

SKB Project PT5401

Demonstratie elektrische weerstandstomografie voor
DNAPL kartering en monitoring

R.P. Noorlandt (Deltares)
B.J.M. Goes (Deltares)
P.A.A. Verhaagen (Grontmij)
J.A.C. Meekes (TNO)
M.P. Lodewijks (Provincie Overijssel)

September 2009

Gouda, SKB

Titel rapport	SKB rapportnummer
Elektrische weerstandstomografie voor DNAPL kartering en monitoring	
	Project rapportnummer
Auteurs	Aantal bladzijden
R.P. Noorlandt B.J.M. Goes J.A.C. Meekes M.P. Lodewijks P.A.A. Verhaagen	Rapport: 32 Bijlagen: 28
Uitvoerende organisaties (Consortium) Deltares (R.P. Noorlandt, 030-2564657) Grontmij Advies & Techniek BV (P.A.A. Verhaagen, 030-6344617) Provincie Overijssel (M.K. Lodewijks, 038-4252525)	
Uitgever	
SKB, Gouda	
Samenvatting	
Op een saneringslocatie te Losser is elektrische weerstandstomografie (ERT) toegepast om een vervuilingslaag (DNAPL) te karteren en gedurende het saneringsproces te monitoren. Bij ERT metingen wordt tussen twee boorgaten/sonderingen een 2D elektrische weerstand bepaald. De DNAPL heeft een hogere weerstand en kan daardoor met behulp van ERT gekarteerd worden. De elektrische weerstand van de DNAPL laag is afhankelijk van de DNAPL concentratie zodat de concentratie met behulp van ERT gemonitord kan worden. In Losser zijn 6 meetrondes geweest en hebben de ERT metingen laten zien dat de sanering niet zo effectief verloopt als vooraf verwacht. De ERT uitkomsten zijn vergeleken met conventionele metingen, watermonsteranalyses uit peilbuizen en hoeveelheid verwijderde vracht, en geven een consistent beeld. De ERT methode kan overal toegepast worden waar de elektroden kabels aangebracht kunnen worden en de DNAPL een significante hogere weerstand heeft dan de ondergrond.	
Trefwoorden	
Gecontroleerde termen:	Vrije trefwoorden
bodemsanering, chloorkoolwaterstoffen, monitoring, veldonderzoek	DNAPL, ERT, elektrische weerstandstomografie, geo-elektrische metingen
Titel project	Projectleiding
Demonstratie alternatieve bodemonderzoekstrategie met gebruik van ERT voor DNAPL kartering en monitoring	Deltares (voormalig TNO Bouw en Ondergrond)
Dit rapport is verkrijgbaar bij: SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda	

Voorwoord

Beslissingen over noodzaak en urgentie van bodemsaneringen worden genomen op basis van bodemonderzoek. Echter, het resultaat van bodem- en grondwatersaneringen van locaties met bijvoorbeeld gechloreerde koolwaterstoffen is in veel gevallen teleurstellend. Saneringsdoelstellingen worden niet bereikt en er is regelmatig sprake van kostenoverschrijdingen. Een belangrijke oorzaak hiervoor is een verkeerd ontwerp van de saneringsmaatregelen door onvoldoende informatie over de situatie in de bodem. De plaatsing van filters in de bodem blijkt niet te kloppen met situering van de verontreinigingen. In veel gevallen worden de brongebieden van verontreinigingen 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 reguliere onderzoek voldoende is. Een alternatieve bodemonderzoekstechniek is elektrische weerstandstomografie (ERT) voor het in beeld krijgen van bronzones van verontreinigingen. In relatie tot gechloreerde koolwaterstoffen (VOCL) manifesteren deze bronzones zich soms in de vorm van DNAPL's (Dense Non-Aqueous Phase Liquids). De techniek is binnen een SKB Project (SV-416) op een tweetal verontreinigde locaties gevalideerd.

De aanleidingen voor het opstarten van het project Demonstratie ERT zijn:

1. De behoefte aan een voorbeeld onderzoeks- en saneringstraject waaruit lering kan worden getrokken.
2. De bekendheid en de toepassing van de ERT-techniek in de bodemverontreinigingwereld is zeer beperkt.
3. Er is noodzaak tot een technische verbetering om de kans op een verdere verticale verspreiding van de verontreiniging bij het aanbrengen van de meetkabels in de ondergrond te minimaliseren.
4. Testen van een goedkopere veldmethodiek voor het aanbrengen van elektroden in de ondergrond
5. Demonstreren dat ERT naast het in kaart brengen van DNAPL's ook de verwijdering ervan kan monitoren tijdens een sanering.

Het project is een samenwerking tussen drie partners. Eén partner bezit geo-elektrische apparatuur en kennis van geofysische technieken (Deltares), één partner heeft boortechnieken, monstertechnieken en veel ervaring met bodemsaneringen (Grontmij) en één partner heeft de verontreinigde locatie binnen haar grenzen (Provincie Overijssel).

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding en probleemstelling	7
1.2	Doelen onderzoek	7
1.3	Consortium samenstelling	8
1.4	Aanpak van het onderzoek en opbouw rapport	8
2	Leertraject en kennisoverdracht demonstratie locatie Losser	9
2.1	Doel	9
2.2	Kern van meetproblematiek bij bodemonderzoek	9
2.3	Leertraject locatie Gronausestraat te Losser	10
2.4	Invulling kennisoverdracht binnen project	10
3	Elektrische weerstandstomografie (ERT)	12
3.1	Achtergrond ERT	12
3.2	ERT uitkomsten interpreteren	13
3.2.1	Tomographie figuren	13
3.2.2	Relatie tussen DNAPL concentratie en soortelijke weerstand	13
3.3	Elektrodekabel met sondering plaatsen	14
3.4	Resultaat plaatsen en testen elektrodekabel met sondering	14
3.5	Vergroten meetsnelheid	15
4	Lokaliseren bronzone met ERT	16
4.1	Inleiding	16
4.2	Kenmerken van de ERT metingen te Losser	17
4.3	Kwaliteit Inversie	18
4.3.1	Vergelijking met boorgatmetingen	18
4.3.2	Data fit	18
4.3.3	Vergelijking met grondwatermonsters	18
4.4	Resultaat 0-metingen	19
5	Monitoren van de sanering	21
5.1	Inleiding	21
5.2	De sanering	21
5.2.1	Inrichting sanering	21
5.2.2	Uitvoering sanering	22
5.3	Monitoren met ERT	22
5.3.1	In-situ saneren en monitoren	22
5.3.2	ERT metingen tijdens de sanering	22
5.3.3	Resultaten monitoring met ERT	24
6	Toepasbaarheid ERT op andere locaties	28
6.1	Inleiding	28
6.2	Benodigde locatiekenmerken voor inzet ERT	28
6.3	Mogelijke plaats van ERT in bodemonderzoek	28
6.4	Kostenschatting	28
7	Conclusies en aanbevelingen	30
7.1	Conclusies	30
7.1.1	Conclusies met betrekking tot Losser	30
7.1.2	Algemene conclusies	30
7.1.3	Technische conclusies	30
7.2	Aanbevelingen	31
8	Referenties	32

Figuren

Figuur 3-1 2D schets van een 2D ERT profiel. De bolletjes geven de elektroden aan. Tussen de rode elektroden loopt een stroom en tussen de witte bolletjes wordt het resulterende potentiaal verschil gemeten.....	12
Figuur 3-2 (Figure B.1 uit de bijlage) ERT sectie 04-03 gemeten in juli 2006.....	13
Figuur 3-3 Relatie tussen DNAPL verzadiging en elektrische bodem weerstand van een zandige aquifer (Schneider en Greenhouse, 1992).	14
Figuur 4-1 Overzicht ERT meetgaten.	16
Figuur 4-2 Een ERT meting op locatie Losser.	16
Figuur 4-3 (Figure F.1 uit de bijlage) Boorgatmetingen (a) in boorgat 4 en waarde uit de ERT modellen (b) uit de opvolgende meetronden.	18
Figuur 4-4 (Figure C.1 uit de bijlage) % RMS verschil tussen gemeten data en data behorende bij de ERT sectie 04-03.	18
Figuur 4-5 Plattegrond van de ERT meetvlakken die zijn gebruikt voor de monitoring metingen (groene stippellijnen). De monitorings meetvlakken zijn aan de hand van de in 2006 gekarteerde verdachte zones (paars) bepaald.	19
Figuur 4-6 (Figure B.2 uit de bijlage) ERT sectie 04-09 juli 2006 (a), mei 2008 (b) en verschil (c).....	20
Figuur 5-1 Resultaten van PER analyses op watermonsters uit 1 meter lange filters voor locatie Losser op meerdere tijdstippen. De sanering is gestart in september 2008. Het nummer 181 staat in de voormalige chemische wasserij. In de figuur zijn ook de ERT meetpunten aangegeven.....	25
Figuur 5-2 Verschil in ERT sectie 04-09 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.2 van bijlage D)	26
Figuur 5-3 Verschil in ERT sectie 07-06 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.6 van bijlage D)	26
Figuur 5-4 Verschil in ERT sectie 08-07 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.9 van bijlage D)	27

Tabellen

Tabel 4-1 Overzicht van de kenmerken van de ERT metingen te Losser.....	17
Tabel 5-1 Overzicht toegepaste in-situ saneringstechnieken.....	21
Tabel 5-2 Opstart van de in-situ technieken en verwachte invloed op DNAPL bronzone.	22
Tabel 5-3 Logboek van belangrijke saneringsactiviteiten en de ERT monitoring metingen.	23
Tabel 6-1 Kostenschatting (2008) van ERT 0 en monitoring metingen op een verontreinigde locatie (10 meetkabels, 17 meetvlakken, oppervlakte ~40 m2).	29

Bijlagen

Bijlage A	Maken en plaatsen alternatieve elektrodenkabel.
Bijlage B	ERT modellen 2006-2008
Bijlage C	Data fit ERT nulmetingen
Bijlage D	ERT modellen monitoring
Bijlage E	Data fit ERT monitoringsmetingen
Bijlage F	Resultaten van de boorgatmetingen

Begrippenlijst

<u>BLE</u>	Bodem Lucht Extractie, een saneringsmethode.
<u>DNAPL</u>	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.
<u>DNAPL bronzone</u>	DNAPL's in niet opgeloste vorm die door langzame oplossing het grondwater verontreinigen.
<u>ERT</u>	Electrical Resistivity (soortelijke weerstand) Tomografie (ERT), geo-elektrische metingen van boorgat naar boorgat.
<u>elektroden meetopstelling</u>	de posities van de stroom- en de potentiaalelektrodes
<u>Inversie</u>	een rekenmethode om de gemeten schijnbare elektrische weerstanden van de ondergrond om te zetten naar werkelijke soortelijke elektrische weerstanden
<u>k-factor</u>	een constante waarmee uit de stroomsterkte en het gemeten potentiaalverschil de schijnbare elektrische weerstand van de ondergrond kan worden berekend
<u>Long Normal (LN)</u>	weerstand gemeten in een boorgatmeting met een relatief grote elektrode afstand; de meerwaarde is dus representatief voor een gebied met een iets grotere straal
<u>NAPL</u>	Non-Aqueous Phase Liquids; DNAPL en LNAPL (Dense of Light afhankelijk of de stof zinkt of op water drijft)
<u>PER</u>	PERchloorethyleen (tetrachloorethyleen)
<u>PLI</u>	PersLuchtInjectie, een saneringsmethode
<u>schijnbare elektrische weerstand</u>	een elektrische weerstand die hoort bij een bepaalde positie van de stroom- en potentiaalelektrodes
<u>soortelijke elektrische weerstand</u>	een maat voor de tegenwerking die een elektrische stroom ondervindt wanneer het door een medium stroomt, de elektrische weerstand van de ondergrond op een bepaalde x-positie en diepte
<u>TFE</u>	Twee Fase Extractie, een saneringsmethode.
<u>TRI</u>	TRIchlooretheen
<u>Vertikaal/Horizontaal</u>	de verhouding tussen de lengte van de sectie in het boorgat waarin de
<u>(V/H)</u>	ERT elektrodes hangen (V) en de afstand tussen de boorgaten (H)
<u>VOCL</u>	Vluchtige OrganoChLoorverbindingen, gechloreerde koolwaterstoffen zoals TRI en PER
<u>WBB</u>	Wet Bodem Beheer
<u>Zinklaag</u>	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

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Het ruimtelijk vaststellen van puurproduct Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL) en de verspreiding van DNAPL's in de bodem van verontreinigde locaties is één van de meest complexe taken binnen het bodemonderzoek omdat het gedrag van puur DNAPL-product onvoorspelbaar is. Het onbekende migratiepatroon van DNAPL's door de ondergrond maakt dat het afdoende karteren van de bronzone van een bodemverontreiniging met behulp van conventionele technieken economisch niet haalbaar is.

In een vorig SKB Project (SV-416, 'Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's') is aangetoond dat Elektrische Resistiviteits Tomografie (ERT, geo-elektrische metingen tussen boorgaten of sonderingen) goed werkt voor de opsporing van (DNAPL's) in veel voorkomende typen Nederlandse ondergrond. Ook bij verontreinigde locaties met in de bodem veel infrastructuur (kabels, leidingen, beton, kruipruimtes, etc.) werkt ERT goed. Dit betekent dat gebieden waar hoge verontreinigingsgehalten aanwezig zijn met behulp van ERT ruimtelijk in beeld kunnen worden gebracht. Hierdoor is het mogelijk de dimensionering van de filters te optimaliseren (waar en hoeveel filters) met als gevolg dat de saneringsduur kan worden verkort. De resultaten van dit onderzoek zijn gepubliceerd in twee populair wetenschappelijke bladen (Bodem, V13, no. 3, p.108-110, 2003 en TNO Informatie, no. 13, p.19-23, 2003) en een Amerikaans geofysisch vakblad (Journal of Environmental and Engineering Geophysics, V9, no. 3, p.127-141, 2004). Verder is vastgesteld dat er een aantal verbeteringen mogelijk zijn om de inzet van ERT efficiënter, en dus goedkoper, te maken. De belangrijkste verbetering betreft het op een goedkopere en minder risicovolle manier aanbrengen van de meetelektrodes in de ondergrond. Een tweede voor Nederland nieuwe toepassing van ERT is het monitoren van de sanering. Op basis van het herhalen van de ERT metingen in de tijd kan, als de sanering goed verloopt, de afname van de grootte en/of concentratie van de DNAPL bronzone worden waargenomen. De saneringsstrategie kan dan door de resultaten van de monitoring worden aangepast. De lezer wordt verwezen naar bovenstaande publicaties of het SKB Rapport voor een inleiding in ERT.

Dit demonstratie project betreft de locatie Gronausestraat 181 te Losser. Vanaf het begin van de jaren '90 van de vorige eeuw zijn op de locatie verschillende bodemonderzoeken uitgevoerd. Op de demonstratielocatie was van 1957 tot 1990 een chemische wasserij met woonhuis en winkel gevestigd. Tijdens de bodemonderzoeken is begonnen met conventionele (OD) meettechnieken om de lokale hydrogeologische en verontreinigingssituatie in kaart te brengen. Dit heeft geleid tot een onvolledige bodemsanering. Vanuit de behoefte om de verontreiniging en de lokale hydrogeologie beter in kaart te brengen zijn er naast de puntmetingen aanvullende geofysische metingen verricht. Dit doorgemaakte leerproces wordt beschreven Hoofdstuk 2.

De probleemstelling van dit onderzoek is:

Het vergroten van de bekendheid van de meerwaarde van de ERT techniek ten opzichte van conventionele (OD) meettechnieken (het semi-3D lokaliseren van DNAPL's en het monitoren van sanering) in de bodemsaneringswereld.

1.2 Doelen onderzoek

Dit project, 'Demonstratie alternatieve bodemonderzoekstrategie met gebruik van ERT voor DNAPL-kartering en monitoring', heeft de verdere ontwikkeling van de onderzoekstechniek tot doel. De doelen van het demonstratieproject zijn:

- 1) Lering trekken uit het reeds uitgevoerde onderzoeks- en saneringstraject op de demonstratie locatie Losser.
- 2) Het demonstreren dat ERT metingen de bronzone beter in kaart kunnen brengen dan conventionele technieken en dat de resultaten gebruikt kunnen worden voor een optimale plaatsing van filters voor een in-situ sanering.
- 3) Onderzoek naar de mogelijkheden van het monitoren van de in-situ sanering met ERT.
- 4) Onderzoeken of een technische verbetering mogelijk is om de kans op een verdere verticale verspreiding van de verontreiniging bij het aanbrengen van de meetkabels in de ondergrond te minimaliseren.
- 5) Het testen van een goedkopere veldmethodiek voor het aanbrengen van elektroden in de ondergrond.
- 6) Publicatie en presentaties van de resultaten van het onderzoek.

1.3 Consortium samenstelling

Demonstratie ERT is een project uitgevoerd binnen de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem. Het consortium van dit project bestaat uit vier partners:

- Deltares (voormalig TNO - Bouw en Ondergrond, penvoerder);
- Grontmij Advies & Techniek BV;
- Provincie Overijssel;
- Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB).

Binnen Deltares is geo-elektrische apparatuur aanwezig om ERT-metingen uit te voeren en te interpreteren. Tevens heeft Deltares (voormalig TNO - Bouw en Ondergrond) ruime ervaring (>30 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. Tevens is Grontmij bekend met het onderzoeks- en saneringstraject op de demonstratie locatie Losser. Provincie Overijssel heeft binnen haar grenzen vele locaties met een bodemverontreiniging waar mogelijk DNAPL's aanwezig zijn. Als probleembezitter en eindgebruiker is de provincie gebaat bij goed en volledig onderzoek waardoor noodzakelijke saneringsmaatregelen snel en kosteneffectief kunnen worden uitgevoerd.

Janelco (de heer Robert Janus) is ingehuurd door Deltares voor dit project om te helpen bij het ontwerp en maken van de alternatieve meetkabels en aanverwante verbindingkastjes. Mevr. ir. Elze-Lia Visser-Westerweele, de heer Arno Peekel en de heer dr. Koos Groen hebben het project begeleid namens SKB.

1.4 Aanpak van het onderzoek en opbouw rapport

Het project is uitgevoerd in 4 fasen:

- A. Veldproeven alternatieve plaatsing meetkabel met elektroden;
- B. Evaluatie leertraject onderzoek en sanering, resultaten van de 0-meting;
- C. Monitoring metingen en eindrapport;
- D. Kennisoverdracht.

In dit rapport wordt het volgende behandeld:

- inleiding (Hoofdstuk 1);
- leertraject en kennisoverdracht demonstratie locatie Losser (Hoofdstuk 2);
- technische verbeteringen aan ERT (Hoofdstuk 3);
- het lokaliseren van de bronzone met ERT (Hoofdstuk 4);
- het monitoren van de sanering (Hoofdstuk 5);
- de toepasbaarheid van ERT op ander locaties (Hoofdstuk 6);
- conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 7).

2 Leertraject en kennisoverdracht demonstratie locatie Losser

2.1 Doel

Er is een aantal redenen om binnen het project aandacht te besteden aan leren en kennisoverdracht.

Allereerst wordt beoogd lering te trekken uit het onderzoeks- en saneringstraject tot en met 2004 van de locatie Losser. De bodemverontreiniging op de locatie is gedurende meer dan 15 jaar het onderwerp geweest van onderzoek. In 2000 heeft dit geleid tot de uitvoering van een grondsanering. Deze grondsanering was onvolledig.

Belangrijk is verder de toepasbaarheid van de nieuwe ERT-techniek in relatie tot conventioneel bodemonderzoek; het verzamelen van gegevens met behulp van boringen en peilbuizen.

Een argument voor het leertraject en kennisoverdracht binnen het project is bewustwording over de kwaliteit van het huidige conventioneel bodemonderzoek. Ook het vergroten van de vertrouwde met alternatieve bodemonderzoekstechnieken verdient veel aandacht. In het bijzonder is het doel van de kennisoverdracht de bevordering van bodemonderzoekstechnieken die een ruimtelijk inzicht geven van bodemproblematiek. Een voorbeeld van een dergelijke techniek is ERT.

Aan de hand van de ERT-techniek wordt gedemonstreerd wat de waarde is van meettechnieken die niet primair zijn gericht op het produceren van getallen ($\mu\text{g/l}$ en mg/kg), maar op het verkrijgen van inzicht in de ruimtelijke positie van verontreinigingen en de relatie tussen bodemopbouw en verontreiniging.

Vragen die spelen zijn dus: waarom gebruiken we bepaalde onderzoekstechnieken, wat is het risico van het denken in hoeveelheden boringen en peilbuizen en wanneer worden alternatieve onderzoeksmethoden interessant?

2.2 Kern van meetproblematiek bij bodemonderzoek

Bodemonderzoek in Nederland wordt in bijna alle gevallen gedaan door het zetten en gebruiken van boringen en peilbuizen. Per meting levert deze aanpak gegevens op over de ondergrond/bronzone ter hoogte van de geplaatste boringen en peilbuizen. De metingen worden met elkaar gecorreleerd en zo ontstaat een 3D inzicht van de situatie. De kwaliteit van dit 3D beeld is afhankelijk van de dichtheid van de metingen. Uit economische overwegingen wordt het aantal boringen en peilbuizen zo klein mogelijk gehouden zonder dat er zicht is hoe dit uitwerkt op de kwaliteit van het 3D beeld van de ondergrond. Het slagen van een sanering is afhankelijk van het ontwerp en uitvoering van de sanering, die op hun beurt volledig afhankelijk zijn van de (kwaliteit van) informatie over de ruimtelijke verbreiding van de verontreiniging. Door te weinig inzicht over de ruimtelijke verbreiding van de verontreiniging, voor en tijdens het saneren, mislukken in-situ saneringen onnodig vaak.

Waarom wordt dan toch gebruik gemaakt van boringen en peilbuizen?:

- De WBB (Wet Bodembeheer) is toegespitst op gehalten (mg/kg en $\mu\text{g/l}$).
- De bodemopbouw in Nederland maakt boringen goedkoop. Er zijn geen economische impulsen om op zoek te gaan naar andere methodieken.
- De methodes zijn ingeburgerd en verwerking van de metingen kan relatief makkelijk/goedkoop gedaan worden.

2.3 Leertraject locatie Gronausestraat te Losser

Het project wordt gedemonstreerd op de locatie Gronausestraat 181 te Losser. Op de demonstratielocatie was van 1957 tot 1990 een chemische wasserij met woonhuis en winkel gevestigd. Vanaf 1990 wordt op de locatie geen kleding meer gereinigd. De winkel werd tot 1998 gebruikt als innamepunt van kleding. Sinds de sanering van 2000 staat het pand leeg.

Vanaf 1992 zijn verschillende bodemonderzoeken uitgevoerd, waaruit bleek dat de bodem op de locatie is verontreinigd met gechloreerde koolwaterstoffen (PER en TRI) en in veel geringer mate, minerale olie. De chloorkoolwaterstoffen (ook wel vluchtige organochloorverbindingen, VOCL) in Losser hebben een relatief grote dichtheid en lossen slecht in water op en behoren tot de DNAPL's (Dense Non-Aqueous Phase Liquids). Door deze eigenschappen zakken ze door goeddoorlatende lagen en blijven 'liggen' op slecht doorlatende grondlagen (zoals klei of leem) en vormen daar een zo genoemde zinklaag. Een groot deel van de verontreinigingen is terecht gekomen in een 'zinkput' in de achtertuin van de wasserij. De zinkput stond in verbinding met het riool dat langs de wasserij loopt. Een deel van de verontreinigingen zijn dus verder verspreid via het, mogelijk lekkende, riool.

De onderzoeksinspanningen hebben in 2000 geleid tot de uitvoering van een grondsanering. Bij de grondsanering van 2000 is een deel van het pand gesloopt, de zinkput verwijderd en is een groot gedeelte van de grond tot ongeveer 2.5 meter diepte afgegraven. De sanering heeft niet geleid tot een volledige oplossing van de grondverontreiniging. Dit kwam enerzijds door technische beperkingen (aanwezigheid van het pand, onhaalbaarheid van de ontgravingseinddiepte) en anderzijds door een onverwachte grote verspreiding die kennelijk niet door de bodemonderzoeken was voorspeld.

Aanvullend bodemonderzoek uitgevoerd vanaf 2003 heeft aangetoond dat er nog steeds sprake is van een verontreinigingsbron (in grond en grondwater) en een verontreinigingspluim. Er is tevens meer onderzoek gedaan naar de algemene opbouw van de ondergrond, geologie, om zo meer zicht te krijgen op het verspreidingsproces van de verontreiniging. Op een diepte van circa 7 meter onder maaiveld (m-mv) wordt in de bodem zandsteen aangetroffen. Eerst betreft dit losse stenen en vanaf een diepte van circa 15-20 m-mv is sprake van massief zandsteen (Bentheimer zandsteen). De verwachting was dat de Bentheimer zandsteen geheel doorlatend zou zijn. De uitkomst van het onderzoek was echter dat de Bentheimer zandsteen vanaf 30 meter onder maaiveld nauwelijks doorlatend is. Bij geofysische metingen (hoge resolutie seismiek) zijn drie reflectoren, c.q. lagen, vastgesteld (Westerhoff, 2004). Bij nader conventioneel onderzoek (grondboring) naar de oorsprong van de reflectoren is geconstateerd dat de Bentheimer zandsteen van boven naar beneden steeds fijner van samenstelling wordt (van zandsteen naar mudstone). De bovenste reflector kwam globaal overeen met start van de sequentie. Uit monsternamen van grondwater is gebleken dat het verontreiniginggehalte in het grovere gedeelte van de Bentheimer zandsteen hoger is dan in het zeer fijne deel van de Bentheimer zandsteen. Hieruit kan worden afgeleid dat de verspreiding van DNAPL's naar de diepte mee valt. Dit maakt het mogelijk te focussen op de bron(nen) van de verontreiniging. Voor de aanpak van de verontreinigingen is medio 2005 een saneringsplan opgesteld (Grontmij, 2005). De (in-situ) sanering is in september 2008 gestart.

Bij de beschouwing van het klassiek bodemonderzoektraject dat is uitgevoerd op de locatie kan de vraag worden gesteld of de gebruikte, conventionele, onderzoekstechnieken ondersteunend of beperkend zijn geweest bij het in beeld krijgen van de verontreinigingssituatie. Dit project leent zich er goed voor om kennisoverdracht over alternatieve onderzoekstechnieken te ondersteunen omdat op de locatie zowel ervaring is opgedaan met een klassiek onderzoekstraject als een 'nieuw' traject waarbij de inzet van alternatieve onderzoekstechnieken een grote rol speelt.

2.4 Invulling kennisoverdracht binnen project

Met ingang van het najaar van 2003 is begonnen met een onderzoek naar de huidige kwaliteit van de bodem. Op basis van dit onderzoek en het onderhavige ERT onderzoek wordt een nieuw saneringsonderzoek- en plan opgesteld. Het onderzoek heeft zich uitgestrekt tot in de onderliggende zandsteenlaag. De actuele bodemkwaliteit is nu goed in beeld.

Binnen het project speelt kennisoverdracht een belangrijke rol. De uitkomsten van de ERT metingen, wat deze betekenen voor de opzet van deze in-situ bodemsanering en wat de waarde is voor andere in-situ saneringen zijn op verschillende manieren onder de aandacht gebracht. De kennisoverdracht loopt samen op met de uitvoering van de ERT-metingen op de locatie. Er zijn twee momenten aan te duiden waarop de resultaten van conventionele meettechnieken vergeleken kunnen worden met de resultaten van de ERT-techniek. Het betreft:

- 1) het vergelijken van de uitkomsten van de nulsituatie meting ERT met de uitkomsten van het conventionele bodemonderzoek (juni-juli 2006);
- 2) het vergelijken van de uitkomsten van de ERT meting tijdens de in-situ sanering met de uitkomsten van conventionele bemonsteringen van peilbuizen (april 2009).

De volgende kennisoverdracht momenten hebben plaats gevonden in het kader van dit project:

- een presentatie op Bodembreed (Goes, Lodewijks, Meekes en Verhaagen, 2006);
- een presentatie op een internationaal congres over bodemsaneringstechnieken (Goes, Meekes en Verhaagen, 2007).

Nog gepland kennisoverdracht moment:

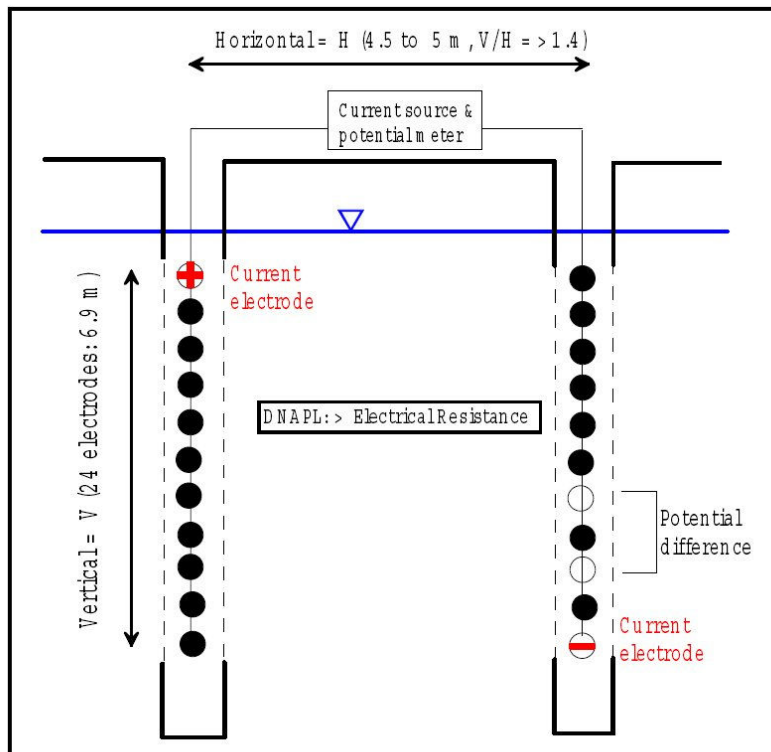
- een demonstratie- en presentatiedag.

Benadrukt wordt dat de bedoeling van de kennisoverdracht niet gericht is op het 'promoten' of 'verkopen' van alternatieve onderzoekstechnieken. Veel belangrijker is dat de kennisoverdracht resulteert in een bewustwording van de eigenaren van verontreinigde locaties over de beperkingen van conventioneel onderzoek en de mogelijke meerwaarde van alternatieven.

3 Elektrische weerstandstomografie (ERT)

3.1 Achtergrond ERT

Bij een geo-elektrische meting wordt met twee stroomelektrodes een stroom in de grond gebracht, waarna het potentiaalverschil over andere elektroden paren wordt gemeten. ERT metingen zijn geo-elektrische metingen tussen boorgaten. In de praktijk worden kabels met meerdere elektrode aansluitingen gebruikt, waarbij de elektronenparen met behulp van een slimme schakelkast gekozen worden. Een ERT meting bestaat uit een reeks combinaties van de verschillende stroom en potentiaal elektroden. De keuze van deze combinaties heeft grote gevolgen voor de uitkomst van de metingen. Tijdens een eerder SKB Project (SV-416, Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's) zijn daarom meerdere schema's uitgeprobeerd en is er gekozen om een special voor de situatie te Losser ontwikkeld meetschema te gebruiken, zie Figuur 3-1.



Figuur 3-1 2D schets van een 2D ERT profiel. De bolletjes geven de elektroden aan. Tussen de rode elektroden loopt een stroom en tussen de witte bolletjes wordt het resulterende potentiaal verschil gemeten.

Bij dit schema ('Meekes' elektroden 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.

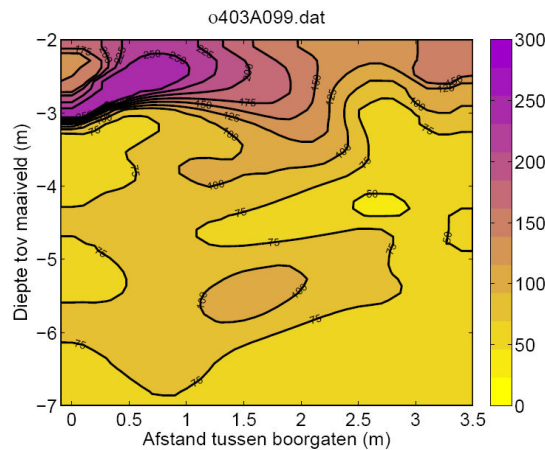
De uiteindelijke verzameling spannings- en stroommetingen kan vervolgens worden omgerekend (geïnverteerd) naar een afbeelding met weerstanden van de bodem. Het resultaat is een 2D profiel met de werkelijke elektrische weerstand van de ondergrond tussen 2 boorgaten over het dieptetraject waar de elektrodes hangen.

Naast de metingen van boorgat naar boorgat is ook gekozen om een 'standaard' geo-elektrische boorgat meting te doen in een aantal uitgekozen boorgaten. Het voordeel van deze metingen is dat deze direct de ondergrondweerstand meten langs het boorgat en niet geïnverteerd hoeven worden. Met deze metingen kunnen de inversie uitkomsten te hoogte van de boorgaten gecontroleerd worden.

3.2 ERT uitkomsten interpreteren

3.2.1 Tomographie figuren

De gemeten ERT data wordt omgerekend (geïnverteerd) naar ondergrond modellen van de elektrische weerstand. De ERT figuren in dit rapport zijn 2D doorsneden van deze ondergrond modellen passend bij de gemeten data (Bijlage B en D). Op de x-as staat de positie aan het oppervlak ten opzichte van de boorgaten en op de y-as staat de diepte. De kleuren in de figuren representeren de soortelijke elektrische weerstand (Ohm m) van de ondergrond zoals deze uit de inversie komt. Tevens zijn de contouren per 25 Ohm m weergegeven. Zie als voorbeeld Figuur 3-2.



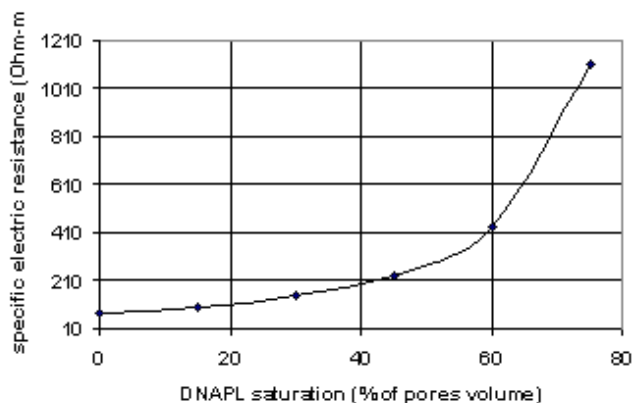
Figuur 3-2 (Figure B.1 uit de bijlage) ERT sectie 04-03 gemeten in juli 2006.

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 (SKB Project SV416). Klei en veen hebben bijvoorbeeld een lagere weerstand dan zand. In Losser bestaat de ondergrond tot 3 a 4 meter onder maaiveld uit leemige zand en gaat daar over op zandige leem. De weerstand in het leemige zand is van nature iets hoger (bruinige kleuren in Figuur 3-2) dan het zandige leem (gelere kleuren in Figuur 3-2). De DNAPL heeft een nog hogere weerstand (groter dan ~150 Ohm m) die in Figuur 3-2 te herkennen is aan de paarse kleuren.

De verkregen weerstandsmodellen bevatten een bepaalde hoeveelheid willekeur die eigen is van een potentiaal methode: Een klein contrast met grote omvang (groot volume lage DNAPL concentratie) kan in principe dezelfde meetresultaten opleveren als een groot contrast met kleine omvang (klein volume geconcentreerde DNAPL). Samen met het aantal elektroden en gekozen meet configuraties bepaald dit het oplossend vermogen/resolutie van een ERT meting. De effecten hiervan op de metingen in Losser staan beschreven in hoofdstuk 4.3.

3.2.2 Relatie tussen DNAPL concentratie en soortelijke weerstand.

De relatie tussen DNAPL concentratie en soortelijke weerstand is voor grondsoorten zoals de locatie Losser onderzocht door Schneider en Greenhouse, 1992. De relatie is sterk niet lineair, zie Figuur 3-3. Hierdoor neemt de gevoeligheid van de methode toe met de concentratie. Een concentratie afname van 80 naar 60% levert een grotere weerstandsafname op ($\sim 1.3 - 0.4 = 0.9$ k ohm-m) dan een afname van 60 naar 40% ($\sim 0.4 - 0.2 = 0.2$ k ohm-m).



Figuur 3-3 Relatie tussen DNAPL verzadiging en elektrische bodem weerstand van een zandige aquifer (Schneider en Greenhouse, 1992).

3.3 Elektrodekabel met sondering plaatsen

Het gebruik van meetkabels in volkomen filters kan, in verband met een mogelijke versnelde verticale verspreiding van verontreiniging, bezwaarlijk zijn. Bovendien zijn de (traditionele) meetkabels die geschikt zijn voor peilbuizen met volkomen filters te duur (3 tot 5 k€ per stuk) om ze in de grond te laten zitten. Er is daarom gewerkt aan een alternatieve methode om de elektrodes in de grond te brengen. Hierbij is gebruik gemaakt een speciale sondering (CPT) waarbij een flexibele kunststof slang met elektrodes de grond in wordt gedrukt. Deze meetkabel is een stuk goedkoper (~700 euro per stuk) en kan daarom ook in de grond blijven zitten. De methode is deels geïnspireerd op het plaatsen van minifilters met behulp van CPT's. De kabel blijft permanent in de grond zitten en is dus ook zeer geschikt voor monitoren.

Om deze alternatieve plaatsingsmethodiek te ontwikkelen zijn de volgende onderdelen uitgevoerd:

- het vaststellen van de, vooral voor de CPT relevante, technische randvoorwaarden voor de test elektrodekabel;
- het ontwerpen van 1 test elektrodekabel;
- het maken van 1 test elektrodekabel;
- het ontwerpen van een verbindingkast die tussen de test elektrodekabel en het geo-elektrische meetapparaat (ABEM-Sas4000) komt;
- het maken van vier verbindingkasten (2 reserve);
- het plaatsen van de test elektrodekabel met een CPT op een proeflocatie;
- het testen van de elektrodekabel op de proeflocatie;
- het aanbrengen van verbeteringen in het definitieve ontwerp van de kabels.

3.4 Resultaat plaatsen en testen elektrodekabel met sondering

Een prototype van de meetkabel is gemaakt en geplaatst met behulp van een sondering op een terrein van Grontmij in Lieren nabij Apeldoorn. Een uitgebreid verslag van de werkzaamheden staat in [Bijlage A](#). De sondeerkabel is succesvol geplaatst op de geplande diepte van 7.5 m-mv. Naar aanleiding van de test is een lijst opgesteld met kleine technische verbeterpunten die zijn doorgevoerd op de demonstratielocatie te Losser.

Bij de elektrode test met de geofysische meetapparatuur bleek dat alle elektrodes werkten en dat de speciaal voor dit project gemaakte verbindingkasten tussen het meetapparaat en de kabel goed functioneerden. De maximale stroomsterkte die via de elektrodes de grond in gebracht kon worden was echter laag (20 mA en op enkele elektrodes 50 mA, in het eerdere ERT onderzoek was dit 100 of 200 mA). Een lage stroomsterkte maakt een meting zeer storingsgevoelig en daarom heeft het gebruik van hogere stroomsterktes de voorkeur. De lage stroomsterkte kan gerelateerd zijn aan de relatief hoge elektrische weerstand van de ondergrond (grof zand, ~200 Ohm-m) en/of het relatief kleine contactoppervlak van de 'sondeer' elektrodes met de ondergrond. De belangrijkste aanpassing naar aanleiding van de test was dus het vergroten van het elektrode oppervlak.

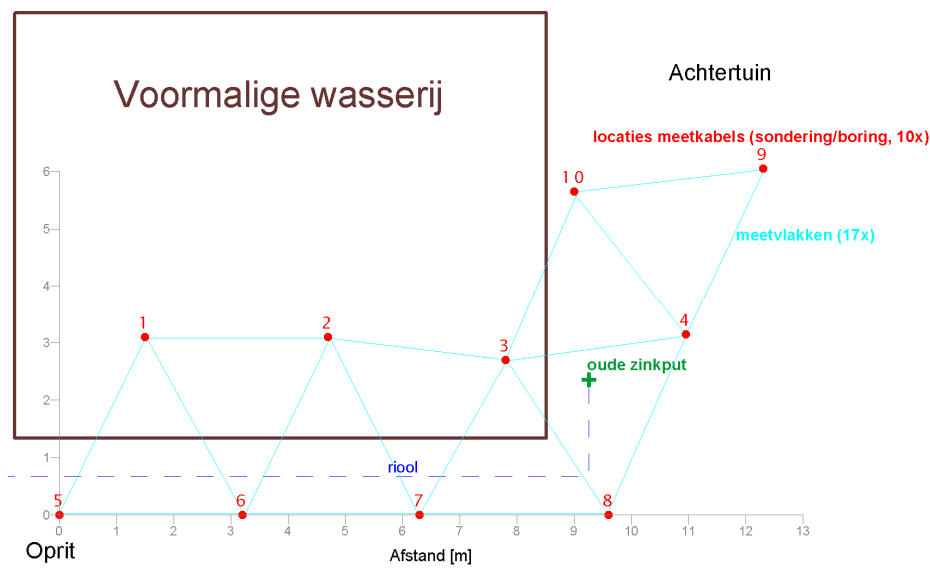
3.5 Vergroten meetsnelheid

In 2007 is door Deltares het geo-elektrische meetinstrument (Abem SAS4000) uitgebreid met een extra component (ES10-64C). Technische details en handleidingen zijn terug te vinden op de website van de fabrikant (www.abem.se). Met deze uitbreiding kunnen zogenaamde meerkanaalsmetingen (4 in het geval van de ES10-64C) worden verricht. Dit houdt in dat het potentiaalverschil tussen vier elektrodeparen tegelijk kan worden gemeten op het moment dat er tussen een ander elektrodepaar een stroom loopt. Bij de voorheen gebruikte 1-kanaals techniek kon slechts een enkel elektrodepaar worden bemeten. Dit apparaat is voor het eerst getest tijdens de tweede 0-meting (juni 2008, sectie 4.4). Tijdens de test is een meetvlak met de oude en de nieuwe apparaten gemeten en werden er geen grote verschillen in resultaten gevonden. In de praktijk betekent dit een tijdswinst van ongeveer vier uur per ERT meetvlak. Volgens de oude meetmethode werd een vlak twee keer doorgemeten in ongeveer 6 uur en met de nieuwe meetmethode wordt een vlak drie keer doorgemeten in ongeveer 2 uur. Een vlak wordt nu drie keer doorgemeten zodat beter omgegaan kan worden met eventuele extreme meetwaarden, wat ten goede komt van de datakwaliteit.

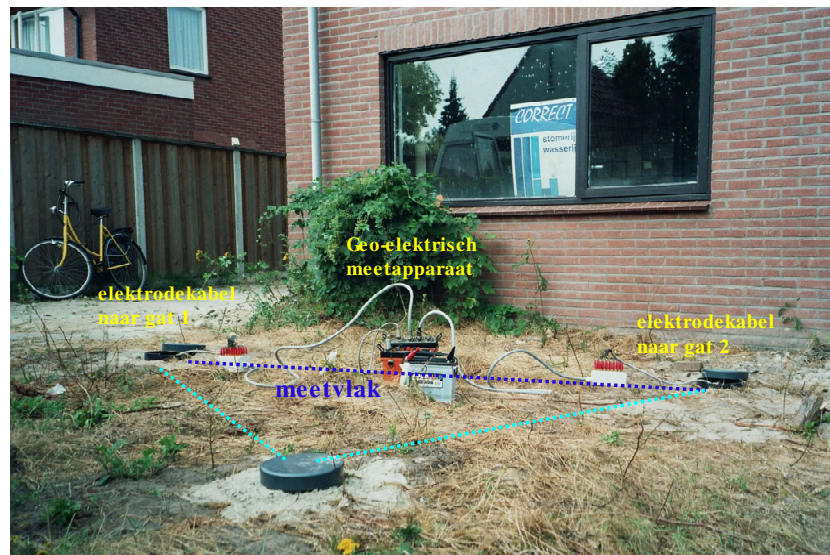
4 Lokaliseren bronzone met ERT

4.1 Inleiding

Op de verontreinigde locatie Losser zijn 10 meetkabels geplaatst in de ondergrond. De in pandige meetkabels en de kabels die binnen 1.5 m van het pand staan zijn, wegens gebrek aan manoeuvreerruimte voor de sondeerwagen, geplaatst met behulp van boringen. De overige meetkabels (ongeveer de helft) zijn geplaatst met behulp van een sondering. De meetkabels zijn geplaatst in de achtertuin nabij de zinkput waarin het afval van de wasserij werd gestort (meetlocaties 3, 4, 8, 9 en 10) en in en naast het pand langs het riool (meetlocaties 1, 2, 5, 6 en 7) waarmee de zinkput in verbinding stond. De locaties van de meetkabels staan in Figuur 4-1. Figuur 4-2 laat een ERT meting op de locatie Losser zien.



Figuur 4-1 Overzicht ERT meetgaten.



Figuur 4-2 Een ERT meting op locatie Losser.

4.2 Kenmerken van de ERT metingen te Losser

Tabel 4-1 geeft een overzicht van de kenmerken van de uitgevoerde ERT metingen te Losser weer. De meeste keuzes zijn gebaseerd op de bevindingen uit SKB Project SV416.

Tabel 4-1 Overzicht van de kenmerken van de ERT metingen te Losser.

Technische kenmerken	Locatie Losser
Aantal boorgaten	10
Aantal meetvlakken	17
Aantal elektrodes per boorgat	25
Afstand tussen de elektrodes [m]	0.192
Diepte traject waarop elektrodes zitten [m-mv]	2.22 tot 6.83
Horizontale afstand tussen meetkabels [m] (H)	3.1 tot 3.4
Boorgatlengte waarin elektrodes hangen [m] (V)	4.61
vertikaal/horizontaal (V/H)	1.36 tot 1.49
Meetoppervlak [m ²]	40 (8 x 5 m ²)
Elektroden meetconfiguratie	tripool-pool (tpp, Meekes) en boorgatmeting (bgm)
Aantal metingen per vlak	2 of 3 x 400 (tpp) en 23 (bgm)
Inversie methode	Backprojection met SensInv2D (Fechner, 2001)
Grondwaterspiegel [m-mv]	~2 (alle elektroden staan in de verzadigde zone)
Tijdstippen 0-metingen	24-28 juli 2006 (eerste 0-meting), 27-28 mei 2008 (tweede 0-meting)
Sediment ondergrond	fijn tot matig fijn kleiig zand (0-2.5 m-mv) op zandige klei (2.5 tot 7 m-mv)

Er zijn twee 0-metingen (voor de sanering) en 4 monitoringsmetingen (tijdens de sanering) uitgevoerd. De 0-metingen zijn verricht om de DNAPL bronzone te lokaliseren. De eerste 0-metingen zijn uitgevoerd in juni 2006. De start van de sanering was echter veel later dan verwacht (september 2008). Om het tijdsverschil tussen de 0-metingen en de monitoringsmetingen tijdens de sanering beperkt te houden is voor de vlakken die gemonitord werden (Hoofdstuk 5) een tweede 0-meting (eind mei 2008) uitgevoerd.

Voor de metingen zijn twee elektrodeconfiguraties gebruikt:

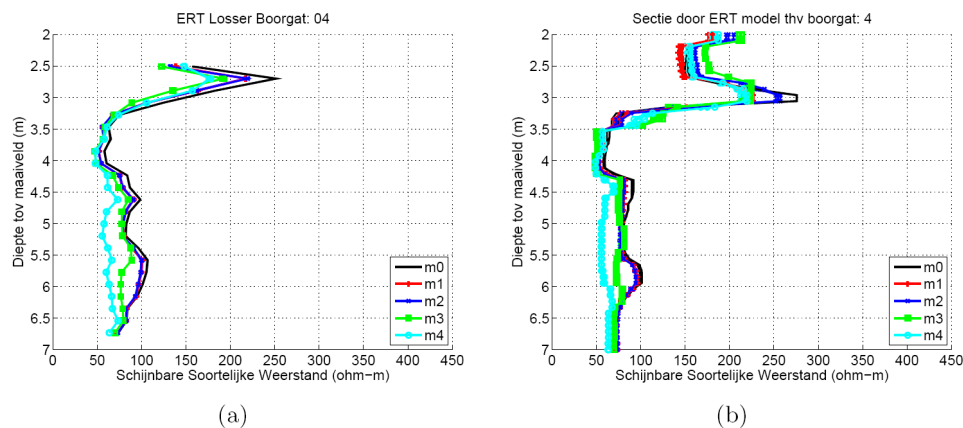
- tripool-pool (Meekes) om de soortelijke elektrische weerstand van het vlak tussen de meetkabels te karteren (2D);
- boorgatmeetconfiguratie om de soortelijke elektrische weerstand vlak langs het boorgat in kaart te brengen (1D).

4.3 Kwaliteit Inversie

ERT metingen moeten geïnverteerd worden naar weerstandsmodellen. De verkregen weerstandsmodellen bevatten een bepaalde hoeveelheid willekeur die eigen is van een potentiaal methode. Om te bepalen hoe groot deze willekeur is en hoe dat de interpretatie beïnvloed zijn een aantal tests gedaan.

4.3.1 Vergelijking met boorgatmetingen

Om inzicht te krijgen hoe groot de foutmarge in de ERT modellen is, zijn de modelwaarden vergeleken met de boorgatmetingen (Bijlage F). De boorgatmetingen zijn niet geïnverteerd en geven dus direct de correcte weerstand ter plekke van de boorgaten weer. Figuur 4-3 toont een vergelijking tussen de gemeten weerstandswaarden (a) en de berekende (b). Het gedrag komt grotendeels overeen en de verschillen tussen de absolute waarden zijn niet heel groot. Dit betekent dat de inversie goed gelukt is.



Figuur 4-3 (Figure F.1 uit de bijlage) Boorgatmetingen (a) in boorgat 4 en waarde uit de ERT modellen (b) uit de opvolgende meetronden.

4.3.2 Data fit

De ERT modellen zijn zo berekend dat ze de gemeten weerstanden voorspellen. Er zit echter altijd een verschil tussen de gemeten en voorspelde weerstand. Deze verschillen zijn weergegeven in tabel vorm (Bijlage C en E). Figuur 4-4 toont een dergelijk verschil. De verschillen worden berekend door het verschil tussen elk gemeten en 'voorspelde' meetpunt te kwadrateren, op te tellen en te normaliseren door de som van het kwadraat van gemeten waarden. Hoe groter dit getal hoe slechter de data met elkaar overeenkomt. Een verschil van rond 2 % wordt als overeenkomstig beschouwd. In het voorbeeld (sectie van boorgat 04 naar boorgat 3) wordt de data van meting A (2006) goed voorspeld door het model (1.89%). De data van meting A verschilt 10.87 % met dat van meting B (2008). Interessant is dat het model gemaakt met de metingen van 2008 (B) de data van de 2006 ongeveer even goed voorspellen (8.17 versus 7.09 %).

ERT 04-03	Data MA	Data MB
Data MA	0.00	.
Data MB	10.87	0.00
Model MA	1.89	10.59
Model MB	8.17	7.09

Figuur 4-4 (Figure C.1 uit de bijlage) % RMS verschil tussen gemeten data en data behorende bij de ERT sectie 04-03.

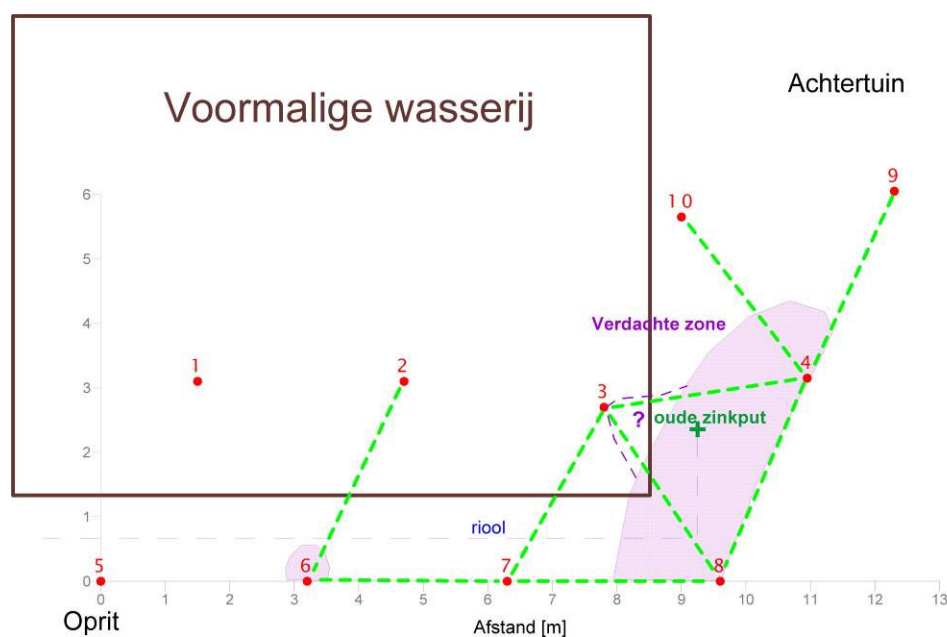
4.3.3 Vergelijking met grondwatermonsters

Op basis van de uitkomsten van de ERT-metingen is een bemonsteringsprogramma opgezet voor het grondwater. Voor de bemonstering is gebruik gemaakt van de 'ConeSipper' van de firma AquaTerra-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 zijn ook referentiemonsters genomen in zones waar, op basis van de ERT-meting, geen DNAPL wordt verwacht. De watermonsters zijn direct naar het laboratorium gebracht voor analyse. Alle monsters waren echter niet of nauwelijks verontreinigd. Dit geldt ook voor monsters op locaties waarvan zeker is dat er een verontreiniging zit op basis van de geanalyseerde watermonsters uit de filters. Hierdoor kunnen de ERT metingen enkel vergeleken worden met de geanalyseerde watermonsters, Figuur 5-1.

4.4 Resultaat 0-metingen

Om de DNAPL in kaart te brengen zijn *alle* ERT vlakken in juli 2006 doorgemeten. Aan de hand hiervan zijn de verdachte zones in kaart gebracht en is bepaald welke ERT vlakken gemonitord worden. Dit is weergegeven in Figuur 4-5.



Figuur 4-5 Plattegrond van de ERT meetvlakken die zijn gebruikt voor de monitoring metingen (groene stippellijnen). De monitorings meetvlakken zijn aan de hand van de in 2006 gekarteerde verdachte zones (paars) bepaald.

Op basis van boorgatmetingen (Bijlage F), de beschikbare boorbeschrijvingen (Tabel 4-1) en de relatie tussen DNAPL verzadiging en elektrische bodem weerstand van een zandige aquifer (Figuur 3-3) is de grenswaarde waarboven de elektrische weerstand van de ondergrond boven de achtergrondwaarde komt geschat tussen 125 en 160 Ohm-m. In de figuren is de grenswaarde gesteld op 150 Ohm-m. Zones met een waarde hoger dan de grenswaarde hebben dus een verhoogde kans op de aanwezigheid van puur product DNAPL, dit zijn de als verdacht gekarteerde zones in Figuur 4-5.

De verdachte zone zit nabij de oude stortput (vlakken 4-3, 4-8, 3-8 en 7-8) waarin de afvalproducten van de chemische wasserij vroeger zijn geloosd. De diepte van de verdachte zone is 2.5 tot 3.4 m-mv. De onderkant van de verdachte zone valt dus ongeveer samen met de overgang van kleiig zand naar zandige klei.

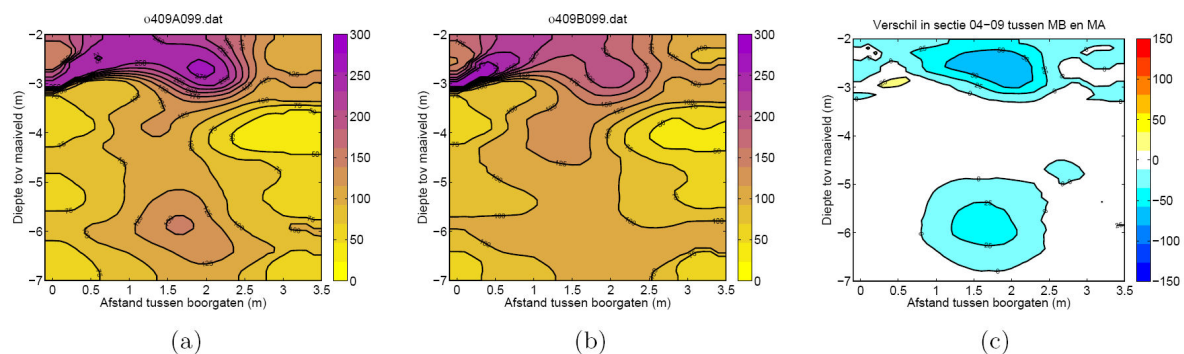
In het riool aan de zijkant van de wasserij, waarop de stortput uitkwam, zijn geen grote verdachte zones aangetroffen. Een uitzondering hierop is wellicht locatie 6. Nabij boorgat 3 is ook een verhoogde weerstand waargenomen. Deze anomalie is klein en weerstand ligt net boven de grenswaarde 150 Ohm-m.

De inrichting van de sanering (bijvoorbeeld stelling van onttrekkingfilters) is mede bepaald door de locatie (xyz) van de hier gevonden verdachte zones.

De vlakken die gemonitord zijn, negen van de zeventien, zijn eind mei 2008 een tweede keer doorgemeten, voor de start van de sanering (september 2008). De tweede 0-meting is uitgevoerd om diverse redenen:

- het grote tijdsverschil (twee jaar) tussen de 0-meting en het monitoren is niet wenselijk omdat er mogelijke 'natuurlijke' veranderingen (bijvoorbeeld het uitzakken van DNAPL's) hebben plaats gevonden binnen die periode;
- het controleren of het plaatsen van de saneringsystemen een invloed hebben gehad op de positie van de DNAPL's en of de ERT-metingen worden beïnvloed door de aanwezigheid van de systemen;
- de meetkabels hebben twee jaar in een verontreinigde ondergrond gezeten, mogelijk zijn ze hierdoor aangetast;
- het testen van de meer-kanaals metingen (besproken in Sectie 3.5).

Voor de optimale vergelijkbaarheid zijn de data van de tweede 0-meting met precies dezelfde instellingen verwerkt (geïnverteerd) als de data van de eerste 0-metingen. De resultaten staan in bijlage B, als voorbeeld toont Figuur 4-6 de ERT sectie tussen boorgat 4 en 9 gemeten in 2006 (a) en 2008 (b).



Figuur 4-6 (Figure B.2 uit de bijlage) ERT sectie 04-09 juli 2006 (a), mei 2008 (b) en verschil (c).

De verdachte hoge weerstandzone is na twee jaar qua positie, omvang en weerstandsgrootte op hoofdlijnen identiek in kaart gebracht. Alleen tussen het profiel van boorgat 6 naar 2 en van 7 naar 3 zit tussen 2006 en 2008 een groot verschil. Uit de datafit (bijlage C) blijkt echter dat de inversie van de data uit 2006 niet gelukt is. Er is een verschil van 24,5 respectievelijk 42,5 % rms tussen de gemeten en voorspelde data. Het model komt dus niet overeen met de werkelijkheid. De inversie van de 2008 data is met een rms verschil van maar 1,1 en 1,2 % wel gelukt.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat;

- De zone met de hoogste concentratie aan puur product gedurende twee jaar niet de diepte in is weggezakt.
- De geïnstalleerde saneringsystemen geen significante invloed op de meetresultaten.
- De gebruikte meetkabels robuust genoeg zijn om minstens twee jaar in door DNAPL's vervuilde ondergrond te zitten zonder dat het meetvermogen negatief wordt beïnvloed door bijvoorbeeld corrosie van de RVS elektrodes of aantasting van de HDPE bescherming.
- Er kritisch gekeken moet worden naar de inversie resultaten.

Doordat de meting twee keer is uitgevoerd is het mogelijk om een soort van fout marge te bepalen. Dat wil zeggen een weerstandsverandering in twee jaar zonder actieve sanering. Uit de figuren uit bijlage B blijkt dat de weerstand op ongeveer 70 ohm-m gelijk is aan elkaar (waarbij de profielen 6-2 en 7-3 niet meegenomen zijn). En dat er van nature vooral een dalende trend in de elektrische weerstand zit ter hoogte van de DNAPL. Dit zou er op kunnen wijzen dat de DNAPL zich langzaam verspreid c.q. een pluim vormt. De maximale weerstandswaarden liggen in de buurt van 300 ohm-m, dit vertaald zich naar een DNAPL verzadiging van tussen de 50 en 60% porie volume. (Zie Figuur 3-3).

5 Monitoren van de sanering

5.1 Inleiding

Voor de aanpak van de bodemsanering op de locatie Gronausestraat te Losser is een saneringsplan opgesteld door Grontmij (2005). In dit saneringsplan wordt de manier van saneren en de doelstellingen (eindresultaat) weergegeven.

Op hoofdlijnen bestaat de saneringen uit de volgende handelingen:

- Installatie van de diverse in-situ systemen (filters, leidingen etc.). De installatie heeft plaatsgevonden in de maanden april tot en met juli 2008;
- Opstart van de in-situ sanering in combinatie met ERT-metingen (september 2008).
- In-situ sanering bron- en pluimgebied van de verontreiniging. Duur circa 3 jaar
- Sanering pluimgebied van de verontreiniging. Duur circa 7 jaar.

Bij het ontwerp van de in-situ sanering is gebruik gemaakt van de uitkomsten van de ERT-metingen zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 4.

5.2 De sanering

5.2.1 Inrichting sanering

De uitvoering van de sanering vindt geheel plaats met vier verschillende in-situ technieken. In tabel 5.1 is een overzicht van de technieken vermeld met de toevoeging wat het specifieke doel van de inzet is.

Tabel 5-1 Overzicht toegepaste in-situ saneringstechnieken.

Techniek	Toepassingsdiepte [m-mv]	Aantal filters	Doel inzet	Locatie inzet
Bodem luchtextractie (BLE)	0.5-2.0	9	Sanering onverzadigde bodemzone	brongebied
Twee fase extractie (TFE)	2.0-6.0	80	Sanering verzadigde zone	brongebied
Persluchtinjectie (PLI)	2.0-6.0	7	Sanering verzadigde zone	brongebied
Grondwateronttrekking	5.0-30.0	12	Sanering verzadigde zone	bron- en pluimgebied

Bij de techniek *persluchtinjectie* wordt atmosferische lucht onder de grondwaterstand de bodem ingepompt. Deze techniek wordt gebruikt om twee effecten te stimuleren. Enerzijds wordt de verontreiniging gemobiliseerd en anderzijds kan na het toedienen van lucht de VOCL verontreiniging, door de lage dampspanning, deels overgaan in een gasfase. Persluchtinjectie vindt plaats in combinatie met *bodemlucht extractie* om de verontreinigde lucht uit de onverzadigde zone te halen en bovengronds te zuiveren. Tevens wordt de gasfase VOCL welke is gecreëerd door de persluchtinjectie afgevangen.

Bij de techniek *twee fase extractie* worden bodemlucht, water en/of pure fase vloeistof (water en verontreiniging) onttrokken uit de bronzone. De opgepompte stromen worden bovengronds gescheiden en gezuiverd.

Bij de techniek *grondwateronttrekking* wordt grondwater onttrokken via filters om bovengronds te worden gezuiverd. Deze techniek is vooral gericht op het onttrekken van in water opgeloste verontreinigingen in het pluimgebied.

Voor de plaatsing van de twee fase extractie filters en de persluchtinjectie filters is de locatie van het DNAPL brongebied in de verzadigde zone belangrijk. De uitkomsten van de ERT-nulmeting ('verdachte zone' in Figuur 4-5) zijn gebruikt om de positie van de twee systemen, zoals bepaald met behulp van conventionele monsters in het initiële saneringsplan, te controleren. Concreet heeft dit geleid tot het verschuiven van een aantal filterposities, zodanig dat de invloedsgebieden van de filters nu overlappend zijn met van de voor 'DNAPL's verdachte gebieden' die uit de ERT-nulmeting zijn gekomen.

Tijdens de plaatsing van de verschillende saneringssysteem is als randvoorwaarde gehanteerd dat in de verzadigde zone tussen de 2 en 10 m-mv geen metaal mag worden gebruikt. Dit is gedaan om storingen op de ERT-metingen te voorkomen. Alle filters en leidingen zijn in deze zone van kunststof uitgevoerd.

5.2.2 Uitvoering sanering

De opstart van de sanering vindt gefaseerd plaats. Er zijn meerdere argumenten voor deze handelwijze. De persluchtinjectie zou de ERT-metingen mogelijk kunnen verstoren en wordt daarom later gestart dan de technieken die waarschijnlijk weinig directe invloed hebben op de ERT-metingen. Tevens zijn er twee praktische argumenten voor de fasering. Het opstarten van alle systemen tegelijkertijd zal: a) leiden tot een overbelasting van de zuivering, en b) maakt het zeer moeilijk de individuele in-situ technieken op hun werking te beoordelen. De opstartvolgorde van de verschillende saneringstechnieken is aangegeven in tabel 5.2.

Tabel 5-2 Opstart van de in-situ technieken en verwachte invloed op DNAPL bronzone.

Techniek	Start tijdstip inzet techniek	Verwachte invloed techniek op DNAPL bronzone
Bodemlucht extractie	Bij opstart	Geen
Twee fase extractie	Bij opstart	Groot
Persluchtinjectie	ongeveer 4 weken na opstart	Groot
Grondwateronttrekking brongebied	Bij opstart	Matig tot klein
Grondwateronttrekking pluim	Nader te bepalen	Geen

Uit de tabel volgt dat de verwachting is dat vooral de twee fase extractie en de persluchtinjectie invloed hebben op de DNAPL bronzone en dus ook op het resultaat van de ERT metingen. Het starttijdstip waarop beide technieken worden ingezet verschilt daarom ook ongeveer 4 weken. De uitvoeringen van de ERT-metingen tijdens de monitoring vindt dan ook in nauwe afstemming plaats met de inzet van deze twee technieken (Hoofdstuk 5.3.2).

Op basis van eerdere door Grontmij begeleide saneringen met deze in-situ technieken, was de verwachting dat de vracht in de brongebieden binnen 4-8 weken na opstart met 50% of meer zal zijn gedaald. Dit is echter een ruwe schatting omdat hoog frequente monitoring van een sanering relatief zeldzaam is.

5.3 Monitoren met ERT

5.3.1 In-situ saneren en monitoren

Cruciaal voor het succes van een in-situ bodemsanering is een goede monitoring. Hierbij is een onderscheid te maken tussen:

- Proces monitoring. Deze monitoring richt zich op het functioneren van de technieken (bijvoorbeeld het functioneren van de pompen).
- Milieukundige monitoring. Deze monitoring richt zich op het verloop van gehalten verontreiniging in zowel de bodem als de saneringssystemen (filters etc.).

Op basis van de uitkomsten van de monitoring wordt continu beoordeeld of de technieken naar behoren functioneren en of de daling van gehalten plaatsvindt zoals verwacht binnen de tijdsplanning. Bovendien kan door het monitoren van het proces de sanering worden geoptimaliseerd. Het pompregime zou bijvoorbeeld verschoven kunnen worden van relatief 'schone filters' naar 'verontreinigde filters'. De ERT metingen worden gebruikt als onderdeel van de milieukundige monitoring.

5.3.2 ERT metingen tijdens de sanering

De uitvoeringen van de ERT-metingen tijdens de monitoring heeft als enige doel het waarnemen van veranderingen in de grootte en de concentratie van de DNAPL bronzone. Op basis van waargenomen DNAPL's bij de nulmeting en op de ervaringen van Grontmij bij eerdere saneringen, wordt vooraf verwacht dat de bronzone binnen enkele weken tot een paar maanden na opstart van de sanering significant zal zijn gereduceerd.

Indien de verwachting klopt dan kan worden geconcludeerd dat de in-situ sanering in het brongebied goed functioneert. Indien dit niet het geval dan wordt overgegaan tot het eerder dan gepland¹ nemen van watermonsters uit peilbuizen. Indien ook hieruit blijkt dat er nog sprake is van DNAPL's dan zal de sanering worden aangepast. Dit kan plaatsvinden door het bijplaatsen van onttrekkingsfilters of het anders aansturen van de saneringsystemen.

Het monitoren van een in-situ sanering met meerdere technieken (ERT en conventioneel) is nieuw. Er zijn enkele aspecten voorzien die van invloed kunnen zijn op de monitoring met ERT:

- De saneringsduur in relatie tot de ERT-meting. Het is onbekend hoe snel DNAPL's in de ondergrond worden verwijderd door de gebruikte technieken. Er is daarom ook bewust gekozen voor een korte periode van saneren (enkele dagen) voordat de eerste ERT-meting wordt uitgevoerd.
- De aansturing van de sanering. De PLI en de TFE worden intermitterend bedreven (een vaste periode aan gevolgd door een vaste periode uit). Tevens worden groepen van filters na elkaar geactiveerd. Dit betekent dat de systemen als het ware 'wandelen' over de locatie waar de DNAPL aanwezig is. Wat de effecten zijn van deze wijze van aansturing op de DNAPL is onbekend.
- Het herstel van evenwichten in de bodem. Bij de gebruikte in-situ technieken wordt veel dynamiek gegenereerd in de bodem waarbij luchtpockets in de verzadigde zone zouden kunnen ontstaan. Bij het uitvoeren van ERT-metingen worden deze luchtpockets waargenomen als gebieden met een hoge elektrische weerstand. Dit kan leiden tot de onterechte interpretatie van deze gebieden als DNAPL's. Een andere mogelijke consequentie is een lokale verlaging van de grondwaterstand waardoor het elektrische contact van de bovenste elektrode(s) van de meetopstelling met de ondergrond verslechterd. Om deze mogelijke invloeden te minimaliseren wordt voor elke ERT-meting de sanering een paar dagen stilgezet zodat het natuurlijke evenwicht in de bodem zich kan herstellen.
- Ook bij persluchtinjectie kunnen luchtpockets ontstaan in het meetgebied van ERT. Er is bij de planning van de sanering (Tabel 5-2) dan ook voor gekozen de persluchtinjectie pas na de twee ERT monitoringsronden op te starten.

Tabel 5-3 Logboek van belangrijke saneringsactiviteiten en de ERT monitoring metingen.

Datum	TFE	GWO	PLI	Opmerkingen en bijzonderheden
jul-06				ERT-meting MA
mei-08				ERT-meting M0 / MB
1-9-2008	1300 aan	1300 aan		
3-9-2008	1200 uit	1130 uit		Systeem uitgezet i.v.m. ERT-metingen en klachten over geluid
9-9-2008				ERT-meting M1
10-9-2008	1200 aan	1200 aan		BLE kort in bedrijf geweest voor geluidsmetingen
15-9-2008	800 uit	800 uit		Uitgeschakeld i.v.m. ERT-metingen
19-9-2008				ERT-meting M2
19-9-2008	1400 aan	1400 aan		
22-9-2008		900 I/II aan		
26-9-2008	1500 uit	1500 uit		Uitgeschakeld i.v.m. zakking hoogtebout tot -5 mm
8-10-2008				BLE, TFE en GWO (X t/m XII) circa 2 uur in bedrijf i.v.m. geluidsmetingen
30-10-2008	1000 aan			
4-11-2008		1000 aan		DW 10 min. aan/20 min; vanaf 7-11-08 5 min. aan/10 min. uit
6-11-2008				Groep 3 TFE (ondiep 28 t/m 40) door defecte kogelklep niet in bedrijf
11-11-2008			1100 aan	Groep 3 TFE (ondiep 28 t/m 40) weer in bedrijf. Nieuwe klep
12-11-2008				PLI filter 6 werkt niet
14-11-2008				

¹ het saneringsplan voorziet in het nemen van watermonsters 6 maanden na start van de sanering

20-11-2008				Door defecte voeding staat de gehele installatie uit. Niet bekend wanneer defect is opgetreden
27-11-2008				ERT-meting M3
30-3-2009				ERT-meting M4
				Systeem uit bedrijf
				Systeem in bedrijf

Uit Tabel 5-3 kan worden opgemaakt dat de Twee fase extractie tot aan de derde ERT-monitoring totaal 34 dagen in bedrijf is geweest. De persluchtinjectie is totaal 9 dagen in bedrijf geweest. De grondwateronttrekking ter plaatse van het brongebied (no. I en II) zijn in totaal 20 dagen in bedrijf geweest.

Tijdens de sanering zijn de onttrekkingsdebieten van de diverse systemen vastgelegd. Ook zijn analyses verricht aan de stromen. Op basis hiervan kan worden bepaald wat de verwijderde vracht aan VOCL's is in de periode tijdens de ERT-metingen. Navolgend zijn deze voor de TFE en de GWO vermeld:

- TFE. Gemiddelde vracht per dag verwijderd 253 gram. Over een periode van 34 dagen 8.600 gram (afgerond). In de ontwikkeling van de gehalten is in de meetperiode geen dalende trend waar te nemen;
- GWO. Gemiddeld per dag verwijderd diepwell I en II samen 120 gram. Over een periode van 20 dagen 2.400 gram. In de ontwikkeling van de gehalten is in de meetperiode geen dalende trend waar te nemen.

Uit het bovenstaande kan worden opgemaakt dat in de periode dat de ERT-metingen 1 tot en met 3 zijn verricht circa 11 kg aan VOCL is verwijderd door de TFE en de GWO.

Omdat de ERT resultaten tot en met meting M3 weinig verandering lieten zien, is er nog een laatste ERT-meting op 30 maart 2009 uitgevoerd (M4). In deze periode is de sanering 61 dagen in bedrijf geweest. De verwijderde vracht bedraagt ongeveer 25 kg. Wat op een gemiddelde vrachtverwijdering komt van ongeveer 0,4 kg per dag. 90% van de vrachtverwijdering wordt gerealiseerd door de TFE.

5.3.3 Resultaten monitoring met ERT

Uit de monitoringsmetingen (Bijlage D en E) blijkt dat de ERT geen grote afname van weerstand heeft waargenomen. Opvallend, met name in vergelijking met de twee nulmetingen beschreven in hoofdstuk 4, is dat er met name bovenin (2 - 3.5 m-mv) een toename van de weerstand gezien wordt. De uitkomsten van de metingen vallen niet binnen het verwachtingspatroon, van een snelle afname van de DNAPL. Dit kan verschillende oorzaken hebben.

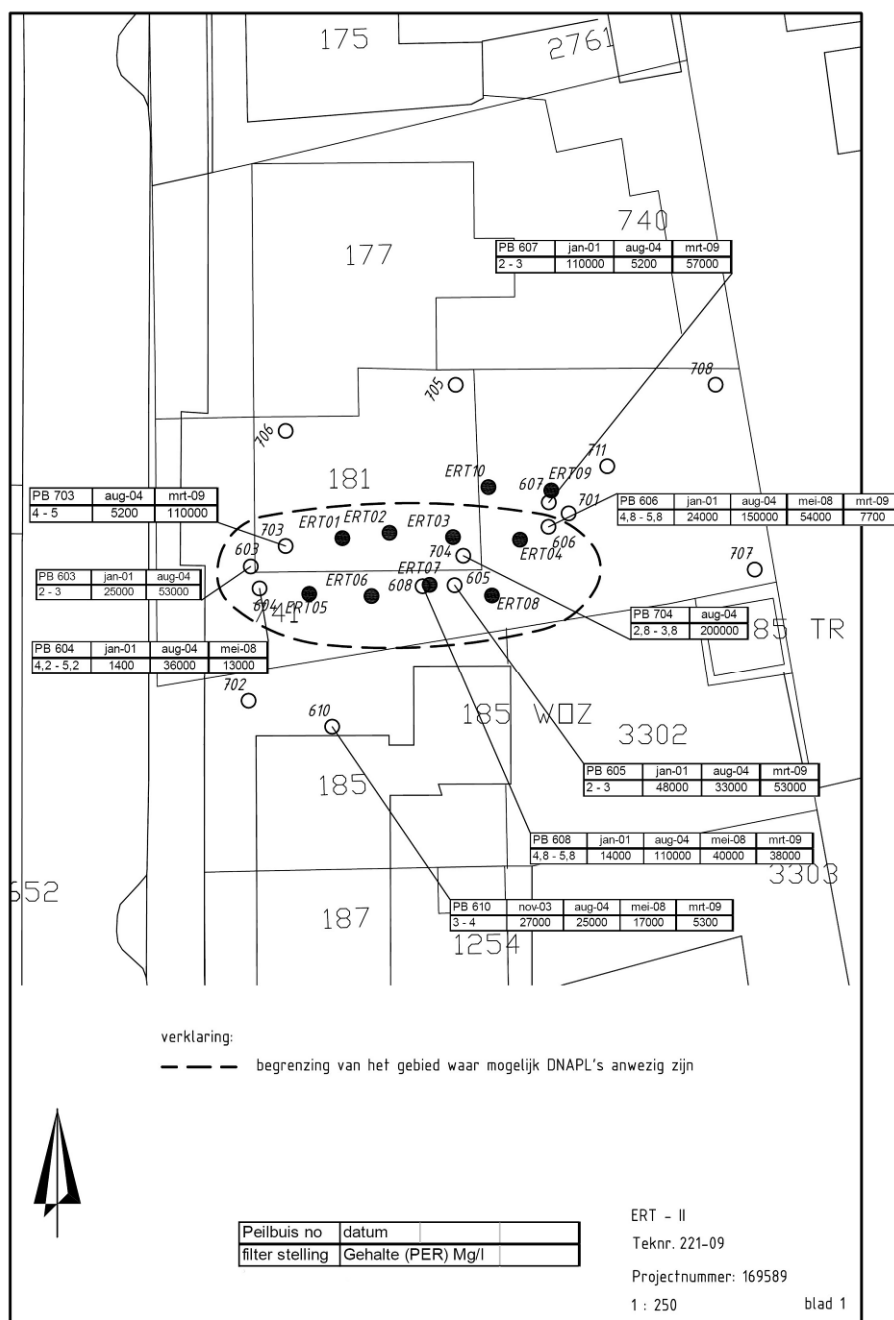
Relevantie van verwijderde vracht

In de meetperiode is in totaal 25 kg VOCL verwijderd. Dit is een relatief kleine hoeveelheid op de geschatte totale verontreiniging van meerdere 1.000 kg's VOCL. Tevens kan afgevraagd worden of de vracht uniform verwijderd is. De vracht kan van uit het ERT gebied afkomstig zijn, maar ook van daarbuiten. In het laatste geval hoeft er geen weerstandsverandering te zijn opgetreden.

Effectiviteit van de saneringssystemen ten opzichte van de DNAPL's

Hiermee wordt bedoeld dat de saneringssystemen, tijdelijk, niet bijdragen aan het verwijderen van DNAPL's. Hoewel er gesaneerd wordt, blijven de DNAPL's intact. Een goed voorbeeld hiervan is de persluchtinjectie (PLI). Deze zal initieel bijdragen aan een sterke mobilisering van verontreiniging door het 'losmaken' van verontreiniging uit de individuele bodemporiën. Bovendien kan de perslucht de verontreiniging verplaatsen. Dit effect is waarschijnlijk waargenomen vanaf ERT metingen M3 en is mogelijk een verklaring van de toename in elektrische weerstand boven de secties (Bijlage D).

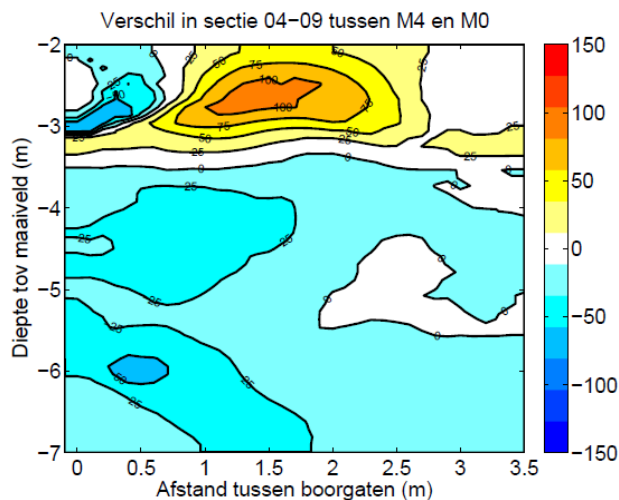
Ter controle van de ERT metingen zijn in maart 2009 grondwatermonsters genomen en geanalyseerd. De uitkomsten inclusief de eerdere PER analyses zijn weergegeven in Figuur 5-1. De conventionele metingen geven aan dat de PER gehalten zowel zijn toe als afgenomen, en over het algemene dezelfde orde van grootte hebben. Dit doet vermoeden dat de saneringssystemen vooral een mobilisatie veroorzaken.



Figuur 5-1 Resultaten van PER analyses op watermonsters uit 1 meter lange filters voor locatie Losser op meerdere tijdstippen. De sanering is gestart in september 2008. Het nummer 181 staat in de voormalige chemische wasserij. In de figuur zijn ook de ERT meetpunten aangegeven.

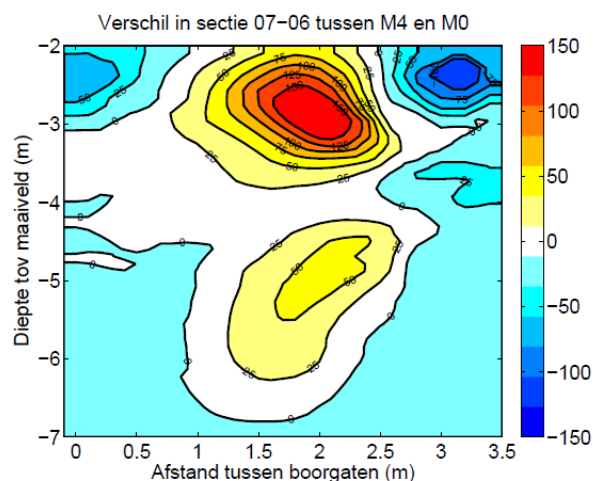
Uit het figuur blijkt dat met name de analyses van monsters uit peilbuis 608, 606 en in mindere mate 605 en 607 geschikt zijn voor een vergelijking met de ERT secties.

Peilbuis 606 laat een sterke verlagingen van het PER gehalte op 4,8-5,8 m diep zien tussen 2008 en 2009. Peilbuis 607 laat een sterke toename van het PER gehalte op 2-3 m diep zien tussen 2004 en 2009. Beide waarnemingen kunnen ook in ERT sectie 04-09 herkend worden, Figuur 5-2. Dieper dan 3.5 m is de weerstand afgenomen en de weerstand in het bovenste gedeelte is toegenomen en in de richting van ERT boorgat 9 verschoven.



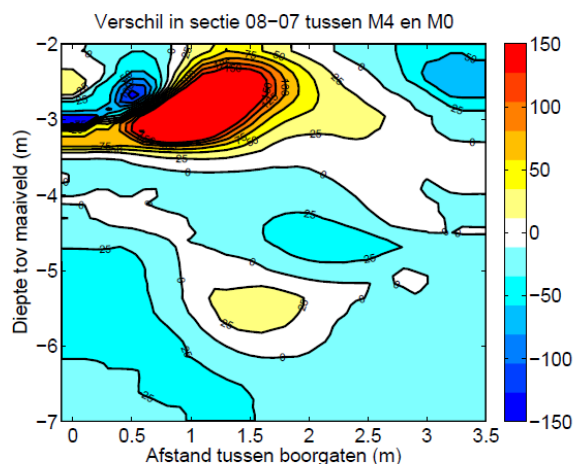
Figuur 5-2 Verschil in ERT sectie 04-09 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.2 van bijlage D)

Peilbuis 608 laat een minimale verlaging van het PER gehalte op 4,8-5,8 m diep zien tussen 2008 en 2009. Ook de weerstanden in de buurt van ERT boorgat 7 zijn afgenomen, zie Figuur 5-3. De weerstanden iets verder van het boorgat af (1-2m) zijn echter toegenomen. Omdat ook de PER gehalten in de grondwatermonsters een indirecte indicatie zijn van de DNAPL is het de vraag of een vergelijking hier terecht is. Mede omdat de PER afname relatief klein is.



Figuur 5-3 Verschil in ERT sectie 07-06 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.6 van bijlage D)

Peilbuis 605 laat een sterke toename van het PER gehalte op 2-3 m diep zien tussen 2004 en 2009. Dit is ook te herkennen in ERT sectie 08-07, zie Figuur 5-4. Doordat er geen watermonster in 2008 genomen is, is deze vergelijking niet optimaal. Uit de monsters uit peilbuis 608 blijkt namelijk dat het Per gehalte tussen 2004 en 2008 meer dan gehalveerd is en dat tussen 2008 en 2009 er relatief weinig verschil is.



Figuur 5-4 Verschil in ERT sectie 08-07 tussen maart 2009 (M4) en mei 2008 (M0). (Uit figuur D.9 van bijlage D)

Een belangrijk doel van de ERT metingen betrof een aanvulling op de monitoring van de in-situ sanering. De resultaten van de ERT metingen hebben aangetoond dat de verwachte snelle afname van de DNAPL in de bodem niet is opgetreden. Uit de conventionele meetdata verzameld tijdens de monitoring kan worden geconcludeerd dat er geen sprake is van significante afnamen van gehalten in peilbuizen of onttrokken stromen van de sanering. De conventionele meetdata en ERT data geven daarmee een consistent beeld.

Op basis van de ERT en conventionele waarnemingen is begin 2009 begonnen met het opnieuw instellen van de verschillende saneringssystemen. Hoofddoel betrof het vergroten van de hoeveelheid vracht VOCL die per dag wordt verwijderd. Dit wordt onder andere gedaan door het consequent inschakelen van vooral de TFE filters op die locaties waar de DNAPL's aanwezig zijn.

6 Toepasbaarheid ERT op andere locaties

6.1 Inleiding

Voor de toepasbaarheid van ERT metingen op andere locaties zijn drie aspecten beschouwd:

- benodigde locatietekens voor de inzet van ERT (Sectie 6.2);
- mogelijke plaats van ERT binnen het bodemonderzoek traject (Sectie 6.3);
- kostenschatting (Sectie 6.4).

6.2 Benodigde locatietekens voor inzet ERT

In twee SKB Projecten (dit rapport en SKB-rapport SV-416) 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.

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 (Figuur 3-3). Echter, wanneer de geo-elektrische weerstandsofbouw van de ondergrond goed bekend en relatief homogeen is zullen lagere percentages DNAPL's ook nog gedetecteerd kunnen worden.

De volgende bodemopbouw factoren 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 kan ERT absoluut een meerwaarde hebben omdat de positie van de DNAPL dan lastig te voorspellen is (bijvoorbeeld locatie Utrecht, SKB-rapport SV-416).
- De meerwaarde van ERT op locaties waar DNAPL's zich relatief ongehinderd verticaal kunnen verspreiden is ook groot. Op voorhand is duidelijk dat de uitvoering van een sanering op deze locaties erg duur is. DNAPL's kunnen op zulke locaties, tegen de verwachting in, namelijk relatief ondiep zitten boven zones met subtiele sedimentlogische overgangen (bijvoorbeeld een dichtere pakking van het korrelskelet). Deze subtiele sedimentlogische overgangen zijn meestal niet duidelijk waarneembaar in boringen (bijvoorbeeld locatie Coevorden, SKB-rapport SV-416).

6.3 Mogelijke plaats van ERT in bodemonderzoek

ERT kan financieel (nog) niet 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 wordt bereikt. Bovendien speelt de bodemopbouw van een locatie een belangrijke rol.

6.4 Kostenschatting

Het lokaliseren van DNAPL's met behulp van ERT is relatief duur omdat de met behulp van een boring of sondering te plaatsen meetkabels relatief duur zijn en relatief dicht bij elkaar moeten staan (3 tot 4.5 m). Een ruwe kostenschatting (2008 tarieven) van de activiteiten van een ERT onderzoek op een locatie vergelijkbaar met Losser is weer gegeven in Tabel 6-1. De kosten zijn lager dan voor dit project omdat het exclusief innovaties (ontwikkelen meetkabel, testen nieuw apparaat, ervaring opdoen met monitoring) en kennisoverdracht is.

Als er gemeten wordt in peilbuizen met volkomen filters dan vallen de kosten van het maken van de kabels weg omdat dan de beschikbare traditionele kabels gebruikt kunnen worden. De kosten van het plaatsen van een peilbuis met volkomen filter is echter wel hoger dan van sonderingen. Bovendien is men dan gebonden aan de vaste elektrode afstanden van de beschikbare kabel en is een peilbuis met volkomen filter niet altijd wenselijk in verband met de mogelijke verdere verspreiding van verontreinigingen. Als er in of op de bodem infrastructuur aanwezig is (bijvoorbeeld een betonplaat) dan kan dit wel leiden tot een verhoging van de boor/sondeerkosten voor het plaatsen van de meetkabels.

Het is relatief kosteneffectief om monitoring rondes uit te voeren, omdat de kosten voor het maken en plaatsen van de meetkabels al gemaakt zijn en omdat de interpretatie (inversie methode) al gekozen is. Indien de ondergrond (niet te grote kleef aan de kabel) en de verontreiniging het toelaten dan is het wellicht mogelijk de kabel direct na de 0-meting weer uit de grond te trekken en her te gebruiken. Het vergroten van de meetsnelheid (Hoofdstuk 3.5) levert een flinke tijdwinst en daarmee ook kostenbesparing op. In totaal is ERT door de technische innovaties en de opgebouwde ervaring ongeveer 50% goedkoper geworden.

Tabel 6-1 Kostenschatting (2008) van ERT 0 en monitoring metingen op een verontreinigde locatie (10 meetkabels, 17 meetvlakken, oppervlakte ~40 m2).

Activiteit	Kostenschatting [Euro] - oorspronkelijk	Kostenschatting [Euro] - na innovaties en ervaring
Maken van meetkabels	16.000 (4 hergebruikbare kabels)	7000 (10 x eenmalige gebruikbare sondeerkabels)
Plaatsen van meetkabels (maximaal 10 m-mv)	6000	2500
Doormeten van 17-vlakken tussen 10 boorgaten	7000 (6 dagen)	3500 (3 dagen, vier-kanaals meting)
Interpretatie 0-meting + rapport	6000 (6 dagen)	4000 (4 dagen)
Diverse overleg ed.	2000	2000
Totaal (0-meting)	~36000	~19000
2 x monitoring (meten + interpretatie + rapportage, ~7 vlakken)	2 x 8000 (7 dagen per keer)	2 x 3500 (3 dagen per keer, vier-kanaals meting)
Totaal (0-meting + 2 monitoring rondes)	~52000	~26000

Tijdens het project is ook vast gesteld dat de mogelijkheid bestaat om het monitoren grotendeels te automatiseren. Dit is binnen het project niet uitgewerkt, maar in principe is het daarmee mogelijk om gedurende een bepaalde periode heel erg hoog frequent te monitoren (bv. 1 meting per dag), voor ongeveer dezelfde kosten als 2 monitoringsronden. Een dergelijke meet frequentie kan meer inzicht verschaffen over de werking van de verschillende saneringstechnieken en de effecten van het uit en aan zetten van de gebruikte technieken. Bovendien kan daarmee de foutmarge van de ERT meting beter bepaald worden.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

7.1.1 Conclusies met betrekking tot Losser

Tijdens de 0-meting (juni 2006) is in de ERT meetvlakken in de achtertuin van de wasserij nabij de voormalige zinkput een voor DNAPL's verdachte zone van minstens 4 bij 1.5 m in kaart gebracht. De zone heeft een duidelijk hogere elektrische weerstand (150-300 Ohm-m) dan de natuurlijke ondergrond (50-150 Ohm-m). De zone loopt vanaf de grondwaterspiegel (~2 m-mv) tot maximaal 3.5 m-mv. De inrichting van de sanering (onder andere de stelling van onttrekkingfilters) is mede bepaald door de locatie van deze verdachte zone. De weerstand in de verdachte zone in de achtertuin is 150 tot 300 Ohm-m. Voor zandig sediment komt die overeen met een DNAPL porieverzadiging tussen de 35 en 60%.

Een tweede 0-meting (eind mei 2008), voor de sanering, heeft aangetoond dat de verdachte hoge weerstandszone in de achtertuin nabij de voormalige zinkput na 2 jaar vrijwel identiek is betreffende de positie, omvang en weerstandsgrootte. De zone met de hoogste concentratie aan puur product is dus in die twee jaar niet de diepte in gezakt. Tevens hebben de geïnstalleerde saneringssystemen geen significante invloed op de meetresultaten.

Uit de monitoringsronden is gebleken dat de verwachte snelle afname van de DNAPL in de bodem niet is opgetreden. Dit is tevens geverifieerd met de beschikbare conventionele meetdata (verwijderde vracht en watermonster analyses). De monitoringsronden hebben daarmee bijgedragen aan het verschaffen van inzicht in de effectiviteit van het saneringssysteem. Op basis van deze gegevens is men begin 2009 begonnen met het opnieuw instellen van de verschillende saneringssystemen.

7.1.2 Algemene conclusies

ERT werkt goed voor de opsporing van DNAPL's in veel voorkomende typen Nederlandse ondergrond (water verzadigd: zand, silt, klei, veen en licht grindig zand).

De inzet van 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 wordt bereikt.

Wanneer sprake is van een heterogene bodemopbouw kan ERT absoluut een meerwaarde hebben omdat de positie van de DNAPL dan lastig te voorspellen is. ERT heeft ook een grote meerwaarde op locaties waar DNAPL's zich relatief ongehinderd verticaal kunnen verspreiden. Op voorhand is duidelijk dat de uitvoering van een sanering op deze locaties erg duur is. DNAPL's kunnen op zulke locaties, tegen de verwachting in, namelijk relatief ondiep zitten op subtiele sedimentologische overgangen (bijvoorbeeld een dichtere pakking van het korrelskelet).

Het is relatief kosteneffectief om monitoring rondes uit te voeren omdat de kosten voor het maken en plaatsen van de meetkabels al zijn gemaakt en omdat de verwerkingsprocedure van de data al bepaald is. Gedurende dit project is vastgesteld dat er mogelijkheden bestaan om het monitoren te automatiseren. Hierdoor worden de kosten van de monitoren gereduceerd tot de logistieke kosten (plaatsen meetapparatuur en data transport). Naarmate er meer ervaring komt met het monitoren van effecten van verschillende saneringstechnieken bij verschillende bodemtypen zullen de meetronden ook beter gepland kunnen worden.

De monitoring met ERT kan een significante afname van DNAPL concentraties aantonen. De monitoring kan echter niet aantonen dat alle DNAPL's zijn verdwenen omdat wanneer het met DNAPL's verzadigde porievolume relatief laag is (minder dan 20 tot 30% bij zand) het elektrische weerstandscontrast tussen de verontreiniging en de natuurlijke ondergrond relatief klein is. Zie figuur Figuur 3-3.

7.1.3 Technische conclusies

Tijdens het project zijn twee technische verbeteringen met succes doorgevoerd.

1. Het gebruik van meetkabels in volkomen filters kan, in verband met een mogelijke versnelde verticale verspreiding van verontreiniging, bezwaarlijk zijn. Bovendien zijn de (traditionele) meetkabels die geschikt zijn voor peilbuizen met volkomen filters te duur (3 tot 5 kEURO per stuk) om ze in de grond te laten zitten. Binnen dit project is daarom een alternatieve methode ontwikkeld om de elektrodes in de grond te brengen. Hierbij is gebruik gemaakt een speciale sondering (CPT) waarbij een flexibele kunststof slang met elektrodes de grond in wordt gedrukt. Deze meetkabel is een stuk goedkoper (~700 euro) en kan daarom in de grond blijven zitten.
2. Het geo-elektrische meetapparaat is uitgebreid van één-kanaals naar vier-kanaals. Dit houdt in dat er in dezelfde tijd vier in plaats van één meting kan worden verricht. In de praktijk betekent dit een tijdswinst van ongeveer vier uur per ERT meetvlak. Volgens de oude meetmethode werd een vlak twee keer doorgemeten in ongeveer zes uur en met de nieuwe meetmethode wordt een vlak drie keer doorgemeten in iets minder dan twee uur. Een vlak wordt nu drie keer doorgemeten omdat dit zorgt voor een verbetering van de datakwaliteit.

De gebruikte meetkabels zijn robuust genoeg om minstens twee jaar in door DNAPL's vervuilde ondergrond te zitten zonder dat het meetvermogen negatief wordt beïnvloed door bijvoorbeeld corrosie van de RVS elektrodes of aantasting van de HDPE bescherming.

7.2 Aanbevelingen

Bij toekomstige 0-metingen is het aan te bevelen niet alle meetkabels in één keer te plaatsen, maar een deel van de kabels aan de hand van de resultaten van de eerste meting later bij te plaatsen. Hiermee wordt de kans vergroot dat de bronzone van de grootste verontreiniging in zijn geheel uitgekarteerd kan worden.

Een mogelijke kostenbesparing is te bereiken door te proberen de meetkabel direct na de 0-meting uit de grond te trekken en weer te hergebruiken op dezelfde locatie. Dit zal minder goed gaan op kleiige locaties met een grote kleef en wanneer de kabel relatief lang in de grond heeft gezeten. Bij het omhoog trekken van de kabel moet wel rekening worden gehouden met de mogelijk verdere verspreiding van verontreiniging.

8 Referenties

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

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

Goes, B.J.M., M. Lodewijks, S. Meekes en P. Verhaagen (2006). Demonstratie van Elektrische Weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's en het monitoren van een sanering. Symposiumgids, Bodem Breed, p. 73-74.

Goes, B.J.M., J.A.C. Meekes, P.A.A. Verhaagen, H. Booi en M. Stolzenburg, (2003). Elektrische weerstandstomografie voor het opsporen van DNAPL's. SKB-rapport SV-416.

Goes, B.J.M. and J.A.C. Meekes (2004). An effective electrode configuration to detect DNAPL pollution with Electrical Resistivity Tomography. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol.9, no.3, p. 13-27.

Goes, B.J.M., J.A.C. Meekes en P.A.A. Verhaagen (2003). Elektrische weerstandstomografie spoort zaklagen op. Bodem 13, no. 3, p. 109-111.

Goes, B., S. Meekes en P. Verhaagen (2007). Detecting DNAPL's with the use of geo-electrical measurements between boreholes. Abstracts of 4th European Conference on Oxidation and Reduction Technologies for in-situ treatment of soil and groundwater, p. 127-130.

Grontmij (2005). Saneringsonderzoek en -plan Gronausestraat 181 te Losser. Opdrachtgever: Provincie Overijssel, documentnummer 13/99060773/PAA.

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).

Westerhoff, R.S. (2004). Geofysisch onderzoek Losser: ondiepe kartering Bentheimer zandsteen. TNO-rapport: NITG 04-042-B0409.