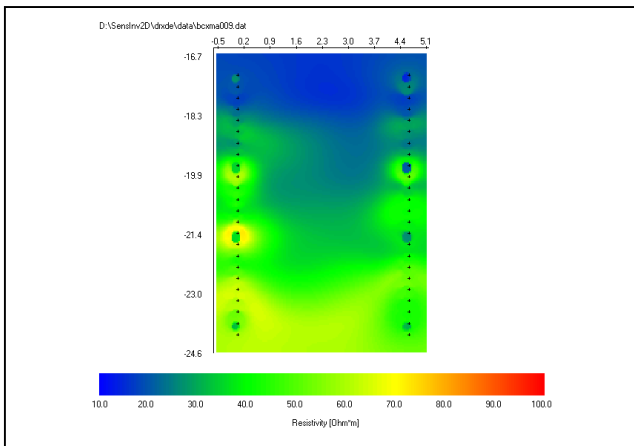
AB - Meekes (376, inv.12, 10.5%)



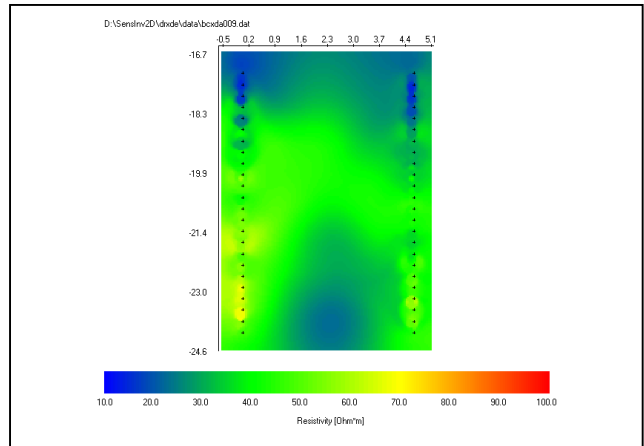
AB - cdd (518, inv.12, error=15%)



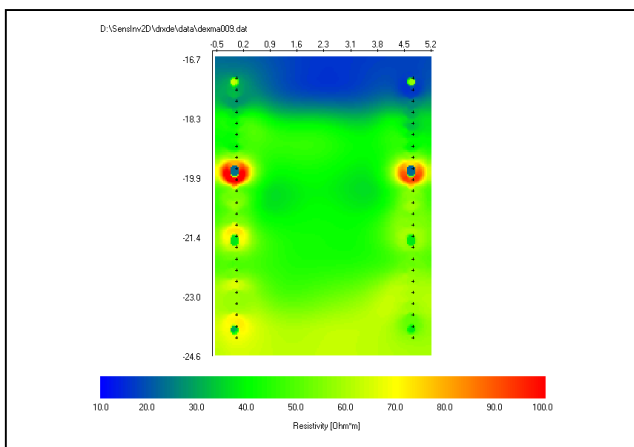
BC - Meekes (376, inv.9, 9%)



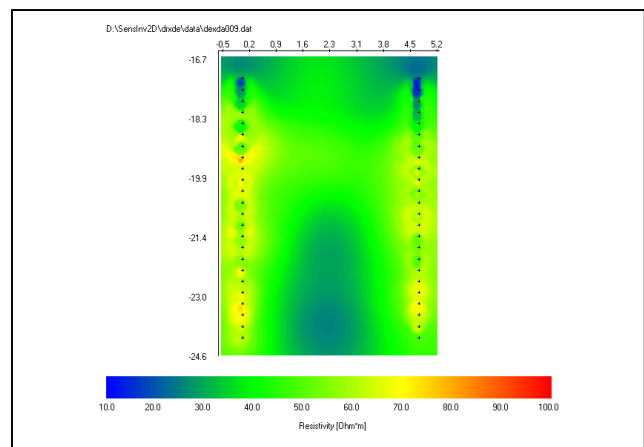
BC - cdd (518, inv.9, 19%)



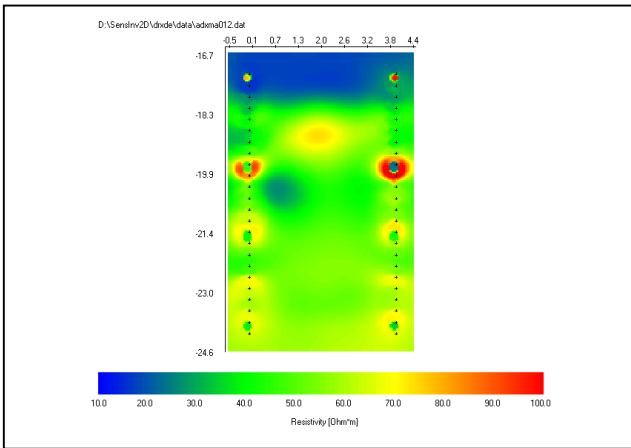
DE - Meekes (376, inv.9, 10%)



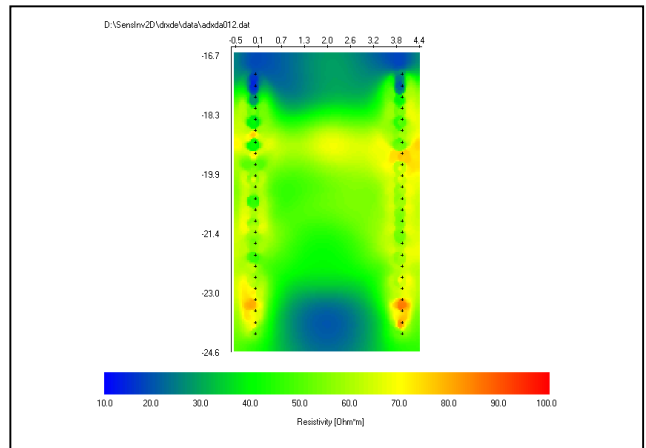
DE - cdd (516, inv.9, 14%)



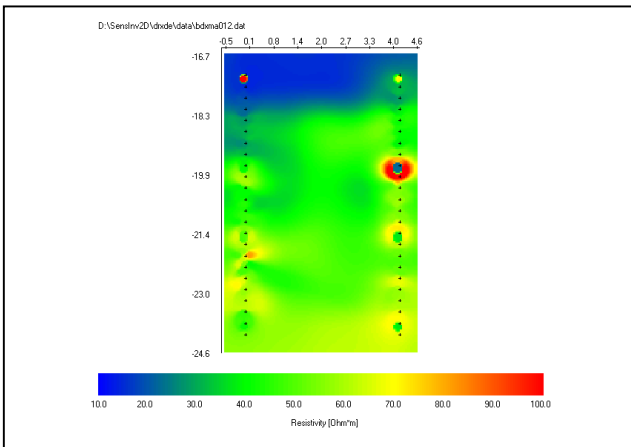
AD - Meekes (374, inv.12, 12%)



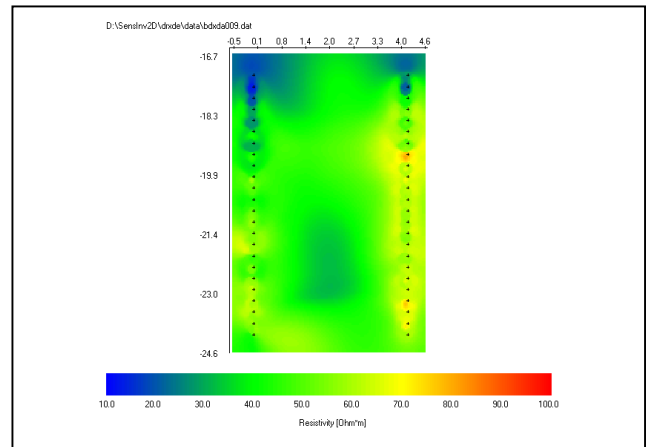
AD - cdd (518, inv.12, 19%)



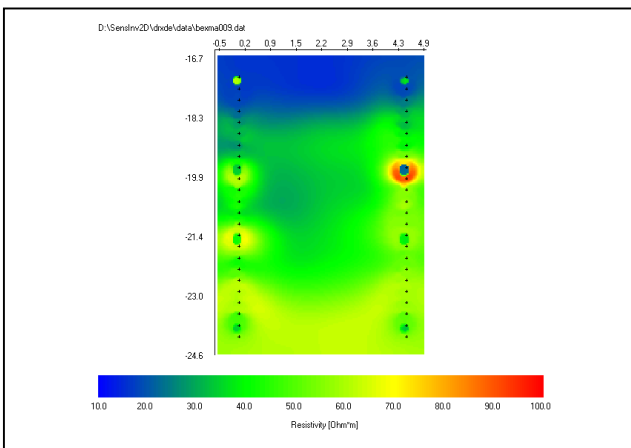
BD - Meekes (373, inv.12, 27%)



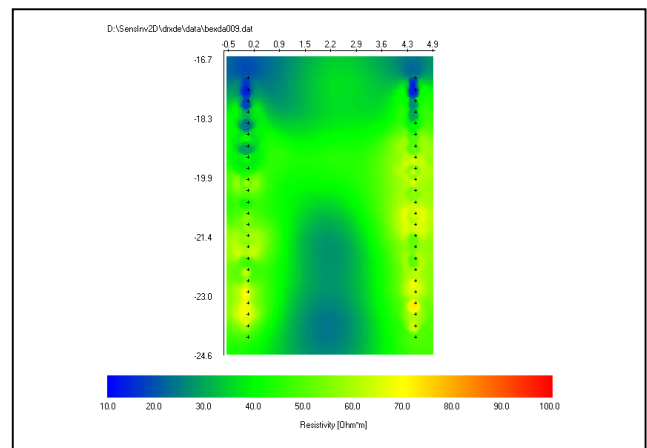
BD - cdd (515, inv.9, 24%)



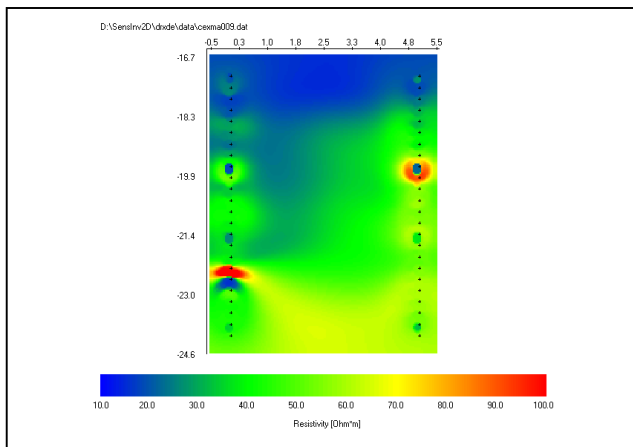
BE - Meekes (376, inv.9, 10%)



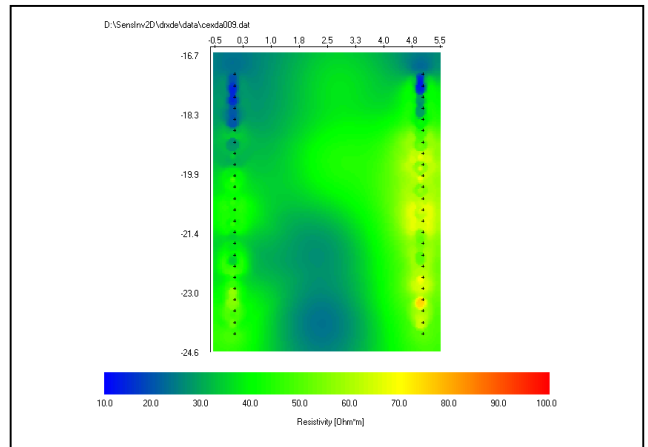
BE - cdd (518, inv.9, 14%)



CE - Meekes (376, inv.9, 14%)



CE - cdd (498, inv.9, error=13.5%)



BIJLAGE F

FOTO'S VELDWERK

BIJLAGE F1

FOTO'S ERT-VELDWERK UTRECHT (MAART 2002)



BIJLAGE F2

FOTO'S ERT-VELDWERK COEVORDEN, DRENTHE (JUNI 2002)

