

NOBIS 95-2-10  
KARAKTERISATIE VAN DNAPL-LOCATIES  
(DNAPLKAR)

Eindrapport

ir. K.R. Weytingh (The Three Engineers i.o.v. Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)  
ir. A.H. van de Velde (The Three Engineers i.o.v. Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)  
ir. M. van Zutphen (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO)  
drs. L. Vasak (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO)

december 2000

Gouda, CUR/NOBIS

### **Auteursrechten**

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Karakterisatie van DNAPL-locaties (DNAPLKAR) - Eindrapport", december 2000, CUR/NOBIS, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

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

### **Copyrights**

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Characterization of DNAPL sites (DNAPLKAR) - Final report", December 2000, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

### **Liability**

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

**Titel rapport**

Karakterisatie van DNAPL-locaties (DNAPL KAR)

**CUR/NOBIS rapportnummer**

95-2-10

Eindrapport

**Project rapportnummer**

95-2-10

---

**Auteur(s)**

ir. K.R. Weything  
ir. A.H. van de Velde  
ir. M. van Zutphen  
drs. L. Vasak

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 60  
**Bijlagen:** 4 op cd-rom

---

**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (drs. L. Vasak, 015-2697118)  
Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (ir. E. Oosterbaan, 036-5308411)  
Provincie Utrecht (ir. M. Hoogbergen, 030-2583616)  
Provincie Noord-Brabant (ir. A.A. van de Koppel, 073-6808187)  
Gemeente Tilburg (ing. C. Rupert, 013-5429252)  
Koninklijke Landmacht (ing. Th.J. Kramer, 070-3167061)  
Dienst Gebouwen, Werken en Terreinen/Directie West Nederland (ing. H. de Waal, 030-2366462)

---

**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Samenvatting**

Op een groot aantal locaties in Nederland zijn in het verleden gechlloreerde oplosmiddelen en andere *Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's)* in de bodem terechtgekomen. DNAPL's kunnen, vanwege hun hoge dichtheid, als een aparte vloeistoffase diep in de bodem doordringen. Hierbij blijft langs het verspreidingspad residuair product achter in de bodemmatrix. Op slechter doorlatende bodemlagen ontstaan zinklagen. DNAPL's lossen langzaam op in het langsstromende grondwater en kunnen dan ook zeer langdurig een verontreinigingsbron zijn voor het grondwater.

Het belangrijkste knelpunt voor een succesvolle sanering van een bodemverontreiniging met DNAPL's is de aanwezigheid van puur product in de ondergrond en het vaststellen van de positie van het product (de bronzone). Met de tot op heden gebruikte meet- en evaluatiemethoden kan de positie van de DNAPL's in de ondergrond niet in voldoende mate worden aangetoond.

Om tot een kosteneffectieve aanpak van een DNAPL-locatie te komen, wordt gewerkt vanuit een conceptueel model. Het conceptueel model dient als uitgangspunt voor elke onderzoeksfase en wordt aldoende getoetst en verder gedetailleerd. In het rapport wordt een overzicht gegeven van de technieken die hierbij kunnen worden toegepast (boortechnieken, sondeertechnieken, geofysische technieken en saneringstechnieken). Bij het bespreken van de technieken worden specifieke voor- en nadelen, toepassingsmogelijkheden, praktische tips voor de uitvoering en de betrouwbaarheid aangegeven.

Vaak zijn combinaties van technieken mogelijk en/of noodzakelijk voor de karakterisatie van bronzones. Op dat moment is er sprake van een methodiek. In totaal zijn 7 methodieken uitgewerkt en getoetst in de praktijk. De methodieken zijn in de volgende rubrieken gerangschikt:

1. het verzamelen van informatie uit reeds uitgevoerd onderzoek (globale kartering);
2. het in kaart brengen van de bodemopbouw (identificatie van geologische traps en verspreidingspaden);
3. het nader horizontaal en verticaal karteren van de bronzone.

Het toepassen van de kennis en methodieken in een praktijkgeval vraagt nog extra input. Zo speelt de fase waarin een project zich bevindt een rol en de saneringstechnieken die voor de oplossing van een probleem kunnen worden ingezet. Per projectfase is aangegeven welke van de karakterisatiemethodieken kunnen worden toegepast. Hierbij wordt een relatie gelegd met saneringstechnieken. De saneringstechnieken stellen namelijk eisen aan de nauwkeurigheid van het karteren van de bronzone en de bodemopbouw.

---

**Trefwoorden****Gecontroleerde termen:**

bodemsanering, bodemstructuur, chloorkoolwaterstoffen, monitoring, oplosmiddelen

**Vrije trefwoorden:**

chemische wasserij, metaalverwerkende industrie, Per, Tri, VOCl

---

**Titel project**

Karakterisatie van DNAPL-locaties (DNAPLKAR)

**Projectleiding**

TNO-NITG  
(drs. L. Vasak, 015-2697118)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

**Report title**

Characterization of DNAPL sites (DNAPLKAR)

**CUR/NOBIS report number**

95-2-10

Final report

**Project report number**

95-2-10

---

**Author(s)**

ir. K.R. Weything  
ir. A.H. van de Velde  
ir. M. van Zutphen  
drs. L. Vasak

**Number of pages****Report:** 60**Appendices:** 4 on cd-rom

---

**Executive organisation(s) (Consortium)**

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO (drs. L. Vasak, +31-15-2697118)  
Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (ir. E. Oosterbaan, +31-36-5308411)  
Province of Utrecht (ir. M. Hoogbergen, +31-30-2583616)  
Province of Noord-Brabant (ir. A.A. van der Koppel, +31-73-6808187)  
Municipality of Tilburg (ing. C. Rupert, +31-13-5429252)  
Ministry of Defence Royal Army (ing. Th.J. Kramer, +31-70-3167061)  
Dienst Gebouwen, Werken en Terreinen/Directie West Nederland (ing. H. de Waal, +31-30-2366462)

---

**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Abstract**

In the past, many sites in the Netherlands have become contaminated with chlorinated hydrocarbons and other *Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs)*. Because of their high density and limited solubility they can penetrate deep into the ground as a separate liquid phase. Residues of pure product are left behind in the soil matrix along the migration path, particularly as accumulations on less permeable layers. DNAPLs will slowly dissolve in groundwater passing through these source areas and they can be a source of groundwater pollution for many years.

The main problem for a successful remediation of DNAPL contaminated sites is the difficulty in finding the exact location of the pure phase deep in the subsurface and along the migration path (the source area). Detection and evaluation techniques used to date are inadequate to exactly outline the DNAPL source.

For a cost-effective approach to a DNAPL location a conceptual model is used. The conceptual model is the starting-point for each investigation phase and is tested and refined during each phase of the remediation process. The report gives an overview of the techniques that can be used during this process (drilling techniques, probe techniques, geophysical techniques and remediation techniques). Advantages and disadvantages, application options, reliability, as well as practical tips are discussed.

Often a combination of techniques is required to fully characterize a source area. A combination of techniques results in a methodology. In total 7 methodologies were developed and tested in field situations. They can be classified in 3 categories:

1. compilation of information from earlier investigations (global characterization);
2. characterization of soil structure (identification of geological traps and migration paths);
3. further horizontal and vertical delineation of the source area.

The practical application of the knowledge and methodologies does require some additional input. Important are the present project phase and the particular remediation techniques suitable for the problem. Suitable characterization methodologies are indicated for each project phase. This is done in relation to the remediation technique, as each technique has different requirements regarding the accuracy for the determination of the soil structure and the delineation of DNAPL source area.

---

**Keywords****Controlled terms:**

chlorinated hydrocarbons, monitoring, soil remediation,  
soil structure, solvents

**Uncontrolled terms:**

drycleaner, metal industry, PCE, TCE,  
VOX

---

**Project title**

Characterization of DNAPL sites (DNAPLKAR)

**Projectmanagement**

Netherlands Institute of Applied  
Geoscience TNO  
(drs. L. Vasak, +31-15-2697118)

---

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

## VOORWOORD

Voor u ligt de rapportage van het project DNAPLKAR. Het project behoort tot een van de eerste NOBIS-projecten. Veel mensen hebben er dan ook aan meegewerkt. Ondanks de lange looptijd van het onderzoek is het thema van DNAPLKAR nog steeds actueel. Sterker, het lijkt steeds actueler te worden. De jarenlange NOBIS-studies hebben aangetoond dat biologische sanering van CKW-pluimen in veel gevallen mogelijk is. Steeds duidelijker wordt echter ook dat hiervoor wel de kraan dicht moet en dat de pluim van een DNAPL-verontreiniging van de DNAPL-bron moet worden afgeschermd. Onderzoek richt zich nu op concepten om de vracht uit de bron te verwijderen, zodanig dat de afscherming niet per definitie eeuwigdurend hoeft te zijn. Het in kaart brengen van de bronzone is dus zeer actueel en dat is nou precies waar het in DNAPLKAR om draait.

De auteurs van dit rapport willen alle mensen die betrokken zijn geweest bij de uitvoering van dit onderzoeksproject bedanken voor hun bijdrage. In het bijzonder Hans Peter Broers van TNO die helemaal in het begin zo duidelijk heeft bijgedragen aan het onderzoeksprogramma. Daarnaast willen we de NOBIS-medewerkers bedanken voor hun geduld en vertrouwen in het project. Wij wensen u veel leesplezier.

december 2000

## INHOUD

		SAMENVATTING	viii
		SUMMARY	xii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Eindrapport	1
	1.2	Doelstelling van het project	2
	1.3	Uitvoering van het project	2
Hoofdstuk	2	ALGEMEEN GEDRAG VAN DNAPL'S	5
	2.1	Gedrag van chloorkoolwaterstoffen in de bodem	5
	2.2	Sanering van DNAPL-locaties	6
	2.3	DNAPL-concept	7
	2.3.1	Concentratiemetingen als basis voor de karakterisatie	7
	2.3.2	Stofeigenschappen en geohydrologische knelpunten	8
	2.3.3	Meetmethode	10
	2.4	Basisprincipe van de karakterisatie	11
	2.4.1	Opstellen van een conceptueel model	11
	2.4.2	Bodemopbouw	12
	2.4.3	Geohydrologie	13
	2.4.4	Verontreiniging	13
	2.4.5	Strategie	14
Hoofdstuk	3	GEREEDSCHAPSKIST: OVERZICHT VAN TECHNIEKEN	15
	3.1	Algemeen	15
	3.2	Boortechnieken	15
	3.2.1	Pulsboring	16
	3.2.2	Zuigboring	17
	3.2.3	Peilbuizen	18
	3.3	Sondeertechnieken	20
	3.3.1	Standaard elektrische sondeerconus	21
	3.3.2	Conesipper	22
	3.3.3	Slagfilter	24
	3.3.4	Minifilters	25
	3.4	Geofysische technieken	26
	3.4.1	Georadar	27
	3.4.2	Hoge resolutie seismiek (HRS)	28
	3.5	Saneringstechnieken	30
Hoofdstuk	4	METHODIEKEN: COMBINEREN VAN TECHNIEKEN	33
	4.1	Algemeen	33
	4.2	Informatie uit regulier nader onderzoek	33
	4.3	Karteren van een complexe bodemopbouw tot circa 30 m	36
	4.4	Karteren van een complexe bodemopbouw vanaf circa 30 m	38
	4.5	Verticale detaillering van de bron tot circa 30 m	40
	4.6	Verticale detaillering van de bron vanaf circa 30 m	41



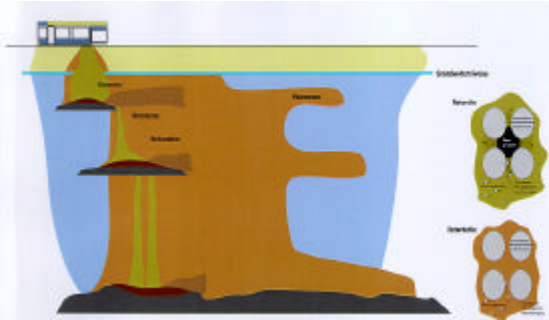
	4.7	Horizontale detaillering van de bron met matig detail (tot circa 30 m)	43
	4.8	Horizontale detaillering van de bron met hoog detail	44
Hoofdstuk	5	DNAPLKAR IN DE PRAKTIJK	47
	5.1	Inleiding	47
	5.2	Saneringstechnieken	47
	5.3	Projectfase	48
	5.3.1	Oriënterend en nader onderzoek	49
	5.3.2	Aanvullend onderzoek en saneringsonderzoek	49
	5.3.3	Dimensionering, saneringsplan en bestek	49
	5.3.4	Aanbieding en implementatie	50
	5.3.5	Exploitatie en evaluatie	51
	5.4	Toepassingsgebieden	51
Hoofdstuk	6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	53
		LITERATUUR	59

## SAMENVATTING

### Karakterisatie van DNAPL-locaties (DNAPLKAR)

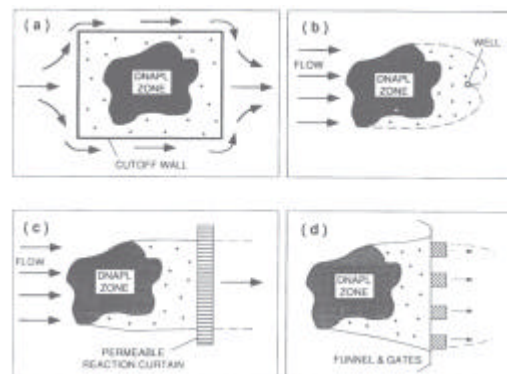
#### Probleemstelling

Op een groot aantal locaties in Nederland zijn in het verleden gechloreerde oplosmiddelen en andere *Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's)* in de bodem terechtgekomen. Vanwege de matige tot slechte oplosbaarheid in water en de hoge dichtheid kunnen deze stoffen als een aparte vloeistoffase diep in de bodem doordringen. Hierbij blijft langs het verspreidingspad residuair product achter in de bodemmatrix. Op slechter doorlatende bodemlagen ontstaan zinklagen. Het verspreidingspad wordt bepaald door geringe veranderingen in de doorlatendheid en de porositeit. Het voorkomen en de verspreiding van DNAPL's is dan ook grillig. Grondwater dat door de ondergrondse bronzone stroomt, wordt door het in oplossing gaan van verontreiniging uit het puur product gecontamineerd. De verontreinigingspluim die zich vormt vanuit een DNAPL-bronzone kan, afhankelijk van sorptieprocessen en natuurlijke afbraak, vele honderden meters lang worden. DNAPL's lossen langzaam op in het langsstromende grondwater en kunnen dan ook langdurig een verontreinigingsbron zijn voor het grondwater.



Wanneer een pluim zich slechts beperkt verspreidt en de gehalten in de pluim daarbij acceptabel blijven, is een volledig extensieve saneringsvariant (NA) een optie. In een dergelijke variant wordt feitelijk alleen gemonitord of de verspreiding en gehalten werkelijk laag blijven. In veel gevallen echter is de DNAPL doorgedrongen in watervoerende pakketten. In deze pakketten stroomt het water over het algemeen snel en is verspreiding onvermijdelijk. Hierbij is dan een meer intensieve aanpak noodzakelijk. Het concept van DNAPLKAR stelt dat deze intensievere aanpak zich allereerst op de bron moet richten. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om de pluim zoveel mogelijk (extensief) te verwijderen. Het doel van de bronaanpak is daarmee het voorkomen van een frustrerende werking op de sanering van de pluim. Dit kan op twee manieren: het verwijderen van de DNAPL, of het tegengaan van verspreiding. Door de grote diepte en/of de grillige vorm waarop het puur product zich in de bodem bevindt, is afgraving van de bron in veel gevallen niet mogelijk.

In de meeste gevallen zullen saneringstechnieken gericht zijn op het voorkomen van verspreiding. Dit betekent een eeuwigdurende ingreep. Ook deze saneringstechnieken stellen eisen. Een isolatievariant wordt uit kosten oogpunt liefst zo krap mogelijk rondom de bron geplaatst, maar bij een te krappe plaatsing loopt men het risico dat de bron niet volledig geïsoleerd is. Naast de diepte van de bron is een goede laterale kartering van de bron daarom essentieel. Van sommige varianten, zoals de geohydrologische variant, kan in de tijd het milieurendement geoptimaliseerd worden door een goede laterale en verticale kartering van de bron. Andere, zoals een reactieve barrière, maken gebruik van goedkope lang standhoudende processen en kennen relatief hoge implementatiekosten. Er is daarbij een minder nauwkeurige kartering nodig voor een resultaat met een bijzonder hoog milieurendement.



### *Knelpunt*

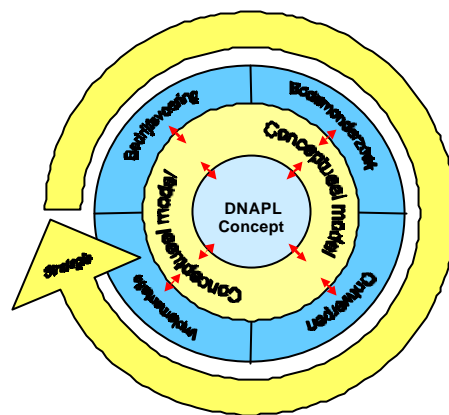
Het belangrijkste knelpunt voor een succesvolle sanering van een bodemverontreiniging met DNAPL's is de aanwezigheid van puur product in de ondergrond en het vaststellen van de positie van het product (de bronzone) dat grillig en op grote diepte in de bodem aanwezig kan zijn. Met de tot op heden gebruikte meet- en evaluatiemethoden kan de positie van de DNAPL's in de ondergrond niet in voldoende mate worden aangetoond.

### *Doelstelling van het project*

Het ontwikkelen van karakterisatiemethodieken voor DNAPL-locaties is gericht op het bepalen van mogelijke transportroutes van puur product en het vaststellen van de laterale en verticale omvang van de bronzone in de verzadigde zone.

### *Basisprincipe van de karakterisatie*

Om tot een kosteneffectieve aanpak, zowel wat betreft karakterisatie als sanering, van een DNAPL-locatie te komen, wordt gewerkt vanuit een conceptueel model. In het algemeen is alle opgedane kennis over de te onderzoeken locatie theoretisch. Uit alle theoretische kennis en de informatie over de locatie vormt zich een beeld tussen de oren van de adviseur: het conceptueel model van de locatie. Waar kan de bron zich bevinden en waar kan de pluim zich bevinden? Welke oplossingen zijn mogelijk, welke extra informatie is nodig om het conceptueel model compleet te maken voor een betrouwbare dimensionering van een dergelijke variant? De uitdaging is dit conceptueel model kostenbewust en doeltreffend aan te vullen. Het conceptueel model dient als uitgangspunt voor elke fase van het saneringsproces en wordt aldoende getoetst en verder gedetailleerd.



Voor de karakterisatie van de bronzone zijn meerdere lijnen voor te stellen, waarlangs het conceptueel model kan worden gevoed:

1. zoveel mogelijk informatie halen uit een (reeds uitgevoerd) regulier nader onderzoek;
2. in kaart brengen van de bodemopbouw ter identificatie van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen;
3. indirecte metingen in de pluim, waarbij verhoogde gehalten een indicatie kunnen zijn voor een stroomopwaarts gelegen bron;
4. evaluatie van saneringsresultaten; door gebruik te maken van tijd en te anticiperen op saneringsresultaten kan tijdens de sanering de bronzone worden gekarteerd.

### *Gereedschapskist: overzicht van technieken*

Welke parameters in een uit te voeren bodemonderzoek nader onderzocht moeten worden, in welke volgorde en met welke technieken is locatie/projectspecifiek. Deze aspecten zijn sterk afhankelijk van het opgestelde conceptueel model van de bodem en de verontreinigingssituatie en het uiteindelijke doel van het onderzoek. Wordt er net begonnen en is een scan van saneringsmogelijkheden gewenst, of is reeds een sanering gaande en is karakterisatie gewenst omdat de sanering stagneert.

Voor het beantwoorden van de vragen die nog niet met het conceptueel model beantwoord kunnen worden of ter verificatie van de juistheid van het conceptueel model kunnen verschillende technieken worden toegepast. In het rapport wordt een overzicht gegeven van de toepasbare technieken.

Elk van deze technieken heeft zijn specifieke voor- en nadelen en toepassingsmogelijkheden. Bij het bespreken van de technieken worden praktische tips voor de uitvoering aangegeven en wordt aandacht geschonken aan de betrouwbaarheid. De volgende technieken zijn onderzocht:

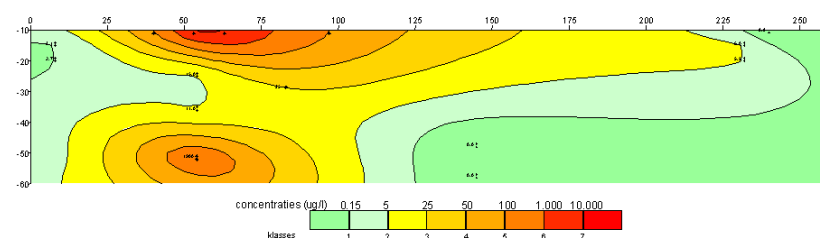
1. boortechnieken;
2. sondeertechnieken;
3. geofysische technieken;
4. saneringstechnieken.

### Methodieken

Vaak zijn combinaties van technieken mogelijk en/of noodzakelijk voor de karakterisatie van bronzones. Op het moment dat technieken worden gecombineerd is er sprake van een methodiek. Een methodiek wordt bepaald door de doelstelling in de vorm van een onderzoeksvraag, de wijze waarop de onderzoeksvraag wordt beantwoord en de technieken die daarbij worden gebruikt. De volgende methodieken zijn uitgewerkt en getoetst in de praktijk:

### Informatie uit regulier nader onderzoek

Het bepalen van de globale bodemopbouw, de stromingsrichting van het grondwater en de mate en omvang van de verontreiniging (horizontaal en verticaal). De te hanteren methodiek volgt in hoofdlijnen de werkwijze van een standaard nader bodemonderzoek: plaatsen van *boringen/peilbuizen/minifilters*.



### Karteren van een complexe bodemopbouw tot circa 30 m

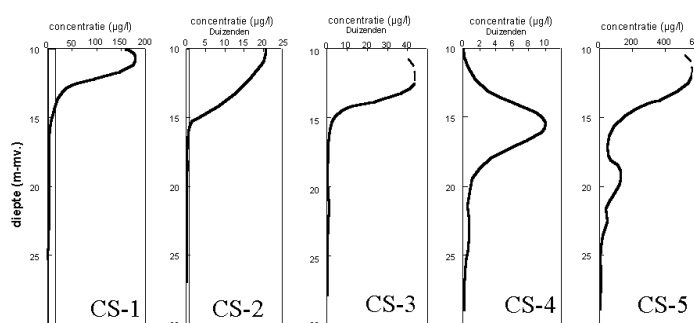
Het identificeren van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen door het combineren van *georadar* en *sonderingen*.

### Karteren van een complexe bodemopbouw vanaf circa 30 m

Het identificeren van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen door het combineren van *hoge resolutie seismiek (HRS)* en *boorgegevens*.

### Verticale detaillering van de bron tot circa 30 m

De bodem in verticale richting onderverdelen in bodemlagen met zinklagen, residuaire verzadiging, opgeloste verontreiniging en schone lagen. Op basis van *sondeergrafieken* wordt een bemonsteringsstrategie bepaald voor een *grondwatermonstersonde*.



### Verticale detaillering van de bron vanaf circa 30 m

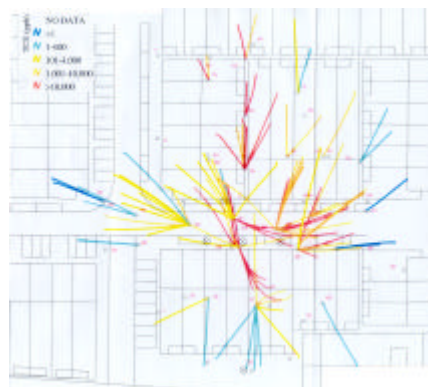
De bodem in verticale richting onderverdelen in bodemlagen met zinklagen, residuaire verzadiging, opgeloste verontreiniging en schone lagen. Door middel van *gedifferentieerd onttrekken*, een karakteriserende beheersvariant, wordt een gedetailleerd beeld verkregen van de bron over een grote diepte.

### **Horizontale detaillering van de bron met matig detail (tot circa 30 m)**

Horizontale inkadering van de bronzone met een redelijke betrouwbaarheid. Hierbij wordt gebruik gemaakt van *sonderingen*, *grondwatermonstersonde* en een *mobiele GC* om direct op basis van analyseresultaten de volgende monsterlocatie te kunnen bepalen.

### **Horizontale detaillering van de bron met hoog detail**

Horizontale inkadering van de bronzone met een hoge mate van betrouwbaarheid door middel van *dynamische monitoring*. Dit is een (tijdelijke) beheersmaatregel, waarbij systematisch een duidelijke horizontale scheiding wordt verkregen tussen de bronzone en de pluimzone.



### **DNAPLKAR in de praktijk**

Het toepassen van de kennis en methodieken in een praktijkgeval vraagt nog extra input. Zo speelt de fase waarin een project zich bevindt een rol en de saneringstechnieken die voor de oplossing van een probleem kunnen worden ingezet. Een project kent vele ontwikkelingsfasen en heeft in veel gevallen al een hele geschiedenis. Dit is vaak van grote invloed op het uitstippelen van de strategie. De ene methodiek past beter in de ene fase, de andere in een andere fase. Per projectfase is aangegeven welke van de karakterisatiemethodieken kunnen worden toegepast. Hierbij wordt een relatie gelegd met saneringstechnieken. De saneringstechnieken stellen namelijk eisen aan de nauwkeurigheid van het karteren van de bronzone en de bodemopbouw.

Met de technieken en methodieken, zoals uitgewerkt in dit project, is het mogelijk om bronzones (gedetailleerd) in kaart te brengen. Mede vanwege het feit dat er gebruik wordt gemaakt van indirecte metingen, blijft er echter een aanzienlijke onderzoeksinspanning (tijd en kosten) nodig.

### **Toekomstperspectief**

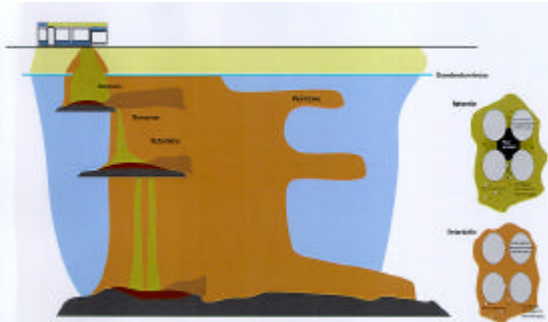
De methodieken, die in het rapport worden besproken, lijken nieuw en vooruitstrevend. Zo is alle begin. Wanneer de ontwikkelingen in beleid doorzetten, zal het verwijderen van de bron een belangrijke plaats gaan innemen in saneringsplannen. Dit zal een impuls geven aan onderzoek gericht op bronverwijderingstechnieken. In het kielzog hiervan zal ook het gedetailleerd karakteriseren van DNAPL-locaties belangrijker worden en vaker worden toegepast, hetgeen zal leiden tot kostenreducties, de ontwikkeling van nieuwe technieken en de opbouw van ervaring.

## SUMMARY

### Characterization of DNAPL sites (DNAPLKAR)

#### *Background to the problem*

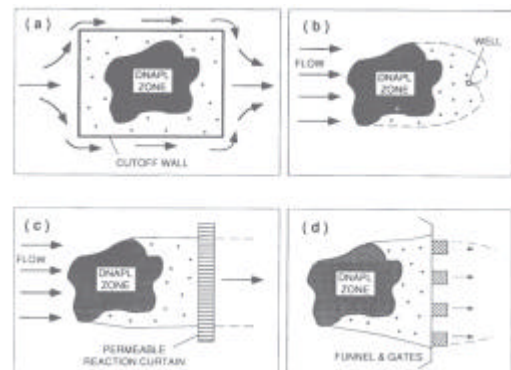
In the past, many sites in the Netherlands have become contaminated with *Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs)*. Because of their high density and limited solubility they can penetrate deep into the ground as a separate liquid phase. Even relatively minor soil permeability variations will affect the downward direction of the DNAPLs. This leads to rather tortuous migration paths and residual product accumulations (on less permeable layers) that are difficult to locate. Groundwater passing through these source areas will become contaminated with these DNAPLs, resulting in a downgradient plume that, depending on local dilution, sorption and natural degradation conditions, may be several hundred metres long. Because of the poor solubility DNAPLs can be a source of groundwater pollution for many years.



and natural degradation conditions, may be several hundred metres long. Because of the poor solubility DNAPLs can be a source of groundwater pollution for many years.

If local conditions are such that spreading of this plume is limited and contaminant concentrations remain acceptable, extensive 'remediation' is a viable option. This means that only monitoring will take place to make sure that the degree of spreading and the contaminant concentrations remain acceptable. However, in those (often occurring) instances, where DNAPLs have contaminated aquifers with relatively high flow rates a much more intensive approach will be required. The DNAPLKAR concept states that in such cases the focus of attention should be the source area. This creates an opportunity to attack the plume in a more extensive way, while preventing the frustrations that often result from such an approach. The source area can be dealt with in two ways: it can either be removed, or it can be contained so that spreading will be prevented. Because of the great penetration depths of the DNAPL and the difficulty in locating residual product accumulations along the migration paths, excavation is often not possible.

Hence containment methods are used in most situations, when dealing with DNAPLs. These are ever-lasting methods. If a cutoff wall (see fig. a) is used, the problem remains the same. In order to keep the remediation cost-effective a 'tight fit' of the wall around the source area is desirable. The problems with the exact delineation of the source area make this very difficult. In case of geohydrological isolation of the source (see fig. b) the cost-effectiveness can be optimized during the remediation process as data allowing more exact delineation become available in time. Other techniques, like permeable reactive barriers (see figs. c and d), with high implementation, but low maintenance costs (as the remediation process is driven by natural groundwater flow), require a less accurate delineation of the source areas to be cost-effective.



### *Main problem*

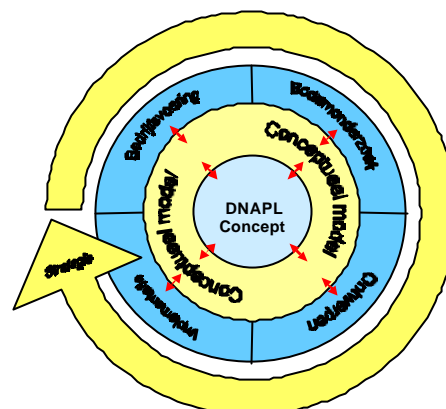
The main problem area for a successful remediation of DNAPL contaminated sites is the difficulty in finding the exact location of the pure phase, which is present on a great depth and along the migration path. Detection and evaluation techniques used to date are inadequate to exactly outline the DNAPL source.

### *Purpose of the project*

The purpose of this project is to develop characterization methods to identify migration paths of DNAPLs and to determine both lateral and vertical extent of the DNAPL source in the saturated zone.

### *Basic principle of the characterization method*

Starting-point for a cost-effective approach to a DNAPL location, with respect to both characterization and remediation, is a conceptual model. The initial conceptual model in an advisor's mind will be the result of purely theoretical information from the site and his own knowledge and experience. What are the possible locations for the DNAPL source and plume; which are viable remediation methods; and which additional information is required to complete this conceptual model so it can be used for a reliable 'dimensionation' of an extensive remediation option? The challenge is to add information to this initial conceptual model so it becomes fit for purpose and cost-effective. The conceptual model is the starting-point for each remediation phase and is tested and refined during each phase of the process.



Additional information can be added to the conceptual model in the following ways:

1. extract as much information as possible from (earlier performed) standardized additional soil investigations;
2. map out (a) soil structure to identify potential migration paths of pure product and (b) geological traps to find potential pure product accumulations;
3. perform indirect measurements in the plume; i.e. identify areas with increased dissolved levels of DNAPLs that could be indicative for DNAPL source areas further upstream;
4. evaluate results as remediation progresses; these results may enable you to predict the remainder of remediation process and to more accurately outline the source area.

### *Tool box: overview of techniques*

Which parameters should be examined in a soil investigation, in which order, and with which techniques, is specific to each location and project. They depend on the state of conceptual model and the remediation objectives: e.g. is this the initial phase and is a wide scan of remediation techniques required, or is characterization required because ongoing remediation has so far been unsuccessful.

To answer outstanding questions in the conceptual model, or to verify the model, a number of techniques can be used. The report gives an overview of these techniques. Each can be used in particular areas and all have particular advantages and disadvantages. Practical tips are given and reliability is discussed also.

The following techniques were investigated:

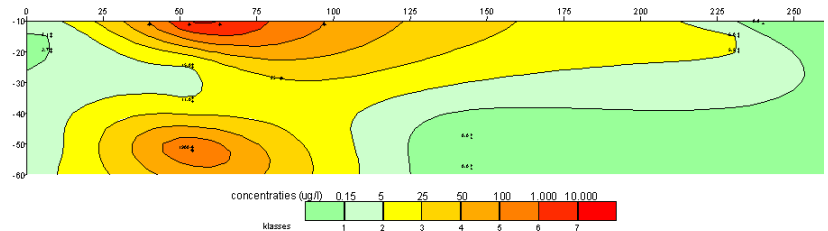
1. drilling techniques;
2. probe techniques;
3. geophysical techniques;
4. remediation techniques.

### Methodology

Often a combination of techniques is required to fully characterize a source area. A combination of techniques results in a methodology. A methodology is characterized by (a) an investigation goal, (b) the way in which this goal is reached and (c) the used techniques. Below are the methodologies that were developed and tested in field situations:

#### **Acquisition of basic information**

Determine soil structure, groundwater flow directions, degree and extent (both horizontal and vertical) of contamination. This methodology is largely as utilized in a standardized additional soil investigation: placement of *borings/wells/minifilters*.



#### **Characterization of complex soil structures down to approximately 30 m**

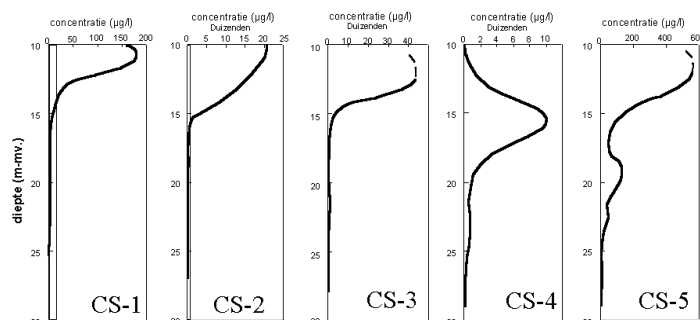
Identify migration paths of pure product and geological traps where pure product might accumulate by a combined use of *georadar* and *standard electrical CPT probes*.

#### **Characterization of complex soil structures below approximately 30 m**

Identify migration paths of pure product and geological traps where pure product might accumulate by a combined use of *the High Resolution Seismic (HRS) technique* and *data from borings*.

#### **Vertical refinement of source area down to approximately 30 m**

In vertical direction identify distinct soil layers with accumulations of pure product, layers with residual product, layers with dissolved product only, and uncontaminated layers. On the basis of *standard electrical CPT data* a sampling strategy is made for the *groundwater-sampling probe*.



#### **Vertical refinement of source area below approximately 30 m**

In vertical direction identify distinct soil layers with accumulations of pure product, layers with residual product, layers with dissolved product only, and uncontaminated layers. Through the technique of *'differentiated extraction'* (a pollution control option) detailed information on the source is obtained along a significant depth range.

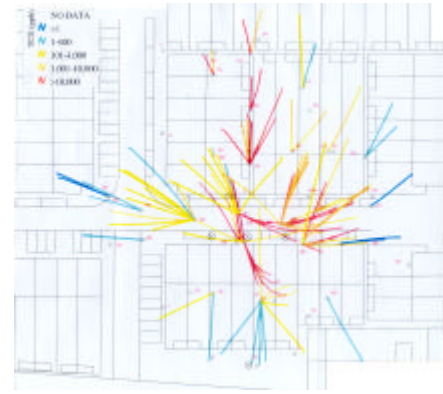
#### **Horizontal refinement of source with an intermediate level of detail**

Provides a horizontal outline of source area with fair reliability. *Standard electrical CPT probes*, the *groundwater-sampling probe* and a *mobile GC* are used to determine the next sampling location.



### ***Horizontal refinement of source with high level of detail***

Provides a horizontal outline of source area with high reliability using the technique of '*dynamic monitoring*'. This is a (temporary) control measure yielding a systematic, horizontal differentiation between source and plume area.



### ***DNAPLKAR in practical use***

The practical application of the knowledge and methodologies does require some additional input. Important are the present project phase and the particular remediation techniques suitable for the problem. A project goes through numerous phases of development, often with a long history. This is important while establishing the remediation strategy. Different phases may demand different methodologies. Suitable characterization methodologies are indicated for each project phase. This is done in relation to the remediation technique, as each technique has different requirements regarding the accuracy for the determination of the soil structure and the delineation of DNAPL source area.

The techniques and methodologies developed in this project allow a detailed delineation of the source areas. Nevertheless, a considerable research effort will still be required if only because results so far are based on indirect measurements.

### ***Future perspectives***

The methodologies that are discussed in the report seem very novel and progressive, as is often the case with new developments. If current developments in regulation continue, removal of the contamination source will become an important aspect of future remediation plans. This will be an impetus for more research aimed at removal of the source. In the wake of this the detailed characterization of DNAPL locations will gain in importance and hence be applied more frequently. This will lead to more experience, the development of new techniques and, last but not least, cost reductions.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Eindrapport

Dit eindrapport van het project DNAPLKAR is geschreven als een verhandeling over de stand der techniek betreffende de karakterisering van locaties verontreinigd met chloorkoolwaterstoffen (ook wel VOCl, CKW's of in vaktermen DNAPL's). Allereerst wordt in hoofdstuk 2 het gedrag van DNAPL's in de bodem beschreven. Er wordt ingegaan op de algemene aspecten, de knelpunten en de valkuilen, waarna wordt ingezoomd op de algemene kennis bij het karakteriseren van DNAPL-locaties. Vervolgens wordt ingegaan op het gebruik van dergelijke kennis voor het opstellen van een conceptueel model. Dit alles resulteert in algemene strategische overwegingen, die de basis vormen voor karakterisatiemethodieken.

Alvorens de methodieken verder uit te werken, wordt in hoofdstuk 3 de gereedschapskist gepresenteerd die daarbij kan worden gebruikt. Er wordt een overzicht gegeven van de veldwerktechnieken, waarbij nadrukkelijk aandacht wordt besteed aan de toepassingsmogelijkheden, praktische tips voor de uitvoering, betrouwbaarheid en kosten. Welke boortechnieken kunnen worden ingezet, welke sondeertechnieken en geofysische technieken zijn beschikbaar en wat kan ermee worden bepaald? Er wordt zelfs bekeken op welke wijze de resultaten van saneringstechnieken kunnen worden gebruikt voor karakterisatiedoeleinden.

In hoofdstuk 4 worden de technieken gecombineerd tot methodieken. Een methodiek wordt bepaald door de doelstelling in de vorm van een onderzoeksvraag, de wijze waarop de onderzoeksvraag wordt beantwoord en de technieken die daarbij worden gebruikt. In totaal zijn 7 methodieken uitgewerkt. De methodieken zijn als volgt gerangschikt:

1. methodieken die gericht zijn op het verzamelen van informatie uit reeds uitgevoerd onderzoek (globale kartering);
2. het in kaart brengen van de bodemopbouw (identificatie van geologische traps en verspreidingspaden van puur product);
3. het nader horizontaal en verticaal karteren van de bronzone.

De methodieken zijn getoetst in de praktijk en de ervaringen zijn beschreven.

Het toepassen van de kennis en methodieken in een praktijkgeval vraagt nog extra input. Zo speelt de fase waarin een project zich bevindt een rol en de saneringstechnieken die voor de oplossing van een probleem kunnen worden ingezet. In hoofdstuk 5 wordt allereerst ingegaan op saneringstechnieken, waarbij wordt ingezoomd op de eisen die dergelijke technieken aan het karteren van de bronzone en bodemopbouw stellen. Vervolgens wordt per projectfase getracht van de onderzochte methodieken aan te geven welke kunnen worden toegepast en waarom. Hierbij wordt een relatie gelegd met saneringstechnieken. Dit alles tezamen levert een tabel op waarin de kennis is gebundeld tot toepassingsgebieden voor de methodieken.

Hoofdstuk 6 bevat conclusies over de karakterisatie van DNAPL-locaties, met andere woorden wat ontbreekt er nog voor een goed gevulde gereedschapskist, en aanbevelingen voor onderzoek dat nodig is ter invulling daarvan.

## 1.2 Doelstelling van het project

De hoofddoelstelling van het project is het ontwikkelen van karakterisatiemethodieken voor DNAPL-locaties. De te ontwikkelen methodieken zijn gericht op:

1. het bepalen van mogelijke transportroutes van puur product;
2. het vaststellen van de laterale en verticale omvang van de bronzones.

Het onderzoek heeft zich gericht op de karakterisatie van DNAPL's in de verzadigde zone. De nadruk ligt daarbij op implementatie en verbetering van bestaande en experimentele technieken in en voor Nederlandse praktijksituaties.

## 1.3 Uitvoering van het project

Het project DNAPLKAR is uitgevoerd door een consortium bestaande uit de partijen zoals genoemd in tabel 1.

Tabel 1. Samenstelling van het consortium.

naam	positie
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO	kennisinstituut
Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.	adviesbureau
Provincie Utrecht	eindgebruiker
Provincie Noord-Brabant/Gemeente Tilburg	eindgebruiker
Koninklijke Landmacht, vertegenwoordigd door DGW&T/Directie West Nederland	eindgebruiker
Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering	opdrachtgever
The Three Engineers (in onderaanneming van Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)	adviesbureau

In overleg met de eindgebruikers (provincie Utrecht, provincie Noord-Brabant en Koninklijke Landmacht) zijn drie locaties geselecteerd die in aanmerking kwamen voor de implementatie van de methodieken. De projectactiviteiten, die zijn uitgevoerd op de drie testlocaties, zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2. Projectactiviteiten.

locatie	activiteit	periode
Austerlitz	geofysische metingen ter detectie van geologische <i>traps</i>	06/1997 - 09/1997
Austerlitz	concentratie metingen in de pluimzone met niet-permanente en permanente meettechnieken	01/1998 - 12/1998
Tilburg	dynamische monitoring voor horizontale kartering van de bronzones	06/1997 - 12/1998
Leusden	gedifferentieerde onttrekking voor verticale kartering van de bronzone	08/1998 - 12/1999

De resultaten van de activiteiten zijn beschreven in technische deelrapporten (zie tabel 3). Per locatie zijn de theoretische achtergronden en de uitvoeringsaspecten van de toegepaste methodieken gerelateerd aan de specifieke geohydrologische situatie en de saneringsproblematiek. De deelrapporten zijn als bijlage toegevoegd op de cd-rom, behorende bij deze rapportage.

Tabel 3. Deelrapportages van DNAPLKAR.

deelrapport	datum	rapportnummer
Geofysisch onderzoek te Austerlitz	september 1997	NITG 97-191-B
Gedifferentieerde onttrekking te Leusden: Voorbereiding en systeemontwerp	januari 1999	Oranjewoud 86553
Dynamische monitoring te Tilburg	juli 1999	Oranjewoud 98022
Afperking bronzone met concentratiemetingen in de pluim te Austerlitz	november 1999	TTE d9911
Implementatie en exploitatie gedifferentieerde onttrekking te Leusden	in voorbereiding	-



## ALGEMEEN GEDRAG VAN DNAPL'S

## 2.1 Gedrag van chloorkoolwaterstoffen in de bodem

Op een groot aantal locaties in Nederland zijn in het verleden gechloreerde oplosmiddelen (bekend onder de namen VOCI, CKW, Per of Tri, enz.) in de bodem terechtgekomen. Gechloreerde koolwaterstoffen zijn vloeistoffen die aan het maaiveld werden gebruikt voor reinigingsprocessen. In het verleden zijn deze vloeistoffen uit reinigingsbaden, door morsverliezen, lekkende vaten en dergelijke in de bodem terechtgekomen en hebben zich daarbij, vanwege de matig tot slechte oplosbaarheid in water, de hoge dichtheid en lage viscositeit, als 'puur product' tot diep in de bodem verspreid. In de bodemsanering worden dergelijke verontreinigingen DNAPL's genoemd naar een afkorting van de Amerikaanse term *Dense Non-Aqueous Phase Liquids* (DNAPL's). Het gedrag van DNAPL's in de bodem is uitgebreid onderzocht.

Wanneer een DNAPL in de bodem zakt, blijft langs het verspreidingspad residuair product achter in de bodematrix, dit is pure DNAPL vastgehouden door capillaire krachten. Op slechter doorlatende bodemlagen ontstaan zinklagen (zie fig. 1). Het verspreidingspad wordt bepaald door geringe veranderingen in de doorlatendheid en de porositeit. Het voorkomen en de verspreiding van DNAPL's is dan ook grillig. De zone, waar zich puur product bevindt, wordt bronzone of retentiezone genoemd.

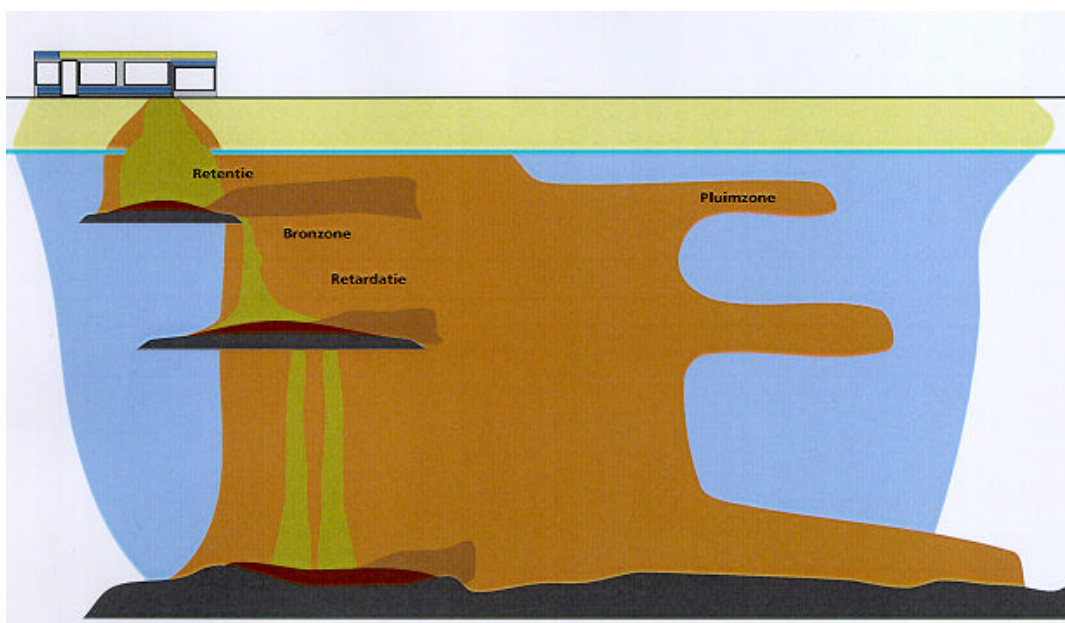


Fig. 1. DNAPL-bronzone met pluim.

Grondwater, dat door de ondergrondse bronzone stroomt, wordt door het in oplossing gaan van verontreiniging uit het puur product gecontamineerd. Dit proces kan decennia lang duren. De verontreinigingspluim, ook retardatiezone genoemd, die zich vormt vanuit een DNAPL-bronzone kan, afhankelijk van sorptieprocessen en natuurlijke afbraak, vele honderden meters lang worden. Als gevolg van de grillige verspreiding van puur product in de ondergrond, leidt het in oplossing gaan van DNAPL's vanuit het puur product tot een even zo grillig concentratieverloop van de opgeloste DNAPL's in het grondwater.

DNAPL's bestaan vaak uit een mengsel van stoffen, bijvoorbeeld 80 % Per en 20 % Tri. De verhoudingen tussen de opgeloste gehalten van deze stoffen worden in de buurt van de bronzone bepaald door het mengselgedrag. Bestaat de DNAPL voor 100 % uit Per dan kan theoretisch rondom de pure vloeistof in de bron een concentratie Per in het grondwater worden gemeten van 150 mg/l (maximale oplosbaarheid van Per). Bestaat het puur product voor 50 % uit Per en voor 50 % uit Tri dan zal in het water rondom de pure vloeistof een maximale concentratie Per in het grondwater kunnen worden gemeten van 75 mg/l en 550 mg/l Tri (50 % van de maximale oplosbaarheid van Tri  $1.100 \text{ mg/l} = 550 \text{ mg/l}$ ). Door verdunning worden in de praktijk gehalten gemeten die tot een factor tien lager liggen. In de pluim veranderen deze gehalten door een nog sterkere verdunning (factor 100 tot 1000) en verandert ook de verhouding tussen de stoffen door sorptie aan organisch materiaal en door afbraak. Met name afbraak is duidelijk herkenbaar, omdat er afbraakproducten, zoals bijvoorbeeld Cis en VC, bijkomen en Per en Tri verdwijnen.

## 2.2 Sanering van DNAPL-locaties

DNAPL's lossen langzaam op in het langsstromende grondwater en kunnen dan ook langdurig een verontreinigingsbron zijn voor het grondwater. De praktijk heeft uitgewezen dat saneringsstrategieën, die gericht zijn op het verwijderen van de in het grondwater opgeloste DNAPL (pluim)<sup>1</sup> en niet op het wegnemen of isoleren van de bron (restverzadiging, zinklagen), het beoogde resultaat niet binnen de gestelde termijn hebben bereikt. Sanering van de pluim is in theorie in een aanvaardbaar tijdsbestek mogelijk. Door de continue nalevering vanuit de bronzone wordt het effect van een eventuele sanering echter weer tenietgedaan ('dweilen met de kraan open'). Om de sanering van de pluim mogelijk te maken, moet dit proces worden gestopt ('de kraan moet dicht'). Hiertoe moet een scheiding worden gemaakt tussen de bronzone en de pluim, waarna deze separaat kunnen worden behandeld. De pluimzone kan na de scheiding op verschillende manieren worden aangepakt. Dit kan bijvoorbeeld door gebruik te maken van de natuurlijke biologische anaërobe of aërobe afbraakmogelijkheden van de verontreiniging, door gebruik te maken van de mogelijke chemische reductie van de verontreiniging en door effectieve extractie van de pluim met water of lucht. Bij elke toepassing of combinatie van toepassingen is het gebruik maken van, maar ook rekening houden met, (on)mogelijkheden op de locatie van groot belang. Een gescheiden aanpak van de bron en de pluim wordt dan ook als een eerste vereiste van een kosteneffectieve DNAPL-sanering gezien.

Door grote diepte en/of de grillige vorm waarop het puur product zich in de bodem bevindt, is afgraving van de bron in veel gevallen niet mogelijk. Ook met bestaande *in situ* methodieken is verwijdering van de bron nauwelijks mogelijk: het puur product blijkt in praktijk niet met het doorspoelen van het watervoerende pakket te verwijderen. Tevens is het niet mogelijk de bron op natuurlijke wijze te verwijderen. Als de hoge concentraties gechlloreerde koolwaterstoffen (CKW) in het grondwater in de bronzone niet giftig zijn voor bacteriën, waardoor biodegradatie niet kan optreden, is de aanwezige vracht te groot voor een dergelijke aanpak.

De aanpak van de bronzone bestaat voornamelijk uit het op een slimme wijze beheersen of isoleren. Ook hierbij is de interactie met de locatie van doorslaggevend belang. In het algemeen staan hiertoe de volgende hoofdtechnieken ter beschikking (zie fig. 2):

- a. civieltechnische isolatie;
- b. geohydrologische isolatie;
- c. reactief scherm;
- d. combinaties.

---

<sup>1</sup> Hierbij valt te denken aan technieken als NA en pump & treat.

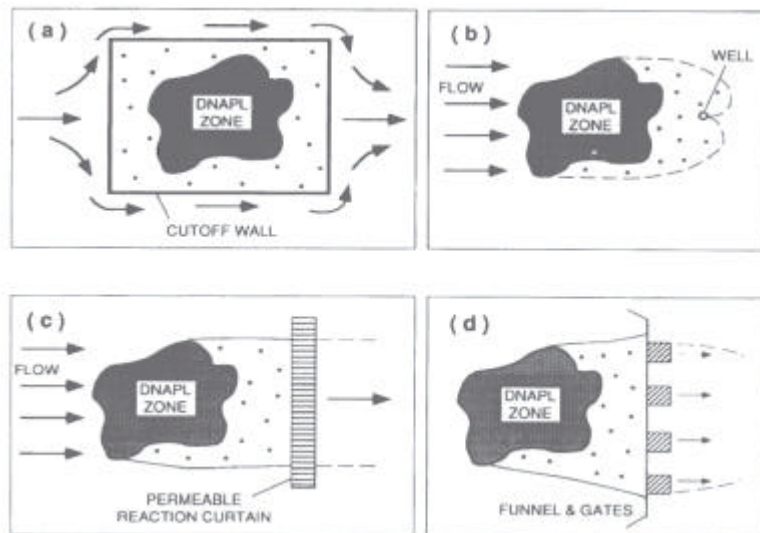


Fig. 2. Isolatie- en beheersvarianten voor de bronzone.

Voor elk van de technieken is het van belang, voor een effectieve inzet, om de positie van de ondergrondse bron te kennen. Natuurlijk wordt er hard gewerkt aan nieuwe 'vrachtverwijderende' technieken. Voorbeelden zijn stoomstrippen en het toepassen van surfactants. Voor deze technieken is de karakterisering van de bronzone nog belangrijker en daarbij zullen dergelijke technieken hogere eisen stellen aan de kennis over bodemopbouw.

Het belangrijkste knelpunt voor een succesvolle sanering van een bodemverontreiniging met DNAPL's is de aanwezigheid van puur product in de ondergrond en het vaststellen van de positie van het product (de bronzone) dat grillig en op grote diepte in de bodem aanwezig kan zijn. Met de tot op heden gebruikte meet- en evaluatiemethoden kan de positie van de DNAPL's in de ondergrond niet in voldoende mate worden aangetoond.

## 2.3 DNAPL-concept

### 2.3.1 Concentratietingen als basis voor de karakterisatie

Het in oplossing gaan van DNAPL's vanuit het puur product leidt tot een grillig concentratieverloop van de opgeloste DNAPL's in het grondwater. De aanwezigheid van poelen van puur product in de ondergrond kan worden gecorreleerd aan de concentraties opgeloste stof in het grondwater dat met het puur product in contact is geweest.

Uitgaande van een horizontale grondwaterstroming is het dan mogelijk om de aanwezigheid van puur product in de ondergrond (op geologische traps) aan te tonen door het meten van de concentraties van opgeloste DNAPL's in het grondwater stroomafwaarts van het puur product. Hoge concentraties zijn een indicatie voor het stroomopwaarts aanwezig zijn van puur product (zinklaag). Voor het opsporen van de hoge concentraties is het noodzakelijk met hoge verticale resolutie te meten (zie fig. 3).

De metingen moeten dáár worden uitgevoerd waar naar verwachting geen puur product in de ondergrond aanwezig is. Immers wanneer tijdens een meting een slecht doorlatende laag, waarop zich een zinklaag bevindt, wordt doorboord, wordt de situatie verslechterd. De meting heeft een doorbraak gecreëerd in de slecht doorlatende laag en biedt de DNAPL de kans dieper in de bodem te penetreren.



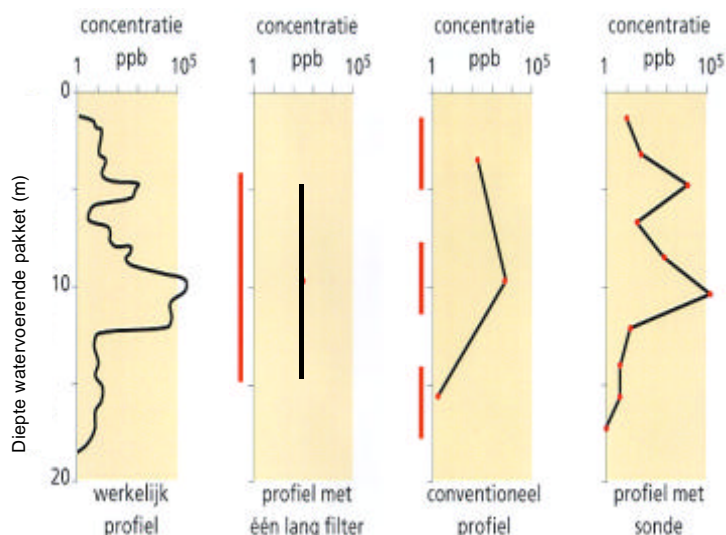


Fig. 3. Verticale concentratieprofielen [naar Waterloo Centre for Groundwater Research, 1994].

De hoogte van de concentratie DNAPL-componenten opgelost in grondwater kan, in combinatie met informatie over de herkomst van het bemonsterde grondwater, inzicht verschaffen in de horizontale en verticale verspreiding van het product. Een knelpunt bij deze aanpak is de indirectheid van deze methodiek. Centraal bij deze methodiek staat dan ook de vraag bij welk concentratieniveau in het grondwater er sprake is van de aanwezigheid van DNAPL stroomopwaarts van de meting. Het indirect identificeren van de bronzone door concentratiemetingen in de pluim kent enkele knelpunten. Deze zijn gerelateerd aan de lokale geohydrologie en stofeigenschappen, de wijze van meten en fouten in de uitvoering van metingen.

### 2.3.2 Stofeigenschappen en geohydrologische knelpunten

#### Knelpunt 1

In de adviespraktijk wordt gesteld dat concentraties in het grondwater boven de 10 % van de verzadigingsconcentratie een directe aanwijzing geven op het voorkomen van DNAPL-zinklagen in de directe omgeving van het filter. Deze waarde is gebaseerd op een onderzoek van Pankow en Cherry [1996]. In tabel 4 zijn de oplosbaarheden van een aantal chloorkoolwaterstoffen opgenomen.

Tabel 4. Oplosbaarheden van CKW's.

chloorkoolwaterstof	oplosbaarheid (mg/l)
tetrachlooretheen	150
trichlooretheen	1.100
1,1-dichlooretheen	3.350
cis-1,2-dichlooretheen	3.500
trans-1,2-dichlooretheen	6.300
1,1,2,2-tetrachloorethaan	2.900
1,1,2-trichloorethaan	4.400
1,1,1-trichloorethaan	1.300
1,2-dichloorethaan	8.500
1,1-dichloorethaan	5.100
trichloormethaan	8.000
dichloormethaan	20.000

In het algemeen nemen de concentraties in de pluimzone af naarmate de afstand (horizontaal/verticaal) tot de bronzone toeneemt. De grillige vorm van de bronzones heeft tot gevolg dat

de grondwaterverontreiniging benedenstrooms van de DNAPL-bronzones uit verschillende pluimen kan bestaan, die slechts enkele meters breed en enkele decimeters hoog maar wel zeer lang kunnen zijn.

Pankow en Cherry [1996] hebben aangetoond dat de concentraties stroomafwaarts door menging met schoon grondwater kunnen verminderen tot 10 % van de oplosbaarheid (zie fig. 4).

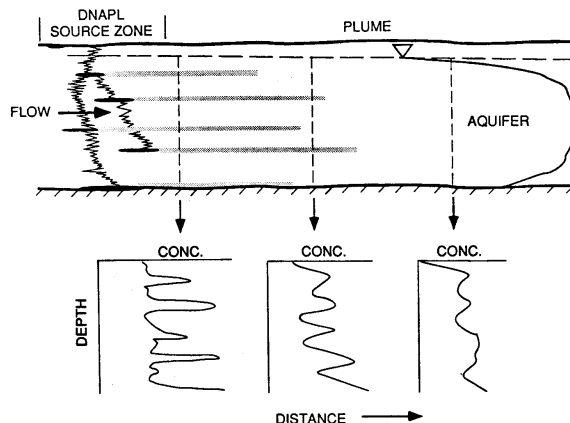


Fig. 4. Invloed van menging op de concentratieverdeling [Pankow en Cherry, 1996].

Anderson et al. [1992] hebben echter aangetoond dat naar gelang de verticale positie van het peilfilter ten opzichte van de zinklaag en de grondwatersnelheid, concentraties lager dan 1% van de oplosbaarheid een aanwijzing kunnen zijn voor het product.

#### *Knelpunt 2*

Gemeten concentraties boven de 10 % van de verzadigingsconcentratie geven geen duidelijkheid over de afstand van de zinklaag ten opzichte van het meetpunt. Niet valt uit te sluiten dat bij een dergelijke concentratie reeds sprake is van een filter geplaatst in een DNAPL-zinklaag. Omdat de meting naar verwachting net boven een slechter doorlatende laag is uitgevoerd, kan de afstand ook tientallen meters bedragen. Het grondwater vlak boven een dergelijke laag stroomt horizontaal en wordt amper verdund door omringend minder verontreinigd grondwater. Lange tijd zal in een dergelijke stroombaan de concentratie hoog blijven.

#### *Knelpunt 3*

Een aanvullend probleem is het onderliggende mengselgedrag. Indien de DNAPL niet uit slechts één product bestaat, bijvoorbeeld pure Per, maar uit een mengsel (bijvoorbeeld 60 % Per, 30 % Tri en 10 % Cis), zal de verontreiniging in het grondwater ook slechts een percentage zijn van de maximale oplosbaarheid (in het voorbeeld voor Per  $0,6 \cdot 150 \text{ mg/l}$ ). Ook lagere waarden kunnen duiden op de aanwezigheid van puur product.

#### *Knelpunt 4*

Om de zaak gecompliceerder te maken, komen de begrippen dispersie en diffusie hier ook nog om de hoek. Dispersie is de geohydrologische vertaling van het verticaal en lateraal uitwaaiëren van de verontreiniging. Het moet echter worden gezien als een geohydrologische knop, waarbij de kwalitatieve data van stoftransport kunnen worden ingebouwd in een kwantitatief grondwatermodel. Deze data zijn vaak afkomstig uit lange filters en zijn dus gemiddelden waarden (zie fig. 4).

### 2.3.3 Meetmethode

#### Knelpunt 1

Een probleem bij de interpretatie van concentratiemetingen in de pluim is de filterlengte. Het verticale concentratieprofiel stroomafwaarts van de bronzone kan naar verwachting pieken vertonen over trajecten van enkele decimeters. Dit zijn de bewuste pieken waar we naar zoeken. Lange filters kunnen tot vervaging leiden van deze pieken. Figuur 5 laat het effect zien dat de lengte van het filter heeft op de gemeten concentratie. Behalve een verlaging van de gemeten concentratie heeft een lang filter ook tot gevolg dat de verticale verdeling van de concentratie niet is te bepalen. Zo is het bemonsteren van grondwater in de pluimzone met kleine verticale bemonsteringstrajectjes vanuit verschillende perspectieven interessant. Permanente meetpunten zijn met name interessant voor het signaleren van de aanwezigheid van verontreiniging en de verandering hierin in de tijd. De waarde van de meting is daarmee relatief.

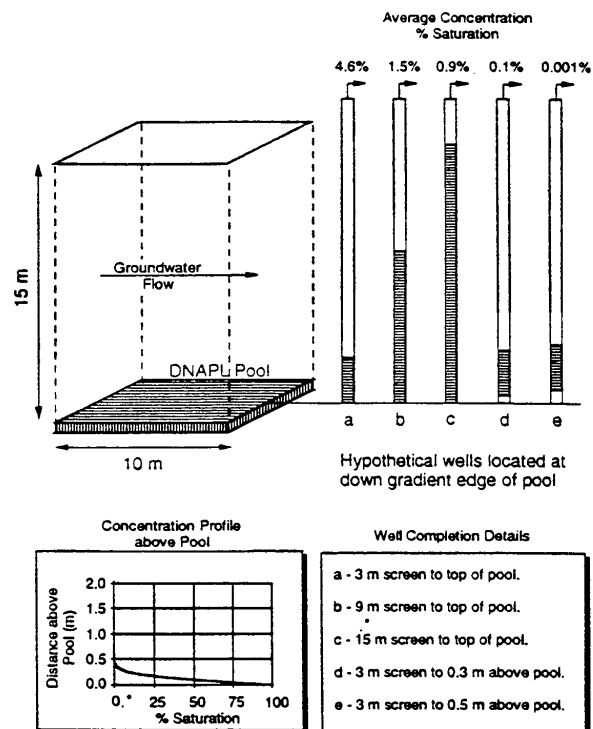


Fig. 5. Concentraties in 5 hypothetische meetpunten even benedenstrooms van een DNAPL-zinklaag [Johnson en Pankow, 1992].

#### Knelpunt 2

Naast de lengte van het filter is ook de plaats ten opzichte van de pluim belangrijk voor de gemeten concentraties. Dit is geïllustreerd in figuur 5. Figuur 5 geeft aan dat in een 'verkeerd' geplaatst filter concentraties worden gemeten die zeer veel lager zijn dan wanneer het filter 'juist' was geplaatst.

#### Knelpunt 3

Bij de uitvoering van permanente metingen bestaat het gevaar van doorboring van slecht doorlatende lagen. Bij het doorboren van een slecht doorlatende laag in de bronzone kan puur product naar de diepte worden verspreid. Bij metingen in diepere lagen wordt dan ten onrechte verontreiniging gemeten. Het is dan onduidelijk of deze verontreiniging er oorspronkelijk ook was.

#### Knelpunt 4

Ook het toegepaste materiaal bij een permanente meting is van belang. Ten gevolge van permeatie van verontreiniging door de stijgbuis en lekkage bij aansluitingen tussen stijgbuizen kan opgeloste verontreiniging uit een bovenliggende sterk verontreinigde laag in de peilbuis komen, waardoor het lijkt alsof er op grotere diepte verontreiniging aanwezig is. Het merendeel van de geïntroduceerde fouten kan worden voorkomen door een zorgvuldige uitvoering van de permanente meting.

## 2.4 Basisprincipe van de karakterisatie

### 2.4.1 Opstellen van een conceptueel model

Het karakteriseren van locaties is mensenwerk. Mensen worden beïnvloed door eigen kennis, ervaring en omgevingsfactoren. Deze factoren bepalen de strategie, waarmee de karakterisatie wordt aangepakt. In figuur 6 is getracht dit uit te beelden.

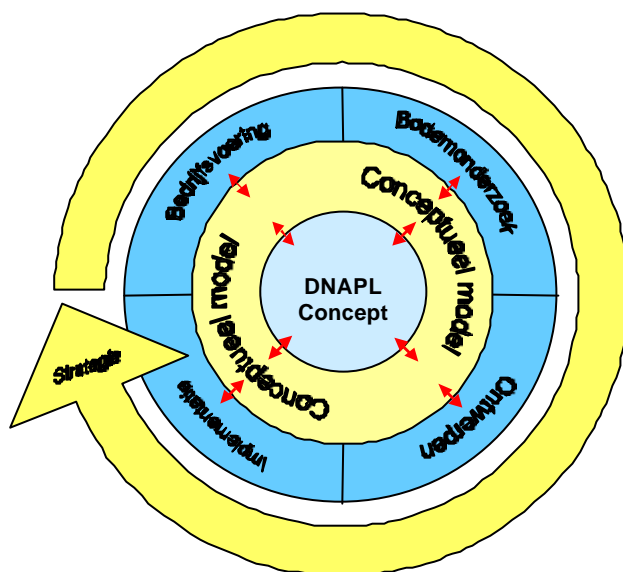


Fig. 6. Karakterisatie van DNAPL-locaties.

De algemene kennis en ervaring van de 'karakterisator' met de processen wordt aangeduid als een DNAPL-concept. Wanneer deze kennis wordt gecombineerd met informatie over de te karakteriseren locatie, ontstaat een beeld tussen de oren van de 'karakterisator' dat wordt aangeduid als conceptueel model. Met dit beeld tussen de oren worden de mogelijkheden gescand om het beeld te verfijnen. Hierbij is het van belang in welke fase een project zich bevindt om de doelstelling van de karakterisatie te bepalen. Wordt er net begonnen en is een scan van saneringsmogelijkheden gewenst, of is reeds een sanering gaande en is karakterisatie gewenst omdat de sanering stagneert. Zoals gezegd, maar nu vertaald vanuit het plaatje, het DNAPL-concept, het conceptueel model en de projecteisen bepalen de strategie.

Om tot een kosteneffectieve aanpak, zowel wat betreft karakterisatie als sanering, van een DNAPL-locatie te komen, wordt gewerkt vanuit een conceptueel model. In het algemeen is alle opgedane kennis over de te onderzoeken locatie theoretisch.

Uit alle theoretische kennis en de informatie over de locatie vormt zich een beeld tussen de oren van de adviseur: het conceptueel model van de locatie. Waar kan de bron zich bevinden en waar kan de pluim zich bevinden? Welke oplossingen zijn mogelijk, welke extra informatie is nodig om het conceptueel model compleet te maken voor een betrouwbare dimensionering van een dergelijke variant? De uitdaging is dit conceptueel model kostenbewust en doeltreffend aan te vullen. In figuur 7 zijn een aantal voorbeelden van ruwe conceptuele modellen weergegeven.

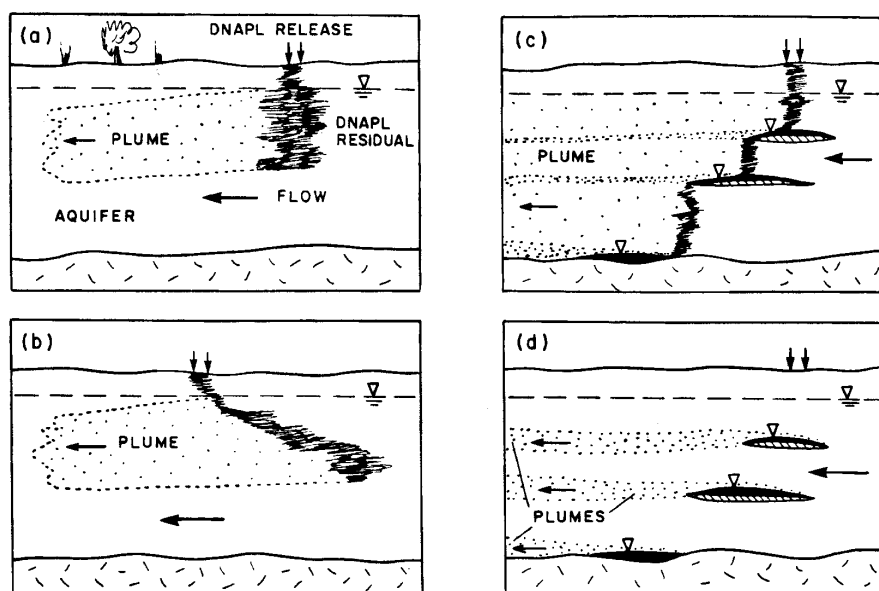


Fig. 7. Voorbeelden van conceptuele modellen [Pankow en Cherry, 1996].

Het conceptueel model dient als uitgangspunt voor elke fase van het saneringsproces en wordt aldoende getoetst en verder gedetailleerd. Het belangrijkste onderdeel van het conceptueel model betreft de inschatting van de positie en de omvang van de zone van puur product. Er moet dus een beeld worden gevormd hoe de DNAPL zich in de bodem heeft verspreid.

Volgens het DNAPL-concept is voor de verspreiding van DNAPL's met name informatie over de volgende aspecten van belang:

- Bodemopbouw: welke traps kunnen een zinklaag opleveren?
- Geohydrologie: waar komt het verontreinigde grondwater vandaan?
- Interpretatie van de verontreiniging: onder welke omstandigheden is de verontreiniging geconstateerd en hoe is deze ontstaan?
- Strategie: welke technieken en methodieken staan ter beschikking om een beter beeld van de bronzone te verkrijgen?

#### 2.4.2 Bodemopbouw

Het verspreidingspad van DNAPL's wordt beïnvloed door de bodemopbouw. De verspreiding vindt plaats door preferente banen in het bodemprofiel, bijvoorbeeld over minder doorlatende bodemlagen. Van belang voor het verspreidingsgedrag zijn derhalve de diepteligging en scheefstelling van overgangen in het bodemprofiel van goed naar minder doorlatende bodemlagen of van minder naar sterker gecompacteerd bodemlagen.

Uit historische gegevens, uitgevoerde werkzaamheden op de locatie (bijvoorbeeld boringen of sonderingen die zijn geplaatst in verband met bouwwerkzaamheden) en in de nabije omgeving, geologische kaarten enzovoorts, moet een goed beeld worden verkregen van de bodemopbouw.

Van de ondergrond moet zo een goed model worden gemaakt, waarin de verschillende bodemlagen (en eventuele hellingshoeken) en lenzen zijn aangegeven: de inventarisatie van de DNAPL-*traps*. Deze traps zijn, zoals eerder is beschreven, voornamelijk slechter doorlatende bodemlagen en lenzen van klei, veen, leem of fijn zand. Het kan in bepaalde gevallen nodig zijn om aanvullende metingen uit te voeren. Indien nodig, moeten geofysische metingen of aanvullende sonderingen worden uitgevoerd.

#### 2.4.3 *Geohydrologie*

Voor de karakterisatie van DNAPL-bronzones is het leggen van het verband tussen gemeten concentraties en de herkomst van het bemonsterde grondwater van essentieel belang. Het vaststellen van de stromingsrichting vormt daarmee een belangrijk onderdeel bij de interpretatie van de te meten concentraties. Enerzijds om een voorspelling te kunnen doen omtrent de herkomst van het verontreinigde water (de bron) en anderzijds omdat bij het plaatsen van een meetpunt moet worden voorkomen dat door de bronzone heen wordt geboord. Hiervoor zal de meetlocatie op zekere afstand van de vermoedelijke bronzone moeten worden gekozen. In principe geldt dat hoe groter de afstand, hoe meer zekerheid noodzakelijk is ten aanzien van de stromingsrichting. Bij een te grote onzekerheid zijn meerdere meetlocaties noodzakelijk. Inzicht in de variatie van de doorlatendheid is van belang voor het vaststellen van de afstand tussen de benedenstreams van de bronzone te plaatsen bemonstering en de bronlocatie zelf.

Bij een homogene en isotrope bodem is de grondwaterstroming relatief eenvoudig in te schatten op basis van een regionale indeling van watervoerende pakketten en scheidende lagen (Grondwaterkaart van Nederland).

Bij heterogene bodems, anisotropie en eventuele onttrekkingen in de omgeving is de grondwaterstroming minder eenvoudig a priori te bepalen. Een grondwatermodel kan hiervoor een noodzakelijk hulpmiddel zijn.

Voor het opzetten van een grondwatermodel is informatie over de *lokale* bodemopbouw en drijvende krachten van grondwaterstroming, zoals grondwateronttrekkingen, al dan niet natuurlijke afwatering en grondwateraanvulling vereist. Al deze factoren beïnvloeden de stromingsrichting en stroomsnelheid van het grondwater in het interessegebied. Voor het kalibreren van de geohydrologische parameters van het grondwatermodel is een reeks grondwaterstandmetingen in ruimte en tijd noodzakelijk.

#### 2.4.4 *Verontreiniging*

Een eerste inventarisatie van het type verontreiniging en de potentiële verontreinigingsbronnen aan het oppervlak dient uitgevoerd te worden op basis van historische gegevens, informatie van de opdrachtgever of een inspectie van de locatie. Belangrijke vragen bij de inventarisatie zijn:

- Wat was de samenstelling van het gebruikte product (mengsel)?
- Wat zijn de gebruikte hoeveelheden?
- Op welke locaties zijn de desbetreffende stoffen gebruikt?
- Zijn er riool- en afvoerleidingtracés, bezinkputten of afvoerputjes?
- Hoe is het puur product in de bodem terechtgekomen?

De bepaling van mogelijke primaire bronnen (daar waar DNAPL's de bodem zijn ingegaan: de lozingen aan het oppervlak, kelders en putten) geeft in combinatie met de bodemopbouw een

goede indicatie van de mogelijke te verwachten verspreidingspaden en zones waar DNAPL's kunnen accumuleren.

Een eerste controle hierop kan worden uitgevoerd door de combinatie van de aanwezige concentratiemetingen met grondwaterstroombanen. Van belang is dan de wijze waarop de concentratiemetingen zijn uitgevoerd (lange of korte filters, positie van het filter ten opzichte van slecht doorlatende lagen, enz.).

#### 2.4.5 *Strategie*

Voor de karakterisatie van de bronzone zijn meerdere lijnen voor te stellen, waarlangs het conceptueel model kan worden gevoed:

1. zoveel mogelijk informatie halen uit reeds uitgevoerd onderzoek;
2. het bepalen van traps in de ondergrond waarop de DNAPL kan blijven liggen;
3. indirecte metingen in de pluim, waarbij een verhoogde concentratie een indicatie kan zijn voor een stroomopwaarts gelegen bron;
4. evaluatie van saneringsresultaten; door gebruik te maken van tijd en te anticiperen op saneringsresultaten kan tijdens de sanering de bronzone worden gekarteerd.

Om deze methodieken verder uit werken wordt in het volgende hoofdstuk de gereedschapskist gepresenteerd die daarbij kan worden gebruikt. De veldwerktechnieken met al hun voor- en nadelen worden hierin besproken. In het hoofdstuk daarna worden deze technieken gecombineerd in methodieken volgens de vier lijnen die hierboven zijn gepresenteerd. Daarna worden deze methodieken gekoppeld in de praktijk.

### GEREEDSCHAPSKIST: OVERZICHT VAN TECHNIEKEN

#### 3.1 Algemeen

Welke parameters in een uit te voeren bodemonderzoek nader onderzocht moeten worden, in welke volgorde en met welke technieken is locatiespecifiek. Deze aspecten zijn sterk afhankelijk van het opgestelde conceptueel model van de bodem en de verontreinigingssituatie en het uiteindelijke doel van het onderzoek. Voor het beantwoorden van de vragen die nog niet met het conceptueel model beantwoord kunnen worden of ter verificatie van de juistheid van het conceptueel model kunnen verschillende technieken worden toegepast. Ook zijn veelal combinaties van technieken mogelijk en/of noodzakelijk. In de volgende paragrafen zal worden ingegaan op de mogelijke technieken. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen boortechnieken, sondeertechnieken, geofysische technieken en saneringstechnieken. Elk van deze technieken heeft zijn specifieke voor- en nadelen en toepassingsmogelijkheden. Bij het bespreken van de technieken worden praktische tips voor de uitvoering aangegeven en wordt aandacht geschonken aan de betrouwbaarheid.

#### 3.2 Boortechnieken

Boortechnieken kunnen worden ingezet voor:

- de bepaling van de bodemopbouw;
- het nemen van grondmonsters (zie fig. 8);
- het plaatsen van peilbuizen;
- het plaatsen van injectie-/extractiefilters.



Fig. 8. Boorkisten met grondmonsters.

Boringen kunnen een betrouwbaar beeld geven van de bodemopbouw op een gegeven locatie. De diepte van de overgangen tussen de verschillende lagen wordt, afhankelijk van de gebruikte boormethoden, goed tot zeer goed aangegeven. De beste controle van het bodemprofiel is bij een puls boring. Het beeld van de bodemstructuur kan worden verbeterd door het nemen van ongeroerde monsters en/of steekbusmonsters.



Deze monsters kunnen voor verschillende doeleinden worden gebruikt:

1. korrelgrootte-analyses om een schatting te maken van de doorlatendheid;
2. onderzoek naar de gelaagdheid van het sediment (scheefstellingen enz.);
3. doorlatendheidsproeven voor de bepaling van de hydraulische doorlatendheid;
4. doorlatendheidsproeven voor de bepaling van de doorlatendheid voor de DNAPL;
5. bepaling van het organisch stofgehalte en andere sedimenteigenschappen (sorptie- en omzettingsprocessen);
6. kleurindicatietests waarmee de aanwezigheid van DNAPL's kan worden aangetoond.

Boringen kunnen worden uitgevoerd als puls boring of als zuig boring. De keuze voor een boormethode hangt af van de diepte en gewenste diameter van het boorgat, de risico's op verspreiding van de verontreiniging en de gewenste kwaliteit van het bodemprofiel.

### 3.2.1 Puls boring

De puls bestaat uit een buis met aan de onderzijde een terugslagklep (zie fig. 9). Door de puls op diepte op en neer te bewegen, wordt het sediment losgewerkt dat zich verzamelt in de buis en vervolgens kan worden verwijderd. Het waterpeil in het boorgat wordt lager gehouden dan het grondwaterniveau, waardoor het water onderin het boorgat opwelt en het materiaal makkelijker loskomt. Tegelijk met de vordering van de puls wordt een verbuizing ingelaten (draaien dan wel hydraulisch persen) die het boorgat in stand moet houden. Uiteindelijk wordt de wrijving op de buiswand zo groot dat een verbuizing met een kleinere diameter moet worden ingebracht (vertoering of telescopische verbuizing). In het verleden zijn puls boringen verricht met een maximale diameter van 1.000 mm. Vanwege de ontwikkeling van andere boormethoden worden dergelijke puls boringen niet meer uitgevoerd. De huidige maximale boordiameter bedraagt circa 600 mm. De benodigde boortijd is bij een puls boring veel groter dan bij andere boormethoden. De boorsnelheid bedraagt circa 10 à 20 m per dag. Een puls boring kan tot circa 100 à 150 m worden uitgevoerd.



Fig. 9. Puls boring.

### Betrouwbaarheid en risico's

Bij een vertoering van de casing die wordt afgestemd op de bodemopbouw is het risico op verspreiding van de verontreiniging via het boorgat gering (zie fig. 10).

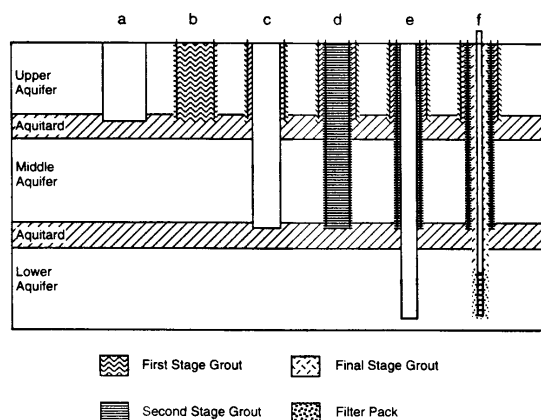


Illustration of the use of multiple casings for drilling to prevent short circuiting of DNAPL in areas of suspected DNAPL source zones. This method is most suited to sites where aquitard units can be accurately defined. a. Extend large diameter boring into top of aquitard unit. b. Set and grout large diameter casing into top of aquitard. c. Extend smaller diameter boring through grouted casing and through the formation into the next aquitard unit. d. Set and grout casing into top of aquitard. e. Extend smaller diameter boring through grouted casing and through the formation into the aquifer unit. f. Complete monitoring well.

Fig. 10. Pulsboring met casing.

### Kosten

De kosten van een pulsbooring zijn sterk afhankelijk van de gewenste boordiameter en de einddiepte. Richtprijzen voor een booring tot circa 100 m met een boordiameter waarin 5 filters kunnen worden afgesteld zijn globaal als volgt:

- aan- en afvoerkosten  $f$  1.500,00
- pulsbooren  $f$  200,00/m

Daarnaast moet rekening worden gehouden met kosten voor de opslag en afvoer van vrijkomende, mogelijk verontreinigde, grond.

### 3.2.2 Zuigbooring

In principe wordt bij de zuigbooring geen casing gebruikt. Het boorgat zal tijdens het boren in stand worden gehouden door het instellen van een overdruk. Hierbij wordt in het boorgat een hoger waterniveau gecreëerd dan buiten het boorgat (grondwaterniveau). Door de ingestelde niveauverschillen zal waterverlies naar de formatie optreden. Teneinde het waterverlies te verminderen, c.q. te beperken, kan gebruik worden gemaakt van een boorspoeling. De boorspoeling kan bestaan uit een afbreekbare, op natuurlijke basis vervaardigde boorspoeling (zetmeel) of door het toevoegen van bentoniet. In combinatie met de fijne fracti van het opgeboorde materiaal (silt en zeer fijn zand) wordt met beide methoden een afpleistering van de boorgatwand verkregen, waardoor een aanzienlijk debietreductie en naval in het boorgat kan worden verkregen.

Aan het gebruik van een boorgatspoeling op basis van zetmeel zijn een aantal onzekerheden verbonden:

- De afbreekbaarheid onder anaërobe condities en afbraaksnelheid is onbekend. Indien wel afbraak onder anaërobe condities optreedt, kan 'verslijming' van het oorspronkelijke product ontstaan. Verwacht wordt dat, indien het afbraakproces optreedt, dit meerdere weken (3 à

- 4 weken) in beslag kan nemen. Vanwege het ontbreken van licht en de benodigde afbraak-enzymen is het echter tevens mogelijk dat helemaal geen afbraak optreedt.
- De invloed op de verontreiniging is onbekend. Door de aanwezigheid van organisch materiaal kan de afbraak of omzetting van de Per-verontreiniging optreden met bijbehorende risico's voor ieder afbraak- of omzettingsproduct afzonderlijk.

Na het beëindigen van de boorwerkzaamheden en het afstellen van de filters worden de filters 'ontwikkeld'. Door het opvoeren van het debiet wordt ter hoogte van het filter de pleisterwand, aanwezig aan de binnenzijde van het boorgat, en de fijne fractie in de aanwezige bodemlagen verwijderd. Opgemerkt wordt dat het ontwikkelen van putten is afgeleid uit ervaringen met pompfilters met grotere diameters. Bij monitoringsfilters, met een relatief kleine diameter, is het debiet en daarmee de stromingssnelheid rondom het boorgat laag. In hoeverre de pleisterwand en de fijne fractie kan worden verwijderd is niet met zekerheid vast te stellen.

Zuigboringen worden uitgevoerd tot een boordiameter groter dan 1.200 mm. De boorsnelheid bedraagt circa 25 tot 100 m per dag. Een zuigboring kan worden doorgezet tot een diepte van honderden meters.

#### *Betrouwbaarheid en risico's*

Bij de aanwezigheid van puur product in de bodem zijn er drie mogelijke verspreidingsroutes bij zuigboren te onderscheiden:

- het puur product wordt met het losgewoelde bodemmateriaal naar het maaiveld getransporteerd en komt via de bezinkbak weer terug in de bodem; hoewel vervluchtiging zal optreden, is niet uit te sluiten dat sterk verontreinigd water wordt teruggebracht in de bodem;
- het puur product wordt de bodem 'ingeperst' vanwege de ingestelde overdruk;
- het puur product zakt naar het diepste punt van de boring en (eventueel) vervolgens naar de eerstvolgende scheidende laag.

Een zuigboring is niet geschikt voor het boren in (potentiële) bronzones.

#### *Kosten*

De kosten van een zuigboring zijn sterk afhankelijk van de gewenste boordiameter en de einddiepte. Richtprijzen voor een boring tot circa 100 m met een boordiameter waarin 5 filters kunnen worden afgesteld zijn globaal als volgt:

- aan- en afvoerkosten        *f* 1.500,00
- zuigboren                        *f* 90,00/m

Daarnaast moet rekening worden gehouden met kosten voor de opslag en afvoer van vrijkomende, mogelijk verontreinigde, grond.

#### *3.2.3 Peilbuizen*

In een boorgat kunnen verschillende peilbuizen worden geïnstalleerd die gebruikt kunnen worden voor de metingen van grondwaterniveau en grondwaterbemonstering. De filters kunnen worden geplaatst op verschillende diepten en met een verschillende binnendiameter. De filters moeten ten minste een binnendiameter van 50 mm hebben. Dan kunnen zij goed gebruikt worden als monitoringsfilter en/of onttrekkingsfilter en kan het filter in geval van verstopping mechanisch (borstel enz.) worden gereinigd. Voorafgaand aan het plaatsen van filters kan nadere informatie van de bodem verkregen worden door het uitvoeren van boorgatmetingen. Met boorgatmetingen kunnen (afhankelijk van het aan- of afwezig zijn van een mantelbuis) verschillende parameters worden bepaald, zoals overgangen van verschillende bodemlagen, porositeit en

dichtheid. Ook kan met een boorgatmeting de aanwezigheid van kleiafdichtingen rondom een geplaatst filter worden nagegaan.

Voor de bemonstering van grondwater in het kader van een onderzoek naar bodemverontreiniging worden veelal peilbuizen gebruikt. Er worden over het algemeen twee materialen toegepast: polyvinylchloride (PVC) en hoge dichtheid polyethyleen (HDPE). Het gebruik van beide materialen heeft zijn voor- en nadelen.

Significante permeatie van gechloreerde koolwaterstoffen door PVC treedt volgens onderzoek van het KIWA [Vonk, 1985] niet op bij gehalten lager dan 10 % van de activiteit, ofwel 10 % van de maximale oplosbaarheid in water. Deze waarde moet als een indicatie worden gezien, waarbij het risico op permeatie nagenoeg geheel uitgesloten is voor drinkwatertoepassingen. Uit het onderzoek blijkt echter eveneens dat ook bij hogere activiteit (tot ca. 30 %) permeatie nog nauwelijks optreedt. PVC heeft het nadeel dat het kan worden aangetast door koolwaterstoffen; vooral vluchtige aromaten en vluchtige gechloreerde verbindingen zijn agressief voor PVC. Op plaatsen waar dergelijke verontreinigingen in hoge concentraties zijn te verwachten, worden in het algemeen HDPE-buizen toegepast. Hoewel HDPE-buizen bestand zijn tegen aromatische en gechloreerde oplosmiddelen, zijn ze echter wel permeabel voor deze stoffen. Uit theoretisch onderzoek [Vreeken en Driessen, 1992] naar het effect van permeatie door HDPE-peilbuizen op de resultaten van een grondwateronderzoek zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het grondwater in een HDPE-stijgbuis die in contact staat met verontreinigd grondwater kan binnen een maand door permeatie zeer sterk verontreinigd raken.
- Schoonspoelen van de buis kan de verontreiniging niet volledig verwijderen. Door de viscositeit stroomt het water langs de rand zeer traag en blijft hier verontreiniging achter. Ook kan de verontreiniging desorberen. Bij het schoonspoelen volgens de procedure van de NEN, minimaal driemaal de peilbuisinhoud, kan 1 - 10 % van de verontreiniging in de buis achterblijven.
- Bemonstering ter hoogte van het filter is zeer belangrijk, maar ook in dit geval is contaminatie niet volledig uit te sluiten. Bij het op diepte brengen van de bemonsteringsslang treedt er menging op en kan er ook ter hoogte van het filter contaminatie optreden.

Als de kans bestaat dat een peilbuis door permeatie is gecontamineerd, wordt geadviseerd de buis met een hoog debiet schoon te spoelen, zodanig dat het water ook bovenin de buis wordt ververst. De tijd tussen het schoonspoelen en het bemonsteren moet zo kort mogelijk worden gehouden. Het is van groot belang dat de bemonsteringsslang ter hoogte van het filter wordt gehangen en dat bij hoge snelheid een ruime hoeveelheid grondwater wordt voorgepompt. Aanbevolen wordt de feitelijke bemonstering bij veel lagere snelheid uit te voeren.

#### *Betrouwbaarheid en risico's*

Bij metingen in peilbuizen zijn er een aantal aspecten die de betrouwbaarheid van de metingen kunnen beïnvloeden. Ten eerste kan bij het doorboren van een bronzone puur product naar de diepte worden verspreid, waardoor in de onderliggende filters verontreinigingen worden gemeten die er oorspronkelijk niet waren. Ten tweede kan ten gevolge van permeatie van verontreiniging door de stijgbuis en lekkage bij aansluitingen tussen stijgbuizen opgeloste verontreiniging uit een bovenliggende sterk verontreinigde laag in de peilbuis komen, waardoor het lijkt alsof er op grotere diepte verontreiniging aanwezig is (zie fig. 11). Ten slotte kan ontgassing bij de monstername een rol spelen; er worden lagere concentraties gemeten dan er daadwerkelijk aanwezig zijn. Het merendeel van de geïntroduceerde fouten kan worden voorkomen door een zorgvuldige uitvoering.

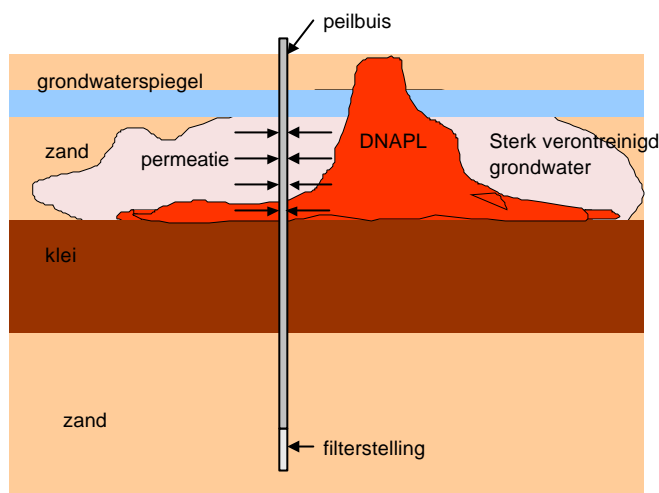


Fig. 11. Permeatie van peilbuizen.

### Kosten

Richtprijzen voor peilbuizen van 2" zijn globaal als volgt:

- blinde buis van PVC  $f$  17,00/m
- filter van PVC  $f$  25,00/m
- blinde buis van HDPE  $f$  25,00/m
- filter van HDPE  $f$  35,00/m

De kosten voor de monsternamen per filter worden bepaald door de benodigde afpomptijd van een filter. Globaal bedraagt de benodigde tijd voor het afpompen en bemonsteren van een filter 15 tot 30 minuten.

### 3.3 Sondeertechnieken

Sondeertechnieken bestaan uit het wegdrukken van een conus (sonde) in de bodem. De sonde kan worden uitgerust met verschillende fijngevoelige opnemers die onder meer punt- en wrijvingsweerstand, geleidbaarheid en waterspanning meten. Voor bemonstering van grondwater worden al vele jaren minifilters gebruikt. De laatste jaren zijn sondes ontwikkeld om tijdens het wegdrukken op iedere gewenste diepte een grond- of grondwatermonster te nemen. Afhankelijk van de beschikbare ruimte en de gewenste diepte kan gebruik worden gemaakt van een handsondeerapparaat, een rupsvoertuig of een sondeertruck.

De maximale sondeerdiepte is afhankelijk van de bodemopbouw. Met een standaard sondeertruck zijn in een zandig pakket diepten tot circa 50 m-mv haalbaar. Het voorkomen van grindlagen en stenen in de ondergrond kan het dieptebereik van een sonde sterk negatief beïnvloeden. Bij aanbesteding is het van belang concrete afspraken te maken omtrent de te bereiken werkdiepte. Over het algemeen wordt het maximale tonnage aangeboden. Een *no-cure-no-pay* garantie met betrekking tot de diepte wordt nooit gegeven.

Bij het omhooghalen van de sondeerstang moet het gat gelijktijdig van een afsluitend middel (b.v. grout of bentoniet) worden voorzien om het neerwaarts transport te minimaliseren. Hierbij moet rekening worden gehouden met de beperkte afsluiting die grout en bentoniet hebben voor DNAPL's. Indien (mogelijk) in de bronzone een sondering wordt geplaatst die door een afsluitende laag gaat, kan het voorboren en plaatsen van een achterblijvende mantelbuis tot in de scheidende laag gewenst zijn. Indien het onderste deel van de mantelbuis (in de klei en tot circa 1 meter daarboven) achterblijft, kan toestroming van DNAPL na het trekken van de sondeerstang

worden voorkomen. De mantelbuis dient niet vervaardigd te zijn van PVC of andere materialen die door DNAPL worden aangetast of permeabel zijn voor DNAPL.

### 3.3.1 *Standaard elektrische sondeerconus*

Sonderingen met een elektrische sondeerconus worden veelvuldig uitgevoerd voor het verkrijgen van een beeld van de bodemopbouw. Tijdens het wegdrukken van een sondeerconus worden de conusweerstand en de plaatselijke kleef op centimeterniveau geregistreerd. Uit de plaatselijke kleef kan het wrijvingsgetal worden berekend. De verkregen gegevens zijn te vertalen naar type bodem. De meest gangbare interpretatie van sondeergegevens is de vertaling van gegevens over conusweerstand en wrijvingsgetal naar grondsoort. De relatie tussen deze grootheden is echter niet eenduidig. Zo leidt een toename van zowel het gehalte aan leem, aan klei als aan organische stof tot een toename van het wrijvingsgetal en kan een onderscheid tussen bijvoorbeeld humeus zand en lemig zand of tussen zandig veen en zavel zonder secundaire gegevens niet altijd worden gemaakt.

In de literatuur worden diverse indelingen naar grondsoort beschreven op basis van sondeergegevens. De indelingen sluiten echter niet volledig aan op de benamingen van de grondsoorten zoals die in Nederland gebruikelijk zijn of benoemen niet alle in Nederland voorkomende grondsoorten. Een globaal overzicht van conusweerstand en wrijvingsgetallen, zoals die in de gangbare in Nederland voorkomende grondsoorten voorkomen, is gegeven in figuur 12. Met sonderingen wordt aanvullende informatie verkregen over de penetratieweerstand van de bodem. Deze informatie is te vertalen naar verschillende pakkingsdichtheden in een zandpakket.

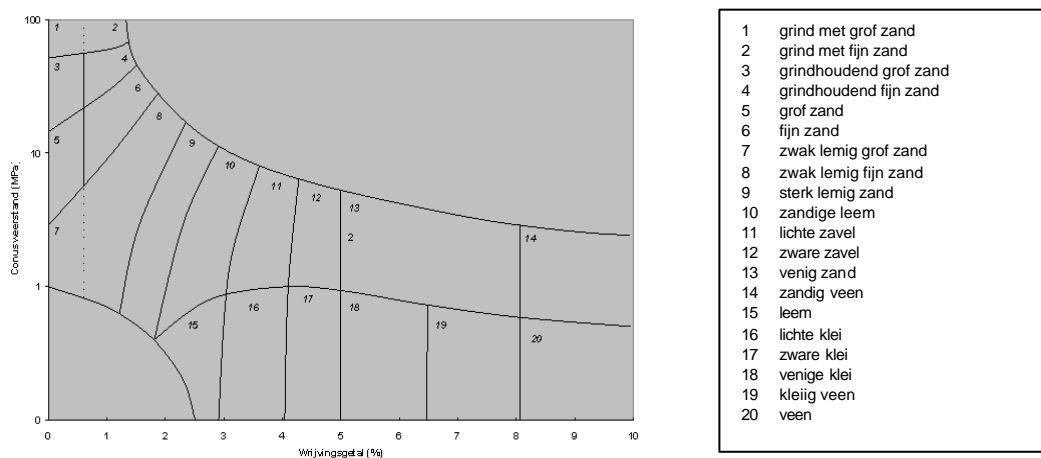


Fig. 12. Interpretatie van sondeergegevens.

### *Betrouwbaarheid en risico's*

Met deze techniek kan een goed beeld worden verkregen van de verschillende mechanische overgangen. Voor enkele overgangen tussen verschillende soorten sedimenten kan het moeilijk zijn om met grote zekerheid aan te geven waarom het gaat. Voor het verkrijgen van een onomstotelijke vaststelling van de verschillende bodemlagen kan het noodzakelijk zijn om sonderingen te combineren met gegevens uit een boring (in de omgeving).

### Kosten

De kosten voor de uitvoering van sonderingen zijn onder te verdelen naar de volgende posten:

- aan- en afvoerkosten  $f$  350,00
- sonderen  $f$  20,00/m
- afdichten van het sondeergat  $f$  15,00/m

### 3.3.2 Conesipper

De Conesipper van de firma Joustra Geomet B.V. is één van de uitvoeringen waarbij een weg-drukbaar filter wordt gebruikt. De Conesipper bevat een monsternamekamer in een roestvrij stalen behuizing, die met behulp van een sondeerwagen op een bepaalde diepte kan worden gebracht (zie fig. 13). Door middel van onderdruk vult de monsternamekamer zich met 90 ml grondwater, waarna het monster met behulp van stikstof van de geselecteerde diepte omhoog wordt gebracht. De minimale monsterhoeveelheid die door het laboratorium wordt geaccepteerd voor een analyse op VCK bedraagt 60 ml. Voor combinaties van analyses zijn grotere hoeveelheden nodig en zullen meerdere monsters moeten worden genomen. Eén monstername duurt circa 15 minuten.

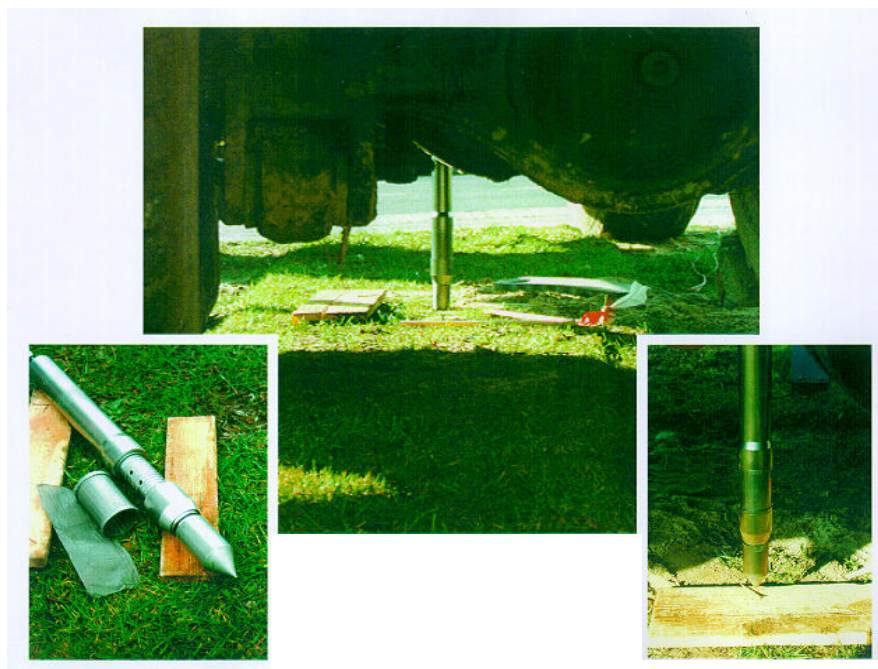


Fig. 13. Sondeerwagen met Conesipper.

Met de Conesipper kan op elke diepte (tot de maximale diepte, die afhankelijk is van de bodemweerstand) een grondwatermonster worden genomen (uitzonderingen zijn natuurlijk kleilagen enz.). Door het ontbreken van storende factoren, zoals boorvloeistof en werkwater, kunnen direct grondwatermonsters worden genomen. Dit heeft het voordeel dat in één werkgang meerdere monsters na elkaar op een steeds grotere diepte kunnen worden genomen. Er wordt een verticaal concentratieprofiel verkregen. Als gevolg van de verbreding van de sonde, ter plaatse van de filterkamer, wordt het werkgebied van de Conesipper in vergelijking met een standaard sondeerconus beperkt. In een zandig pakket zijn maximale diepten van circa 30 m-mv bereikt. Er moet zorg worden gegeven aan de mogelijkheid van cross-contaminatie door onvoldoende reiniging van het systeem tussen monsters genomen op twee opeenvolgende diepten. Het is dus belangrijk om de monsternamekamer goed te spoelen. Aanbevolen wordt om de Conesipper voor

de monsternamen minimaal twee keer te spoelen. Hiermee komt de totale bemonsteringstijd voor één monster op circa 45 minuten.

### *Betrouwbaarheid en risico's*

In het kader van het project DNAPLKAR zijn een groot aantal metingen in tweevoud uitgevoerd (voorafgegaan door één spoelbeurt van de monsternamenkamer). De vastgestelde relatieve afwijkingen variëren van 0 tot 35 %. De afwijking tussen de duplo's wordt bepaald door de fout die kan ontstaan tijdens de bemonstering en in mindere mate door de fout in de analyse. De resultaten lijken erop te wijzen dat, na het bemonsteren van een sterk verontreinigde grondwaterlaag, een dieper genomen monster in een schonere waterlaag door de voorgaande bemonstering kan worden gecontamineerd. Dit blijkt in een aantal gevallen uit een relatief grote absolute afwijking tussen de duplo's. Het eerst genomen monster in deze 'schonere' grondwaterlaag bevat een hoger gehalte dan de erna genomen duplo. Het lijkt dus belangrijk de Conesipper goed te spoelen. Deze resultaten geven aan dat het aanbeveling verdient om, ten opzichte van de huidige eenmalige spoelgang, het voorspoelen van de monsternamenkamer uit te breiden.

Wanneer door de verzameling eerste en tweede metingen een regressielijn wordt getrokken, is dit mogelijk met een betrouwbaarheid van 97 % ( $R^2$ ). De regressielijn maakt een mooie hoek van 45 graden, hetgeen een hoge nauwkeurigheid impliceert. In figuur 14 is de regressielijn opgenomen. De reproduceerbaarheid van de metingen blijkt hoog. Geconcludeerd kan worden dat de resultaten van de metingen met de Conesipper voldoen aan de doelstelling binnen DNAPLKAR: het in kaart brengen van grote relatieve verschillen in concentraties.

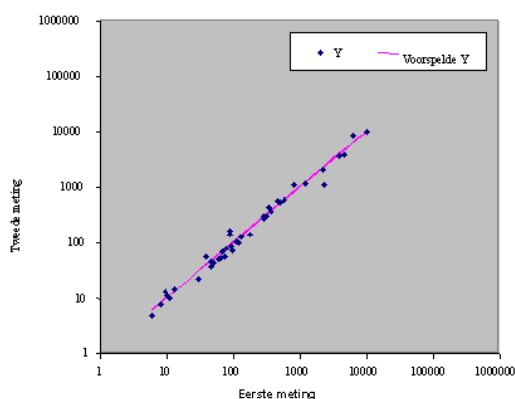


Fig. 14. Regressielijn van duplo-metingen.

Wat opvalt bij een analyse van de afwijkingen van de meetseries op de regressielijn is dat met name bij hoge gehalten een afwijking is te constateren (zie fig. 15).

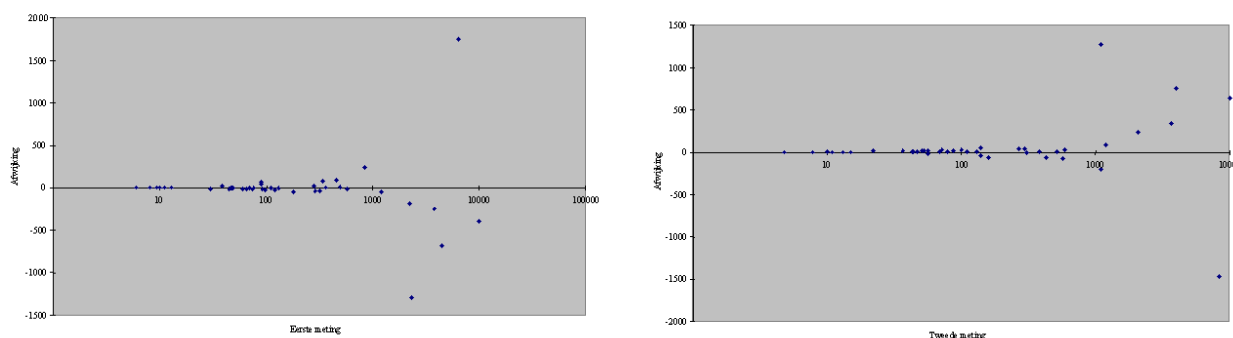


Fig. 15. Afwijkingen van metingen op de regressielijn



De eerste meting wijkt daar met name af naar beneden, de tweede naar boven. Hiervoor is vooralsnog geen verklaring gevonden. Ook op basis van de regressieresultaten in combinatie met de doelstelling, 'identificeren van pieken', voldoet de bemonsteringstechniek goed.

Een aspect waar tot dusverre weinig over bekend is, is het decompressie-effect. Dit effect treedt op wanneer grondwatermonsters van een diepte met hogere (water)druk naar het maaiveld worden gebracht waar een druk van één atmosfeer geldt. In dit verband zijn kleine gasbelletjes waargenomen in 'verse' grondwatermonsters. Wellicht gaat het hierbij om uitgassing van CO<sub>2</sub>. Daarnaast kunnen verontreinigingen als gevolg van deze decompressie uitgassen en bij de monstername verloren gaan.

#### *Kosten*

De kosten voor de uitvoering van sonderingen met de Conesipper zijn onder te verdelen naar de volgende posten:

- aan- en afvoerkosten                    *f* 350,00
- Conesipper drukken                      *f* 20,00/m
- bemonsteringen                         *f* 150,00/stuk
- afdichten van het sondeergat         *f* 15,00/m

#### 3.3.3 *Slagfilter*

Een alternatief voor de Conesipper is de toepassing van een slagfilter. Het principe van bemonstering is gelijk. De wijze waarop het filter naar beneden wordt gebracht is echter anders. Met een handzaam slagmechanisme wordt een stalen filter op diepte gebracht. Op de gewenste diepte kan een monster worden genomen of een doorlatendheidstest (mini-slug) worden uitgevoerd. Slagfilters zijn ontwikkeld voor monstername of tests op korte verticale en/of horizontale afstanden.

Sinds de jaren tachtig heeft de Universiteit van Waterloo (Canada) en later de Technische Universiteit van Denemarken zich beziggehouden met het ontwikkelen en uitvoeren van nieuwe technieken voor het bemonsteren en karakteriseren van de ondergrond. Eén van deze technieken is voor het bemonsteren van het grondwater met een hoge verticale resolutie en met behulp van een overdruk aan stikstof. Hierdoor worden de grondwatermonsters niet blootgesteld aan zuurstof en niet door de wijze van bemonsteren gestript van de vluchtige verbindingen. Door met een zekere regelmaat op verschillende diepten deze test uit te voeren, wordt met een hoge resolutie een verticaal profiel verkregen. De techniek maakt gebruik van stalen filters die door middel van een slagtechniek worden aangebracht. Deze techniek wordt aangeduid met 'slagfilter'bemonstering.

Voor de techniek worden stalen filters (lengten tussen de 10 en 25 cm lengte) met zeer fijn tressengaas verbonden aan stalen 1" pijp (stoom)buisdelen door een slagmechanisme, grondraket of ramguts, in de grond gebracht. Het grondwater zal in de buis stromen door het stijghoogteverschil buiten en binnen in de buis. Bij de bemonstering wordt door middel van een kogelklep vlak boven het filter het toestromen van aquiferwater mogelijk, maar wordt terugstroming van het aquiferwater verhindert. Het water, dat zich boven de kogelklep heeft verzameld, wordt via een monsterslangetje dat is neergelaten in de buis tot vlak boven de kogel door middel van stikstofoverdruk naar boven gebracht. Aldaar wordt het zuurstofloos behandeld (onder meer gefil

Het slagfilter is een variant op de Conesipper voor locaties die moeilijk toegankelijk zijn. Slagfilters hebben het grote voordeel dat zij vrijwel overal geplaatst kunnen worden: er is geen zware vrachtwagen nodig. Een nadeel is een beperkte penetratiediepte in 'dichte' bodems (met een hoog gehalte aan fijne fractie). Op een locatie met een bodemopbouw van zand- en leemlagen is slechts met veel inspanning een diepte van circa 10 m-mv bereikt. Bij voorgaande tests van deze slagfiltertechniek in zowel buitenland (TU Denemarken, USA en Canada) als binnenland (TNO-NITG en VU Amsterdam) zijn diepten bereikt in zandige en/of kleiige lagen van 17 tot 25 m-mv. De maximale diepte van deze techniek is sterk locatiespecifiek en niet zonder a priori gegevens aan te geven. Een garantie van de te halen diepte is echter niet te geven.

#### *Betrouwbaarheid en risico's*

Ervaringen in binnen- en buitenland geven aan dat de analyses van de genomen monsters zeer betrouwbaar zijn. Dit komt onder meer door de genomen maatregelen tegen vervluchting. De wijze van bemonstering moet afgestemd zijn op de uiteindelijke wijze van verwerking in het laboratorium.

Monsters genomen met het slagfilter kunnen zuurstofloos en met overdruk genomen worden. Indien dit gewenst is, moet de bemonsteringstechniek en de analysetechniek hierop afgestemd zijn. Zo kunnen de monsters direct in *head space vials* worden gedaan om additionele vervluchting bij de voorbehandeling te voorkomen. Naast monsters voor de bepaling van de vluchtige componenten kunnen ook grondwatermonsters voor andere analyses direct genomen worden. Hierbij moet acht worden gegeven op het metaal in het systeem: monsters voor de bepaling van metalen zijn met de stalen drijfstangen niet betrouwbaar. Directe filtratie van de monsters is goed mogelijk.

#### *Kosten*

De kosten voor de uitvoering van sonderingen met het slagfilter zijn onder te verdelen naar de volgende posten:

- aan- en afvoerkosten                    *f* 350,00
- slagfilter slaan                            *f* 20,00/m
- bemonsteringen                           *f* 150,00/stuk
- afdichten van het sondeergat        *f* 15,00/m

#### 3.3.4 *Minifilters*

Technieken, waarbij filters in de bodem worden weggedrukt, bieden mogelijkheden voor het nemen van monsters zonder veel verstoringen. Bij het plaatsen van minifilters wordt een klein filter in de ondergrond aangebracht. Het minifilter bestaat uit een 18 cm lang PVC-filter met een diameter van 21 mm, welke verbonden is aan een flexibele PVC- of polyethyleenslang. Met behulp van een pompje kunnen grondwatermonsters worden genomen. Tevens kan de stijghoogte van het watervoerende pakket, waarin het filter is geplaatst, worden vastgesteld.

Het minifilter wordt geplaatst met behulp van sondeerapparatuur. Het filter wordt verbonden aan een 'verloren' punt die met behulp van standaard sondeerstangen wordt weggedrukt. Na het bereiken van de vereiste diepte worden de sondeerstangen teruggetrokken en blijven de punt, het filter en de slang in de grond achter (zie fig. 16).

Wegdrukbaar filters hebben het voordeel dat ze snel kunnen worden geplaatst en vrijwel direct kunnen worden bemonsterd. Daarna kan dit permanente filter worden gebruikt voor het uitvoeren van grondwaterbemonsteringen in de tijd.

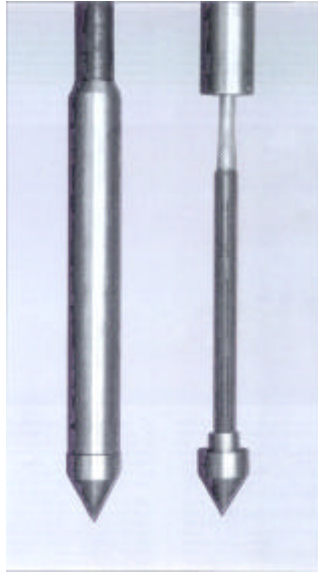


Fig. 16. Minifilters tijdens en na de installatie.

#### *Betrouwbaarheid en risico's*

Door de wijze van aanbrengen is de kans op verstoringen, zoals *cross-contaminatie*, klein. Indien de accuratesse van de concentraties essentieel is, moet helder zijn of de te meten component geen sorptie heeft aan de leiding. Dit kan namelijk tot nalevering leiden. Een ander punt van aandacht is de grondwaterspiegel. Het monster kan alleen met een vacuümpomp omhoog worden gehaald. Drukpompen zijn niet mogelijk. Bij een grondwaterstand ver beneden het maaiveld (> 6 m) kunnen problemen bij de bemonstering ontstaan: zowel het niet omhoog halen van het monster als het strippen van vluchtige verbindingen door de onderdruk. Een laatste punt van aandacht is de mogelijkheid van verstopping van het filter.

#### *Kosten*

De kosten voor het plaatsen van minifilters zijn onder te verdelen naar de volgende posten:

- aan- en afvoerkosten  $f$  350,00
- minifilter drukken  $f$  20,00/m (inclusief materiaal)
- afdichten van het sondeergat  $f$  15,00/m

### 3.4 Geofysische technieken

Met hoge resolutie geofysische technieken kan de ondergrond van een verontreinigde locatie niet-destructief in beeld worden gebracht. Onder de technieken, die gebaseerd zijn op golfvoortplanting, vallen georadar (elektromagnetische golven) en seismische methoden (akoestische golven). Met behulp van geofysische technieken kunnen de continuïteit van slecht doorlatende lagen en de scheefstelling van lagen in een continu verticaal vlak worden bepaald.

Situaties, waarbij geofysische technieken vaak een rol spelen, zijn:

- als er niet kan worden geboord;
- als de relevante diepte zo groot is dat boren duur is;
- het nauwkeurig detecteren van laterale overgangen in de ondergrond, hetgeen met boringen niet efficiënt mogelijk is (reduceren van het aantal boringen);
- als de ondergrond complex is, zodat met boren niet voldoende betrouwbare informatie kan worden verkregen.

De uitvoering van geofysisch onderzoek leidt in het algemeen tot een goed inzicht in de structuur van de bodem: de geometrische ligging van de verschillende lagen. Door correlatie met gegevens uit één of twee boringen kan de ligging van individuele kleilichamen langs een geofysisch profiel worden vastgesteld.

### 3.4.1 Georadar

De georadarmethode is gebaseerd op de voortplanting van elektromagnetische golven in de bodem. Via een zender en zendantenne worden radargolven de bodem in gezonden. Op grensvlakken tussen lagen met contrasterende elektrische eigenschappen wordt de golfenergie gereflecteerd en aan het oppervlak door een ontvangantenne opgevangen (zie fig. 17). Reflectie vindt niet alleen plaats op vlakken, maar ook op objecten van beperkte omvang in de ondergrond.

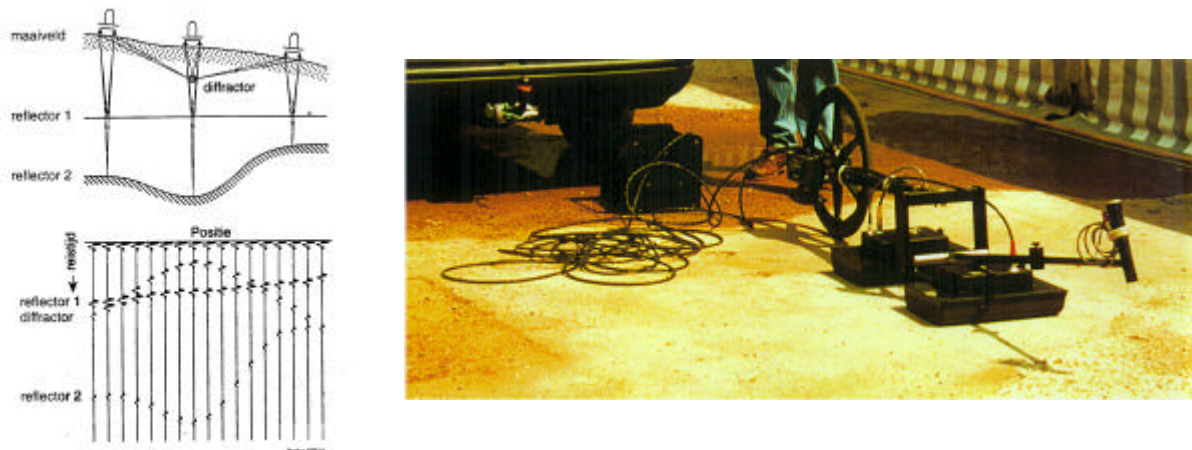


Fig. 17. Georadarmetingen.

De reflecties worden afgebeeld in radar(echo)grammen, waarin op elke meetpositie langs een spoor de binnengekomen reflecties tegen de reistijd worden weergegeven. Voor het verkrijgen van een beeld van de bodemopbouw is echter niet de tijd, maar de diepte van een reflector van belang. De tijd kan in diepte worden omgezet via de voortplantingssnelheid van de radargolven. Voor de kartering van de ondergrond worden langs profiellijnen metingen gemaakt met een geringe onderlinge afstand van 0,25 tot maximaal 1 m. Dergelijke georadarsecties geven een praktisch continu beeld van de ondergrond.

Georadar richt zich op een verkenning van de geologische opbouw van de ondergrond en gebruikt antennes met relatief lage frequenties tussen 25 en 100 MHz om zo diep mogelijk in de bodem door te dringen. De maximale diepte, die met georadar kan worden bereikt, wordt grotendeels bepaald door de elektrische eigenschappen van de bodem. Hoe hoger de elektrische geleiding (klei, brak/zout water) of conductiviteit des te geringer is de doordringingsdiepte. In de praktijk is georadar ongeschikt voor gebruik in gebieden waar de conductiviteit van de bodem groter is dan 10 mS/m. In een bodem met een lage conductiviteit hangt de doordringingsdiepte af van de frequentie van de radargolven; hoe lager de frequentie, des te groter het doordringingsvermogen. De toename in de exploratiediepte gaat echter ten koste van een vermindering van het scheidend vermogen (de resolutie). Over het algemeen zijn met georadar diepten tot 20 à 30 m haalbaar.

### *Betrouwbaarheid en risico's*

De mate van reflectie wordt bepaald door het contrast in de diëlektrische constante tussen verschillende lagen. De diëlektrische constante wordt voor een groot deel bepaald door het volumetrisch watergehalte in de bodem. De grondwaterspiegel geeft dan ook vaak een sterke reflectie. Ook veen en klei onderscheiden zich dankzij een hoog watergehalte vaak duidelijk van zanden. Echter, onder de grondwaterspiegel is er lang niet altijd een significant contrast tussen kleien en waterverzadigde zanden. In de onverzadigde zone kunnen ook binnen zandformaties laaggrenzen en sedimentaire structuren (zwakke) reflecties geven. Dit komt omdat het vochtgehalte van zandige afzettingen afhangt van de porositeit en dus varieert met de korrelgrootte en korrelgrootteverdeling. Onder de grondwaterspiegel zijn de verschillen echter veel kleiner en is het daarom moeilijker om interne reflecties waar te nemen.

De maximale diepte, waarover nog betrouwbare informatie kan worden verkregen, is afhankelijk van de locatiespecifieke omstandigheden: onder andere het ondiep voorkomen van dikke kleilagen, de aanwezigheid van metalen objecten, de geleidbaarheid van het grondwater en de diepte van de grondwaterspiegel.

### *Kosten*

De kosten voor een georadaronderzoek bedragen, op basis van enkele km tracé, circa f 15.000.

#### 3.4.2 *Hoge resolutie seismiek (HRS)*

Seismische reflectiemethoden zijn gebaseerd op de voortplanting van akoestische (geluids)golven in de bodem (zie fig. 18). Akoestische golven kunnen worden opgewekt met verschillende bronnen. De meest gebruikte methode is het tot ontploffing brengen van een kleine lading dynamiet in een boorgat. Wanneer de infrastructuur dit niet toelaat (b.v. dicht bij bebouwing), wordt een vibrator ingezet om de bodem vanaf het oppervlak in trilling te brengen.

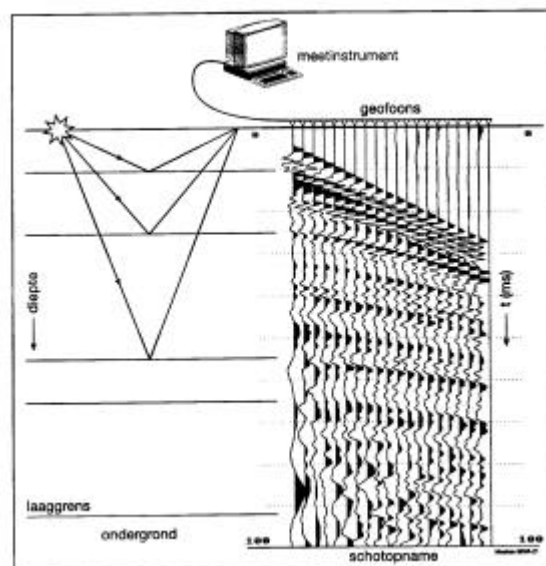


Fig. 18. Principe van HRS.

Op grensvlakken tussen lagen met contrasterende akoestische eigenschappen wordt de golfenergie gereflecteerd en aan het aardoppervlak opgevangen door een, veelal groot, aantal ontvangers (geofoons). Voor de kartering van de ondiepe (30 tot 100 m) ondergrond worden de geofoons langs profiellijnen geplaatst met een kleine onderlinge afstand van bijvoorbeeld 2 m en wordt om de 8 m een schot afgevuurd. De reflecties worden afgebeeld in seismogrammen, waar-

in de opnamen van verschillende geofoons naast elkaar worden weergegeven. Na een uitvoerige bewerking wordt hieruit een seismische sectie samengesteld, die een vrijwel continu tweedimensionaal beeld van de ondergrond geeft.

De mate van reflectie wordt bepaald door het contrast in de voortplantingssnelheid en het soortelijk gewicht tussen verschillende lagen. Deze fysische eigenschappen worden bepaald door lithologie, compactie en de waterverzadiging van afzettingen. De seismische reflectiemethoden werken vooral goed als er slechts kleine contrasten in de bodem zijn. HRS richt zich op een verkenning met veel detail van de ondiepe ondergrond tussen ongeveer 30 m en 100 à 200 m. In de praktijk blijkt het niet goed mogelijk om ondieper te kijken dan 30 m. De invloed van een lagesnelheidslaag is vrijwel altijd aanwezig bij onderzoek op het vaste land. In Nederland komt deze laag overeen met de bovenste meters van de bodem boven het grondwaterniveau.

De kwaliteit van de data hangt voor een groot deel af van de voortplantingseigenschappen van de bovenste paar meter. HRS is ongeschikt in gebieden waarin gas voorkomt in de bodem (b.v. veenafzettingen met aanzienlijke dikte) en minder goed inzetbaar in gebieden met diepe grondwaterstanden (> 12 m-mv).

#### *Betrouwbaarheid en risico's*

De seismische sectie is een afbeelding van de reflectoren in de ondergrond tegen de reistijd (naar beneden en naar boven) van het reflectiesignaal. Deze reistijden moeten worden omgezet naar diepte om een correlatie te kunnen maken met geologische structuren die bekend zijn uit bijvoorbeeld boringen. Vaak wordt voor deze tijd-diepte-conversie een speciale meting uitgevoerd in een boorgat. Voor de interpretatie van de seismische sectie moet alle beschikbare geologische informatie (o.a. regionale geologische informatie van geologische kaarten, boringen, sonderingen en boorgatloggegevens in het onderzoeksgebied) worden verzameld. De gegevens worden vervolgens gecorreleerd met (de patronen van) seismische reflecties in de dieptesectie. Dit is een belangrijke, soms moeizame, interpretatiestap. Indien de boring stratigrafisch beschreven is, kunnen de verschillende geologische formaties langs de seismische sectie worden gevolgd. Vervolgens worden individuele reflecties gecorreleerd met klei of andere lagen. Een reflectie wordt veroorzaakt door een laagovergang die gepaard gaat met een overgang in seismische impedantie. Dit hoeft niet per se een zand-klei-overgang te zijn, hoewel de ervaring leert dat een dergelijke overgang vaak wel een reflectie veroorzaakt. Impedantieovergangen, die ook vaak een heldere reflectie veroorzaken, zijn de volgende:

- de top van een 'fining-upwards' sequentie, zoals vaak wordt teruggevonden in riviersedimenten;
- de basis van een 'fining-downwards' sequentie;
- oude erosieoppervlakken, die in de boommonsterbeschrijving niet herkenbaar zijn, zijn vaak wel goede reflectoren;
- oude bodems, waarbij sprake is geweest van een verlaagde grondwaterstand en daardoor compactie, kunnen reflectoren zijn;
- lithologische overgangen kunnen reflectoren zijn, mits de seismische impedantie van beide materialen niet gelijk is;
- bruinkoollaagjes hebben vaak een impedantie die sterk afwijkt van het omringende sediment en zijn seismisch vaak goed zichtbaar.

Na de correlatie tussen laaggrenzen in de ondergrond en reflectiesignalen, kunnen de laterale extensie en eventuele helling van deze laagovergangen worden bepaald.

#### *Kosten*

De kosten voor een HRS-onderzoek bedragen, op basis van 1 km tracé, circa f 75.000.

### 3.5 Saneringstechnieken

Tijdens het uitvoeren van een sanering gaat over het algemeen van alles fout. Logisch, want het ontwerp is gebaseerd op een conceptueel model en zo'n model is niet volledig. Feitelijk is de exploitatiefase nog steeds een leerfase. Hiervan kan gebruik worden gemaakt. Dit fenomeen staat bekend onder de titel 'cyclisch ontwerpen'. Een ontwerp is in eerste instantie grof en wordt in de tijd verfijnd door kennis die wordt opgedaan tijdens de uitvoering. Een dergelijke aanpak is zeker aan te raden wanneer sprake is van een eeuwigdurende sanering. Het lijkt aantrekkelijk om op voorhand gebruik te maken van die tijd en te anticiperen op het feit dat er dingen fout zullen gaan. Maar hoe? En wat levert het op?

In principe kan het idee voor alle saneringstechnieken worden gebruikt. Er is echter één techniek waarmee deze aanpak extra scoort en die ook alleen voor de karakterisatiedoelstelling kan worden ingezet, voorafgaand aan de implementatie van de uiteindelijke saneringsvariant: de geohydrologische onttrekking. Bij een grondwateronttrekking wordt de verontreiniging in het onttrokken water bepaald door de mate van verontreiniging in het gebied waardoor het aangetrokken grondwater stroomt. Dit gebied kan, met behulp van een geohydrologische modellering, worden bepaald door het identificeren van alle stroombanen (het doorstroomde gebied) die in de onttrekking terechtkomen. Is de verontreiniging in het onttrokken water hoog dan moet een deel van de stroombanen door een bron stromen.

Er kunnen nu twee strategieën worden gevolgd:

1. De eerste strategie is het zo klein mogelijk maken van het aantal stroombanen, ofwel het doorstroomde gebied dat in de onttrekking terechtkomt. Het komt erop neer dat een onttrekking uit een zo groot mogelijk aantal kleine filters komt, die individueel een klein doorstroomd gebied representeren (zie fig. 19). Uitgaande van het DNAPL-concept werkt deze techniek vooral in de verticaal, omdat daarin grote verschillen in concentratie zijn te meten. Deze techniek wordt gedifferentieerd onttrekken genoemd (zie 4.6 voor een verdere beschrijving).

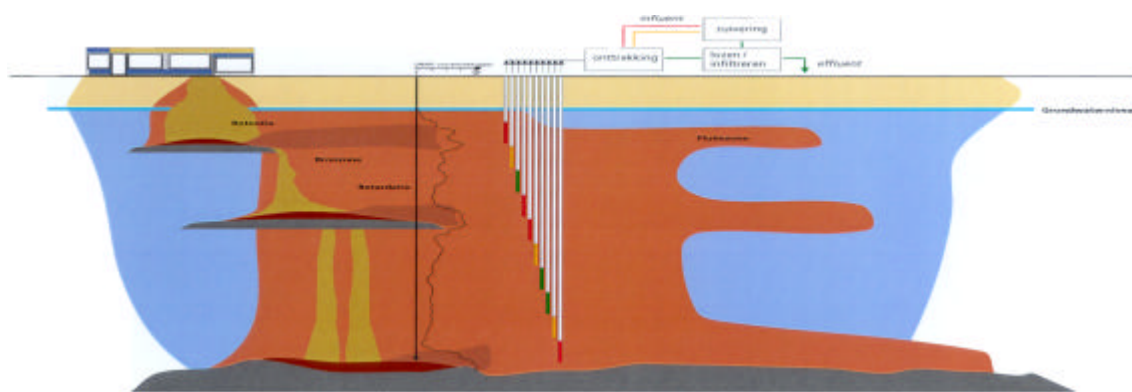


Fig. 19. Principe van gedifferentieerde onttrekking.

2. De tweede strategie gaat uit van het verplaatsen van de onttrekking in de tijd gekoppeld aan het monitoren van peilbuizen loodrecht op de stromingsrichting (zie fig. 20). Hierbij is iedere peilbuis representatief voor een stroomopwaarts gelegen doorstroomd gebied. Van de verschillende onttrekkingslocaties worden gebieden gearceerd waarin de bron zich kan bevinden. Wanneer deze gebieden op elkaar worden geprojecteerd, blijven alleen de gebieden over die in alle gevallen gearceerd zijn als potentiële bronlocaties. Deze techniek wordt dynamisch monitoren genoemd (zie 4.8 voor een verdere beschrijving).

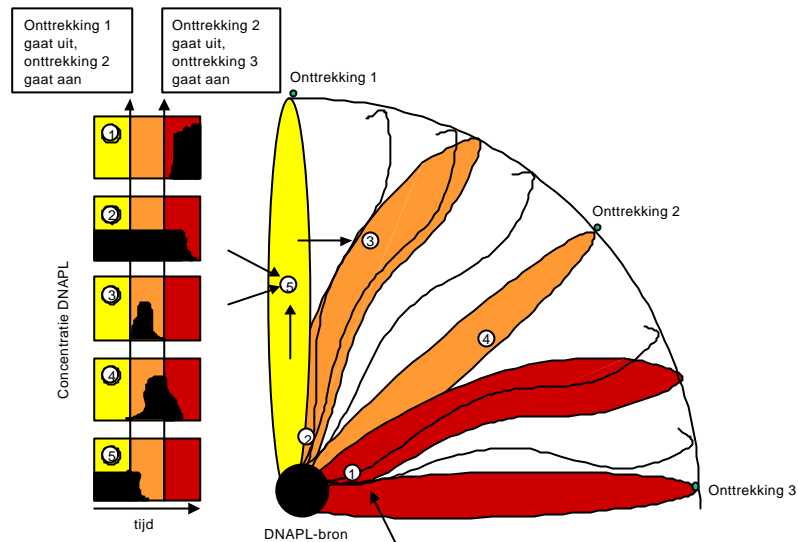


Fig. 20. Principe van dynamische monitoring.

### Kosten

Een voorbeeld. Het morgen plaatsen van een bentonietscherm rondom een bronzone kost 1 miljoen. Omdat de kartering van de bron nog niet goed is uitgevoerd, moet de wand een groter gebied omvatten om te krap plaatsen te vermijden, met alle extra negatieve milieuvriendelijke daarbij. Over 50 jaar, of misschien langer, moet dezelfde wand weer worden geplaatst. Omdat nog steeds niet meer informatie omtrent de bronlocatie is verkregen, zal ook dan een zekere overdimensionering moeten worden uitgevoerd. Wat is dan een alternatief?

Stel: de wand wordt pas geplaatst over zeg 15 jaar (of wanneer een herinrichting van een locatie wordt verwacht). In de tussentijd wordt de verspreiding gereduceerd door een intelligente geohydrologische beheers- en monitoringsmaatregel (dynamische monitoring of gedifferentieerde onttrekking), die meer informatie verschaft over de locatie van de bronzone. Het resultaat is dat over 15 jaar een civiele wand kan worden geplaatst met een minder grote omtrek, waarbij de kans op te krap plaatsen is geminimaliseerd en een betere milieuvriendelijke is verkregen dan bij de 'ruimere morgen te plaatsen variant'. Qua kosten is deze alternatieve aanpak acceptabel, zolang de reductie van kosten door kapitalisatie niet wordt overschreden door de kosten voor de slimme tussentijdse maatregel. De installatie van de slimme maatregel moet minder kosten dan circa 45 % (*f* 450.000) van de installatiekosten voor de schermwand (uitgaande van gelijke exploitatiekosten).





### METHODIEKEN: COMBINEREN VAN TECHNIEKEN

#### 4.1 Algemeen

Een methodiek wordt bepaald door de doelstelling in de vorm van een onderzoeksvraag, de wijze waarop de onderzoeksvraag wordt beantwoord en de technieken die daarbij worden gebruikt.

Allereerst de onderzoeksvraag. Wat wil ik weten?

- verticale detaillering van de bron;
- horizontale detaillering van de bron.

Welke strategieën kan ik gebruiken om deze vraag te beantwoorden?

- zoveel mogelijk informatie halen uit een (reeds uitgevoerd) regulier nader onderzoek;
- in kaart brengen van de bodemopbouw ter identificatie van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen;
- indirecte metingen in de pluim, waarbij verhoogde gehalten een indicatie zijn voor een stroomopwaarts gelegen bron;
- al doende leren; door gebruik te maken van tijd en te anticiperen op saneringsresultaten kan tijdens de sanering de bronzone worden gekarteerd.

Welke technieken kan ik daarbij gebruiken en wat zijn hun beperkingen?

- boortechnieken;
- sondeertechnieken;
- geofysische technieken;
- saneringstechnieken.

In de volgende paragrafen zijn 7 methodieken uitgewerkt. Allereerst een methodiek om informatie te verzamelen uit een (reeds uitgevoerd) nader onderzoek. Indien de bodemopbouw complex is, en niet uit de basisinformatie is af te leiden, kunnen twee methodieken worden toegepast. De ene methodiek werkt effectief bij ondiepere verontreinigingen, de andere bij diepe verontreinigingen. Er worden twee methodieken gepresenteerd die kunnen worden toegepast wanneer er nadere verticale kartering noodzakelijk is. Onderscheidend is weer de toepassingsdiepte. Ten slotte worden twee methodieken gepresenteerd die kunnen worden ingezet wanneer een nadere horizontale kartering nodig is. Hierbij is het onderscheid vooral de mate van detail die wordt verkregen.

#### 4.2 Informatie uit regulier nader onderzoek

##### *Doel*

Het bepalen van:

- globale bodemopbouw (onderverdeling van watervoerende lagen en scheidende lagen);
- stromingsrichting van het grondwater in diverse lagen;
- vaststellen van de omvang van de verontreiniging (horizontaal en verticaal);
- mate van verontreiniging.

### Werkwijze

De te hanteren methodiek volgt in hoofdlijnen de werkwijze van een standaard nader bodem-onderzoek (plaatsen van boringen/peilbuizen/minifilters). Vanuit het DNAPL-concept kunnen er wel een aantal praktische tips worden toegevoegd:

- Overdenk goed waar de diepe filters worden geplaatst in verband met doorboring van onbekende zinklagen. Feitelijk liever van buiten naar binnen werken dan van binnen naar buiten, zoals gebruikelijk is.
- Plaats boven ondoorlatende lagen korte filters (ca. 1 m), met het 'kontje in de klei', voor het aantonen van zinklagen.
- Plaats in watervoerende pakketten lange filters (ca. 3 m) in verband met de hogere trefkans en voor karakterisering van de pluim.
- Maak gebruik van een filterdiameter van 3" in plaats van 2". Dit maakt de filters geschikt voor korte onttrekkingsproefjes bij twijfel over de betrouwbaarheid van de meetgegevens (b.v. door permeatie van het filter, of lekkende afsluitingen). Tevens kunnen in een latere fase deze filters mogelijk worden gebruikt voor bijvoorbeeld een geohydrologische beheersing.
- Dicht scheidende lagen af met bentoniet.
- Overweeg, vooral bij het plaatsen van diepe filters, om ook filters te plaatsen in het filtertraject op diepten die in een latere fase van belang kunnen zijn (b.v. midden in het watervoerende pakket).
- Analyseer de grondwatermonsters, langs een stroombaan, op de Wiedemeyer-reeks (zie tabel 5). Hiermee wordt informatie verkregen over het al dan niet optreden van natuurlijke afbraak.

Tabel 5. Monitoringsparameters voor natuurlijke afbraak.

analyse	concentratiegebied	interpretatie
zuurstof	< 0,5 mg/l > 1 mg/l	bij hogere gehalten wordt het afbraakproces verstoord aërobe afbraak van VC maar geen afbraak Per, Tri en Cis
nitraat	< 1 mg/l	bij hogere gehalten kan nitraat in competitie gaan en het afbraakproces frustreren
ijzer(II)	> 1 mg/l	volledige reductieve afbraak mogelijk
sulfaat	< 20 mg/l	bij hogere gehalten kan sulfaat in competitie gaan en het afbraakproces frustreren
sulfide	> 1 mg/l	volledige reductieve afbraak mogelijk
methaan	< 0,1 mg/l < 1 mg/l > 1 mg/l	oxidatie van vinylchloride accumulatie van vinylchloride optimale afbraak
Eh	< 50 mV < -100 mV	reductieve dechlorering mogelijk optimale condities voor reductieve dechlorering
pH	5 < pH < 9	toegestane reeks voor reductieve dechlorering
DOC	> 20 mg/l	nodig voor reductieve dechlorering
temperatuur	> 20 °C	versnelling van reductieve dechlorering
kooldioxide	> 2 x achtergrond	ultiem afbraakproduct
alkaliteit	> 2 x achtergrond	resultaat van interactie van CO <sub>2</sub> met bodemmateriaal
chloride	> 2 x achtergrond	product van reductieve dechlorering
Per		oorspronkelijk product
Tri		oorspronkelijk product of reductieve dechlorering van Per
dichlooretheen		oorspronkelijk product of reductieve dechlorering van Tri; indien Cis > 80 % van totale dichlooretheen waarschijnlijk afbraakproduct
vinylchloride		oorspronkelijk product of reductieve dechlorering van dichlooretheen
etheen	> 0,01 > 0,1	resultaat van reductieve dechlorering van VC goed resultaat van reductieve dechlorering van VC

### Evaluatie

In principe betreft dit een gangbare methodiek. In figuur 21 is als voorbeeld de globale kartering door middel van boringen, peilbuizen en minifilters van de Per-verontreiniging op de locatie te Leusden weergegeven.

Allereerst zijn ondiep de bronlocaties in kaart gebracht. Vervolgens is op grotere diepte de verontreiniging globaal uitgekarteerd, de diepe boringen zijn stroomafwaarts van de locatie geplaatst.

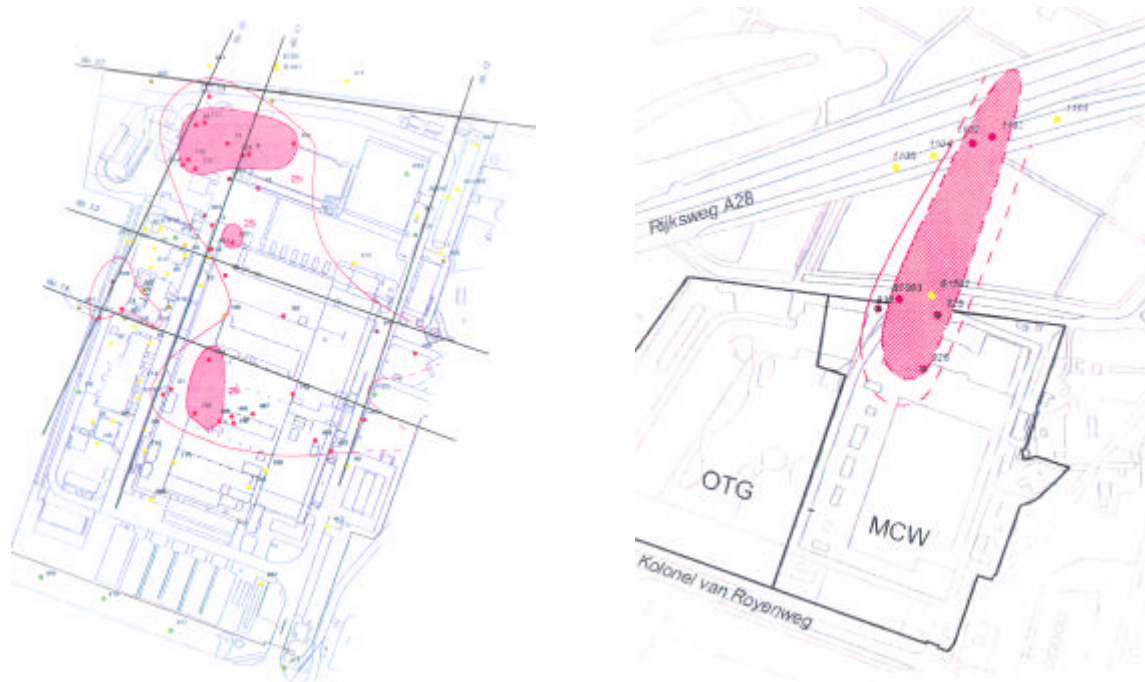


Fig. 21. Locatie te Leusden: grondwaterverontreiniging met Per (links tot 10 m-mv, rechts van 50 - 145 m-mv).

De praktijk wijst echter ook uit dat er nogal eens fouten worden gemaakt (verspreiden van puur product, verkeerde interpretatie van gegevens, enz.). In figuur 22 is, gebaseerd op informatie uit het verkennend en nader onderzoek, een dwarsprofiel weergegeven van de grondwaterverontreiniging met Per op de locatie te Austerlitz.

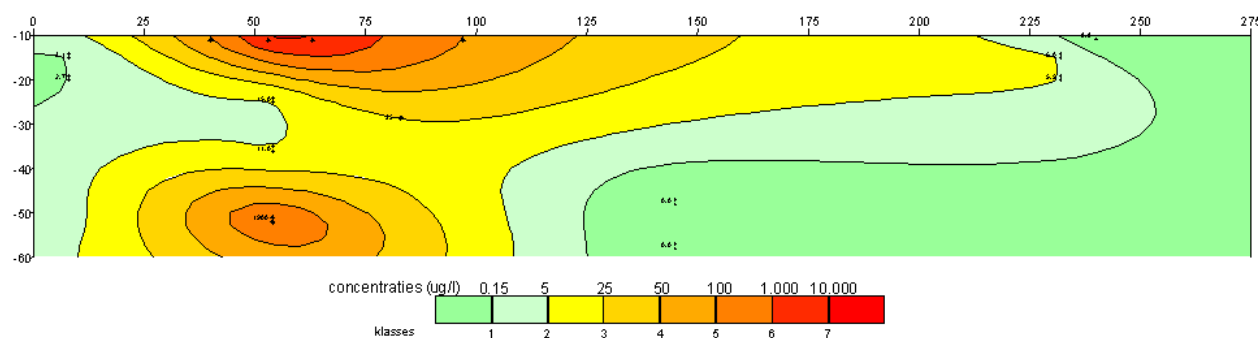


Fig. 22. Dwarsprofiel van de verontreinigingssituatie te Austerlitz.

In de eerste fase van het nader onderzoek is in het vermoedelijke brongebied, ter plaatse van peilbuis 201, op een diepte van 51 - 52 m-mv een gehalte van 1.900 µg/l aan tetrachlooretheen in het grondwater aangetoond. Het feit dat verhoogde gehalten aan Per gemeten zijn op een diepte van circa 50 m-mv, gecombineerd met de sterk verhoogde gehalten in het ondiepe grondwater, duidt erop dat puur product in de bodem moet zijn terechtgekomen, dat zich naar diepere bodemlagen heeft verplaatst.

Het voorkomen van een sterk verhoogde concentratie (1.900 µg/l) op grotere diepte kan echter ook op een andere manier worden verklaard. Mogelijke oorzaken kunnen zijn:

- contaminatie tijdens het uitvoeren van de boorwerkzaamheden;
- permeatie van de stijgbuis in de bronzone;
- lekkage ter plaatse van de verbindingen tussen de stijgbuizen.

Deze hypothese is in eerste instantie getoetst door het uitvoeren van een heranalyse van een aantal peilbuizen. Uit de analyseresultaten is gebleken dat de concentratie in het filter van 51 - 52 m-mv van peilbuis 201 zeer sterk is afgenomen (tot 47 µg/l), terwijl in de filters van peilbuis 302 (circa 90 m stroomafwaarts van de bron) licht verhoogde gehalten worden gemeten. Boring 201 is verricht in augustus 1994 en boring 302 is verricht in maart 1996. Tijdens de eerste bemonsteringsronde, uitgevoerd in mei 1996, zijn in het grondwater van peilbuis 302 geen verhoogde concentraties aan tetrachlooretheen aangetoond. Uit de herbemonstering van juli 1998 blijkt dat in de filters van peilbuis 302 (47,0 - 48,0 m-mv en 57,0 - 58,0 m-mv) licht verhoogde concentraties (respectievelijk 2,8 en 2,4 µg/l) zijn aangetoond. De afstand tussen peilbuis 201 en peilbuis 302 bedraagt ruim 90 m. Uitgaande van de stromingssnelheid van het grondwater (circa 25 m/jaar) en conservatief transport van de verontreiniging in het watervoerende pakket kan de verontreiniging op circa 50 m diepte worden verklaard door het feit dat er tijdens het uitvoeren van de boorwerkzaamheden van peilbuis 201 contaminatie heeft plaatsgevonden.

#### 4.3 **Karteren van een complexe bodemopbouw tot circa 30 m**

##### *Doel*

Het identificeren van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen door:

- vaststellen van de continuïteit van scheidende lagen;
- bepalen van de scheefstelling van lagen;
- aantonen van heterogeniteiten.

##### *Werkwijze*

De methodiek bestaat uit het combineren van georadar en sonderingen. Allereerst moet worden overwogen of de technieken kunnen worden ingezet. Voorafgaand aan de implementatie van georadar moet duidelijk zijn of er ondiep geen sprake is van zeer geleidende gronden, dikke kleilagen of brak grondwater of dat er andere geleidende elementen (kabels en leidingen enz.) aanwezig zijn. Voor de toepasbaarheid van sonderingen geldt met name de randvoorwaarde of het terrein toegankelijk is voor een sondeertruck.

Met de georadar moeten minstens twee dwarsprofielen worden verkregen. In het algemeen zal een dwarsprofiel worden uitgezet in de stromingsrichting van het grondwater en de tweede daar loodrecht op. In het geval dat georadar wordt ingezet in gestuwd gebied wordt één tracé uitgezet in de vermoedelijke stuwingsrichting en de andere daar loodrecht op (strekingsrichting). Afhankelijk van de mate van complexiteit (heterogeniteit) kan het nodig zijn om meer tracés uit te zetten. De tracés moeten zoveel mogelijk langs bestaande boringen worden geprojecteerd, zodat een eenduidige interpretatie van de radardata wordt verkregen. De benodigde lengte van de radartracés is locatiespecifiek en mede afhankelijk van de a priori kennis over de bodemopbouw.

Indien georadar niet kan worden toegepast op een locatie of niet de gewenste diepte bereikt, biedt het uitvoeren van sonderingen een alternatief. De sondeergegevens (in digitale vorm) van verschillende sonderingen en boringen in het gebied kunnen worden gebruikt voor een stochastische analyse van de bodemopbouw.

### *Evaluatie*

Het grote voordeel van georadar is dat er een continu tweedimensionaal beeld van de bodemopbouw wordt verkregen. Hiermee wordt alle onzekerheid weggenomen ten aanzien van de continuïteit en scheefstelling van lagen. Het nadeel is dat onder de grondwaterspiegel binnen een zandpakket weinig onderscheid kan worden gemaakt tussen de verschillende zandlagen.

Georadar is op de locatie te Austerlitz ingezet, omdat hier scheefstelling werd vermoed. De scheefstelling is niet op de locatie zelf aangetroffen, maar echter enige honderden meters naar het oosten (zie fig. 23). De sectie toont de overgang van horizontale fluvioglaciale afzettingen in het westen naar de scheefstaande afzettingen in het oosten. Lang niet overal worden in gestuwde gebieden dergelijke fraaie structuren afgebeeld. Op veel plaatsen zijn gestuwde afzettingen namelijk zodanig verstoord, dat het reflectiepatroon wordt overheerst door chaotische reflecties met veel diffractiehyperbolen.

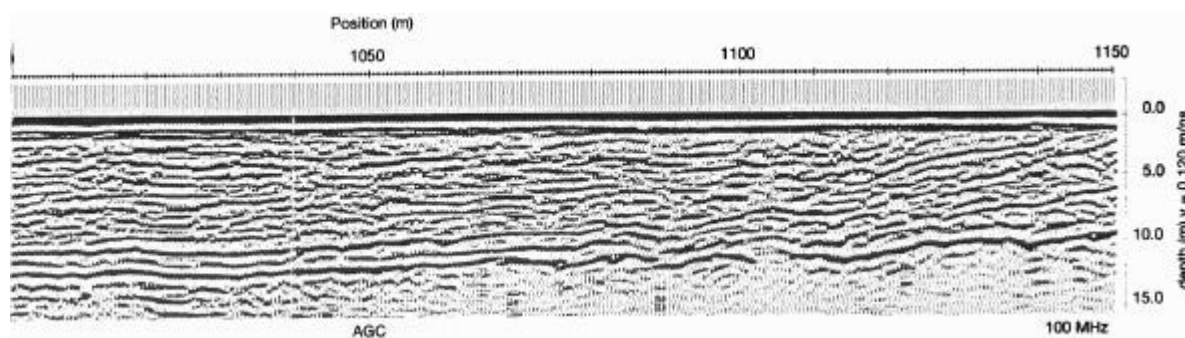


Fig. 23. Georadarsectie te Austerlitz (links het westen, rechts het oosten).

Voorbijgaand aan de eventuele verschillen in betrouwbaarheid en nauwkeurigheid zijn sondeergegevens vanwege de meetschaal en de continuïteit van de metingen zeer geschikt om de bodemopbouw te karakteriseren naar kenmerken die voor de processen die DNAPL-verspreiding bepalen van belang zijn. In figuur 24 is de schematische weergave van de bodemopbouw te Tilburg weergegeven.

De afzonderlijke sondeerprofielen zijn gepositioneerd in het horizontale vlak en de verschillen tussen de verticaal ingedeelde profielen geven daarmee een indruk van de verschillen in horizontale richting. Anders dan voor de verticale richting is de informatie over de verschillen in horizontale richting echter niet continu maar incidenteel. Er is slechts hier en daar een sondering verricht. De informatiedichtheid in het horizontale vlak kan weliswaar worden vergroot door meer sonderingen uit te voeren maar bereikt daarmee nooit het dichtheidsniveau van de verticale richting. Principieel blijven in horizontale richting bodemgedeelten over waar de bodemkarakterisering niet is gebaseerd op meetgegevens ter plekke maar op interpretatie van meetgegevens in de meer of minder directe omgeving. Deze interpretatie gaat gepaard met onzekerheid.

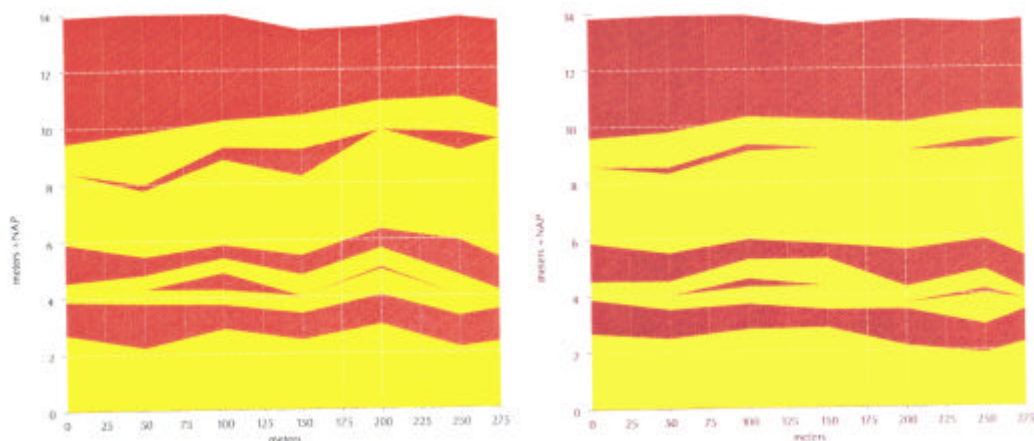


Fig. 24. Interpretatie van de bodemopbouw op basis van sondeergegevens te Tilburg.

Het voordeel van het bepalen van de bodemopbouw met sonderingen is dat het een gemakkelijk uitvoerbare en betaalbare methode is om een relatief gedetailleerd beeld van de bodem te verkrijgen. In tegenstelling tot georadar wordt tevens inzicht verkregen in de verschillen in penetratieweerstand (te vertalen naar pakkingsdichtheid) binnen zandpakketten.

#### 4.4 Karteren van een complexe bodemopbouw vanaf circa 30 m

##### *Doel*

Het identificeren van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen door:

- vaststellen van de continuïteit van scheidende lagen;
- bepalen van de scheefstelling van lagen;
- aantonen van heterogeniteiten.

##### *Werkwijze*

De methodiek bestaat uit het combineren van hoge resolutie seismiek en (bekende) boorgegevens. Allereerst moet worden overwogen of HRS kan worden ingezet. Voorafgaand aan de implementatie moet duidelijk zijn of er geen sprake is van veenlagen met aanzienlijke dikte. Daarnaast moet bij een diepe grondwaterstand (> 12 m), hetgeen de kosten aanzienlijk verhoogd, een afweging worden gemaakt of de kwaliteit van de informatie in verhouding staat tot de kosten. Het kan aantrekkelijker zijn om een aantal diepe pulsboringen uit te voeren.

Voor de HRS-metingen worden twee dwarsprofielen uitgezet. In het algemeen zal een dwarsprofiel worden uitgezet in de stromingsrichting van het grondwater en de tweede daar loodrecht op. In het geval dat HRS wordt ingezet in gestuwd gebied wordt één tracé uitgezet in de vermoedelijke stuwingsrichting en de andere daar loodrecht op (strekingsrichting). Afhankelijk van de mate van complexiteit (heterogeniteit) kan het nodig zijn om meerdere tracés uit te zetten.

Langs de tracés worden om de circa 8 m boorgaten gespoten tot net onder de grondwaterpiegel. In de boorgaten wordt een kleine hoeveelheid springstof aangebracht. Langs de tracés worden vervolgens geofoons geplaatst. De tracés moeten zoveel mogelijk langs bestaande boringen worden geprojecteerd, zodat een eenduidige interpretatie wordt verkregen. De benodigde lengte van de tracés is locatiespecifiek en mede afhankelijk van de a priori kennis over de bodemopbouw.

### Evaluatie

Het grote voordeel van HRS, in vergelijking met boringen, is dat er een continu tweedimensionaal beeld van de bodemopbouw wordt verkregen. Hiermee wordt alle onzekerheid weggenomen ten aanzien van de continuïteit en scheefstelling van lagen. Afhankelijk van de geologische situatie is de representativiteit van een boormonster beperkt van enkele decimeters tot enkele meters rondom het boorgat. Laterale continuïteit van de lagen kan alleen worden vastgesteld bij een hoge dichtheid van boringen. Hetzelfde probleem doet zich voor bij een gestuwde bodemopbouw. Over het algemeen kan de hellingshoek variëren tussen de 10 en 80 graden. Naarmate je verder van het gestuwde gebied verwijderd bent, kan de stuwning overgaan in plooiing. Het zal duidelijk zijn dat de aard van de stuwning op lokale schaal kan afwijken van deze algemene kenmerken. Het afleiden van de helling van gestuwde lagen door het correleren van boringen en sonderingen heeft slechts een beperkte praktische waarde [Ruegg en Van de Wateren, 1981]. In de praktijk blijkt dit vaak onuitvoerbaar, tenzij kleilagen goed te vervolgen zijn. Om een scheefgestelde laag met een helling van 45 graden over een diepte van 50 m te kunnen volgen, moeten minimaal drie diepe boringen/sonderingen binnen een afstand van 50 m liggen.

HRS is getest op de locatie te Austerlitz. De regionale gegevens geven aan dat er grote laterale variaties in de formaties verwacht mogen worden. Op het geologisch profiel is een breuk aangegeven nabij de onderzoekslocatie. Deze breuk heeft een richting NW-ZO en is een verlengde van het peelrandbreuksysteem en heeft een invloedssfeer tot ongeveer 25 m-mv. Ten westen en ten oosten van de breuk gelden verschillende formaties en diepten. Tevens zou de ondergrond mogelijk kunnen bestaan uit gestuwde pleistocene formaties met scheefstelling. De regionale bodemopbouw en geohydrologie is afgeleid uit beschikbare regionale gegevens. Het resultaat hiervan is in tabel 6 schematisch weergegeven.

Tabel 6. Bodemopbouw en geohydrologie.

formatie	geohydrologie	veronderstelde diepte (m-mv)		typering
		west	oost	
Drente	eerste watervoerende pakket	0 - 22	0 - 24	grove grindhoudende zanden
Urk	uitwiggende scheidende laag, plaatselijk niet aanwezig	-	24 - 33	grove zanden, soms met grind, op een bepaald niveau ook dikke veen- en kleilagen
Sterksel	uitwiggende scheidende laag, plaatselijk niet aanwezig	22 - 30	33 - 48	grove zanden en grinden met zeer plaatselijk kleilagen
Kedichem	tweede watervoerende pakket	30 - 42	-	fijne zanden en kleien
Harderwijk	derde watervoerende pakket	42 - 93	48 - 100	grove zanden met zeer fijn grind
Tegelen	scheidende laag	93 - 105	100 - 127	kleien, zanden en grinden
Maassluis	vierde watervoerende pakket	105 - 156	127 - 178	zanden (schelphoudend) met ingeschakelde kleilichamen

De interpretatie van de HRS-gegevens is weergegeven in figuur 25. Uit figuur 25 blijkt dat de ondergrond op en rond de locatie te Austerlitz wordt gekarakteriseerd door een horizontale laagopbouw, die grotendeels uit zand en grind bestaat en waarin slecht doorlatende afzettingen met enige laterale verbreiding ontbreken. Het bovenste deel van dit pakket, tot circa 22 m-mv, bestaat uit een afwisseling van fijn en grof zand. Hieronder bevindt zich een grofzandige laag. Op het traject 45 - 60 m-mv bevindt zich een niet-continue kleilaag met daaronder 10 m fijn zand met kleilaagjes. Tot 120 m-mv is vervolgens grof zand aanwezig met op 120 m-mv de eerste continue ondoorlatende laag. HRS heeft op deze locatie een duidelijke meerwaarde. Het nadeel is dat binnen de zandpakketten weinig onderscheid kan worden gemaakt in de verschillende gradaties zand.



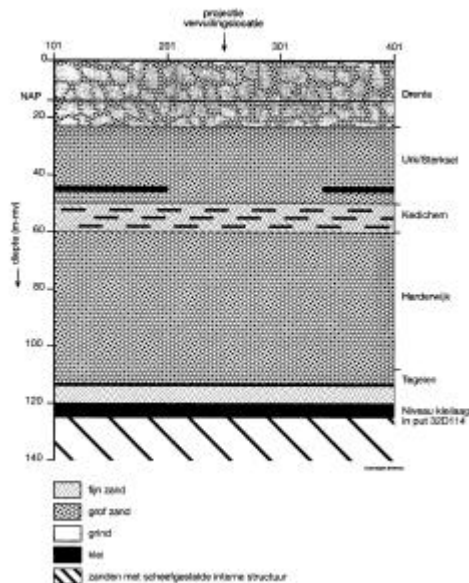


Fig. 25. Interpretatie van HRS.

#### 4.5 Verticale detaillering van de bron tot circa 30 m

##### *Doel*

De bodem in verticale richting onderverdelen in bodemlagen met zinklagen, residuaire verzadiging, opgeloste verontreiniging en schone lagen.

##### *Werkwijze*

In een raai loodrecht op de grondwaterstromingsrichting worden een aantal meetlocaties uitgezet. Het aantal meetlocaties is locatiespecifiek en wordt bepaald door onder andere de breedte van de grondwaterpluim en de variatie in de stromingsrichting (in verband met trefkans).

Op elke meetlocatie wordt eerst een sondering uitgevoerd. Op basis van de sondeergrafiek wordt een bemonsteringsstrategie bepaald voor de grondwatermonstersonde. Monsters worden genomen net boven slecht of minder doorlatende lagen of boven lagen met een hoge penetratieweerstand (hoge pakkingsdichtheid). Aanbevolen wordt om tevens in lange trajecten, waarin geen specifieke lagen zijn te onderscheiden, een aantal monsters met de grondwatersonde te nemen. De monsters worden vervolgens geanalyseerd in het laboratorium. De methodiek kan worden verfijnd door gebruik te maken van een mobiele GC, zodat direct op de locatie inzicht ontstaat in het concentratieprofiel.

##### *Evaluatie*

De methodiek is getest op de locatie te Austerlitz. Op basis van de sondeergrafieken is een bemonsteringsstrategie bepaald voor het inzetten van de 'Conesipper'. Uit de sondeercurves konden, in de directe omgeving van het vermoedelijke brongebied, geen slecht doorlatende lagen worden afgeleid. Wel zijn plaatselijk toenemende siltige tot lemige fracties waarneembaar (sliblensjes). Uit de sonderingen blijkt dat de bodem overwegend is opgebouwd uit een matig fijn tot grof zandpakket. Wel is er sprake van een sterk wisselende pakkingsdichtheid binnen eenzelfde bodemlaag, die mogelijk bepalend is geweest voor de verspreiding van puur product. In alle sonderingen worden vanaf een diepte van circa 19 m-mv sterk gecompacteerd zandlagen (conusweerstand hoger dan 30 Mpa) aangetroffen met een beperkte dikte. De bemonsteringsstrategie is dan ook afgestemd op de lagen met sterk wisselende pakkingsdichtheden. Hierbij zijn de monsters geselecteerd op diepten juist boven en/of onder de piekwaarden in de conus-

weerstand. Met de Conesipper zijn, in de directe nabijheid van de sonderingen, op 5 locaties meervoudige grondwaterbemonsteringen uitgevoerd vanaf het actuele grondwatervniveau (circa 10 m-mv) tot circa 28 m-mv. De analyseresultaten van de metingen met de Conesipper zijn in figuur 26 verwerkt tot concentratieprofielen als functie van de diepte.

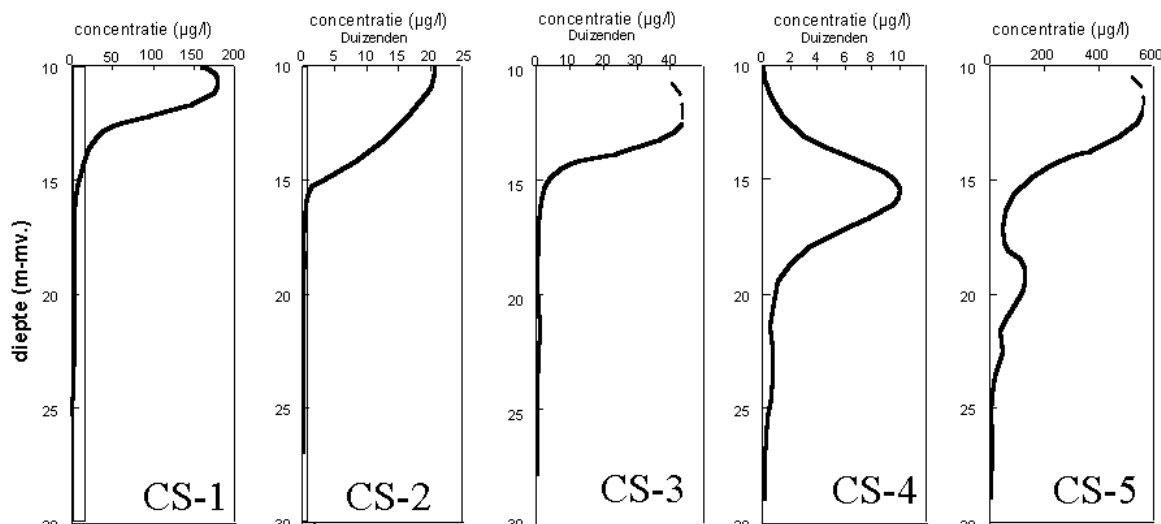


Fig. 26. Concentratieprofielen verkregen met de Conesipper te Austerlitz.

Opvallend in de resultaten zijn de gemeten pieken. Vooral in CS-2, CS-3 en CS-4 is dit fenomeen te zien. In CS-2 wordt op 10,5 m-mv 21.000 µg/l Per gemeten, 4 meter lager een concentratie van 7.500 µg/l (een afname van 60 %) en nog een meter lager 1.200 µg/l (een afname van 95 %). In CS-3 is het verschijnsel nog sterker. Op 12,5 m-mv wordt 44.000 µg/l Per gemeten, 2 meter dieper nog slechts 1.650 µg/l (een afname van 95 %). In CS-4 wordt een toename gezien, gevolgd door een afname. Op 11 m-mv wordt 47 µg/l gemeten, 4,5 meter dieper wordt 10.000 µg/l gemeten (200 x zoveel). Nog weer een meter dieper is alweer een reductie zichtbaar tot 2.150 µg/l (een afname van 80 %).

De resultaten duiden op de aanwezigheid van zinklaagjes (residuaire zones). Klaarblijkelijk met name bovenin het pakket, hetgeen wijst op mogelijke uitputting van de bron. Uit het bovenstaande ontstaat het beeld van een verspreiding van puur product die stopt in het bovenste pakket op een diepte van circa 15 m-mv. Indien de verspreiding zich in dit pakket had doorgezet, waren er tevens 'pieken' in de metingen tot circa 19 m-mv geconstateerd. Indien de pure DNAPL daar toch doorheen was gemigreerd, waren naar alle waarschijnlijkheid pieken in de daaronder gelegen grofzandige laag geconstateerd boven sterk gepakte lagen of slechter doorlatende heterogeniteiten. Deze pieken zijn met de niet-permanente metingen tot een diepte van 29 m-mv niet aangetoond.

#### 4.6 Verticale detaillering van de bron vanaf circa 30 m

##### Doel

De bodem in verticale richting onderverdelen in bodemlagen met zinklagen, residuaire verzadiging, opgeloste verontreiniging en schone lagen.

##### Werkwijze

Om een gedetailleerd beeld te verkrijgen van de bron over een grote diepte wordt gebruik gemaakt van gedifferentieerd onttrekken (zie fig. 27). Door te onttrekken uit zoveel mogelijk filters in de verticaal kan dit verticale concentratieprofiel zo gedetailleerd mogelijk worden vastgesteld en

daarmee wordt inzicht in de verticale positie van het product verkregen. Gedifferentieerd onttrekken is een cyclisch saneringsconcept, waarbij bewust gebruik wordt gemaakt van de resultaten van een vroegtijdig geïmplementeerde geohydrologische beheersmaatregel.

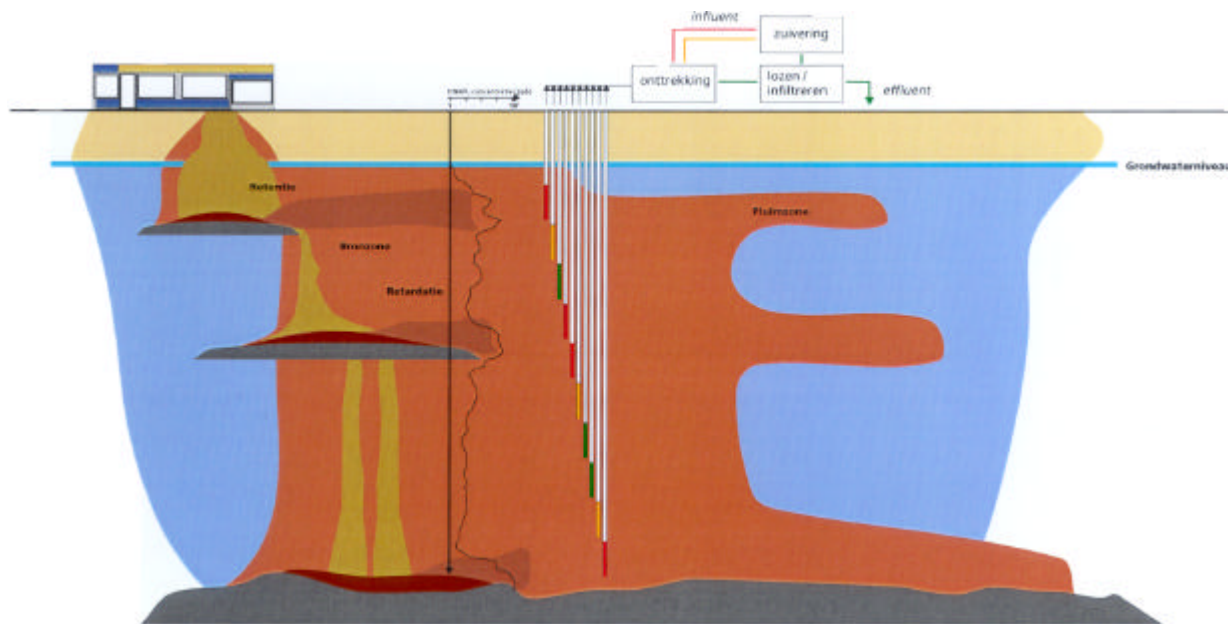


Fig. 27. Werkingsprincipe van gedifferentieerd onttrekken.

De volgende stappen moeten worden uitgevoerd:

- het ontwerpen van een locatiespecifiek gedifferentieerd onttrekkingsstelsel;
- implementatie;
- monitoring en interpretatie;
- optimaliseren van het systeem.

Voor de ontwerpssystematiek wordt verwezen naar het deelrapport 'Gedifferentieerde onttrekking te Leusden: Voorbereiding en systeemontwerp' (januari 1999) (zie bijgevoegde cd-rom).

#### *Evaluatie*

De methodiek is geïmplementeerd op de locatie MCW te Leusden. In een puls boring met een diameter van 550 mm zijn over het traject van 12 tot 65 m-mv 11 onttrekkingsfilters (filterlengte 3 m) geplaatst. Tussen de onttrekkingsfilters zijn kleipropen van 1 m aangebracht. Tijdens de boring zijn de nodige problemen ondervonden in verband met de grote boordiameter. Aanbevolen wordt om in het vervolg, bij het plaatsen van een groot aantal filters in één boorgat, gebruik te maken van een zuigboring (let op: verspreidingsrisico in geval van plaatsing dicht bij de bronzone) of van twee of meer pulsborings. In de diepere pakketten zijn met twee aparte boringen deepwells geplaatst met een filterlengte van 10 m.

In figuur 28 zijn het concentratieverloop zoals bepaald met peilbuizen voorafgaand aan de gedifferentieerde onttrekking, de filterstelling en de eerste monitoringsresultaten van de onttrekking weergegeven.

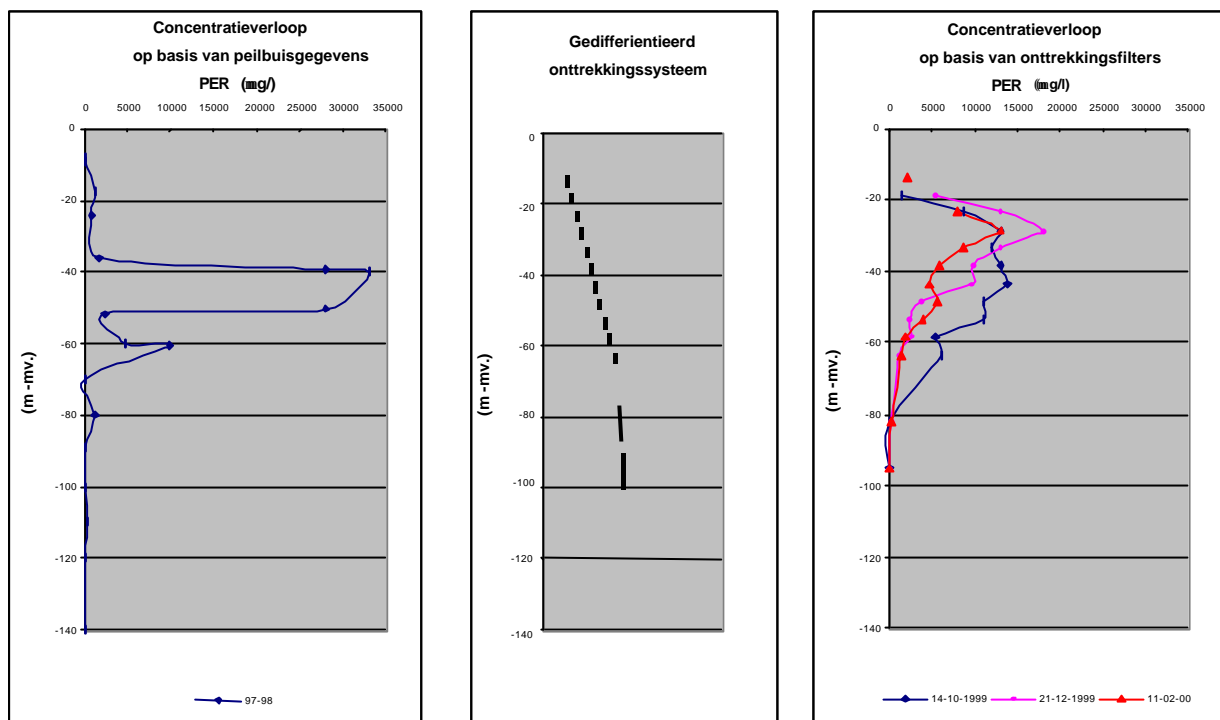


Fig. 28. Implementatie van gedifferentieerde onttrekking te Leusden.

De gedifferentieerde onttrekking is begin oktober 1999 opgestart. Half oktober en vervolgens na 2 en 4 maanden hebben monitoringsronden plaatsgevonden. Hoewel het systeem nog maar gedurende een korte periode in werking is, zijn de resultaten veelbelovend. Een duidelijke 'profilering' van de concentraties is waar te nemen.

In het bovenste deel van het pakket (tot circa 40 m-mv) nemen de concentraties toe, terwijl in de dieper liggende lagen de concentraties afnemen. Het lijkt erop dat puur product met name aanwezig is bovenin het pakket. Het is echter nog te vroeg om definitieve conclusies te trekken. De resultaten zullen in een latere rapportage worden gepubliceerd.

Het gedifferentieerd onttrekkingssysteem wordt in beginsel (gedeeltelijk) gebruikt voor de permanente beheersing van de bronzone en is daarmee de eerste stap in dit traject. Op het moment dat de bronzone in kaart is gebracht, kan eventueel een op vrachtverwijdering gerichte saneringstechniek worden toegepast, bijvoorbeeld spoelen met surfactants. Een belangrijke randvoorwaarde voor het succesvol toepassen van deze methodiek is dat er voldoende tijd beschikbaar is.

#### 4.7 Horizontale detaillering van de bron met matig detail (tot circa 30 m)

##### *Doel*

Horizontale inkadering van de bronzone met redelijke betrouwbaarheid.

### *Werkwijze*

In principe wordt gebruik gemaakt van de methodiek van een nader onderzoek. Het verschil is dat gebruik wordt gemaakt van een niet-permanente meettechniek:

- sonderingen voor het bepalen van bemonsteringsdiepte;
- grondwatersonde voor het nemen van grondwatermonsters;
- mobiele GC om direct op basis van analyseresultaten de volgende monsterlocatie te kunnen bepalen.

Voor de systematiek van het werken met een combinatie van sonderingen en de grondwater-sonde wordt verwezen naar 4.5.

### *Evaluatie*

Deze methodiek is in het kader van DNAPLKAR niet als zodanig getoetst. De methode van afperken is echter in feite een bewezen aanpak. De aanpak wordt geoptimaliseerd door het specifiek bemonsteren direct boven 'verdachte' laagovergangen (optimalisatie verticaal) en het direct on-site analyseren van monsters, zodat gericht de volgende meetlocatie kan worden bepaald (optimalisatie horizontaal).

Ondanks dat deze wijze van afperken algemeen geaccepteerd is, zijn er wel enige kanttekingen te plaatsen. Deze methode is namelijk met name geschikt voor het afperken in stroomopwaartse richting en loodrecht daarop. In deze richtingen is over het algemeen een scherpe afname in concentraties waar te nemen. In stroomafwaartse richting van de bronzone is de grens tussen bron- en pluimzone echter regelmatig slechts zeer arbitrair aan te geven. Dit komt doordat de concentraties stroomafwaarts van een zinklaag, direct boven een slecht doorlatende laag, over grote afstand nauwelijks verdunnen. Hierdoor kunnen op vele tientallen meters van de bron nog concentraties worden gemeten die aanzienlijk hoger zijn dan 10 % van de oplosbaarheidswaarde (waarde die vaak wordt gehanteerd als indicatie voor de aanwezigheid van puur product, zie 2.3.2).

## **4.8 Horizontale detaillering van de bron met hoog detail**

### *Doel*

Horizontale inkadering van de bronzone met hoge mate van betrouwbaarheid.

### *Werkwijze*

Dynamische monitoring is een interpretatiemethode van concentratiemetingen waarbij de gemeten concentraties in grondwatermonsters (peilbuizen, minifilters, onttrekkingsputten) worden gerelateerd aan de herkomst van het bemonsterde grondwater. Door de grondwaterstroming ten gevolge van grondwateronttrekking van richting te veranderen, kan uit dezelfde peilbuis grondwater worden bemonsterd dat afkomstig is uit een ander gebied (zie fig. 29).

De supportschaal van een puntmeting - het volume grondwater waaraan een puntmeting kan worden gekoppeld - wordt hierdoor substantieel vergroot. Door metingen van verschillende peilbuizen op die manier te interpreteren, kan een indicatie worden verkregen van de locatie van een bronzone.

Voor de ontwerp- en interpretatiesystematiek wordt verwezen naar het deelrapport 'Dynamische monitoring te Tilburg' (juli 1999) (zie bijgevoegde cd-rom).

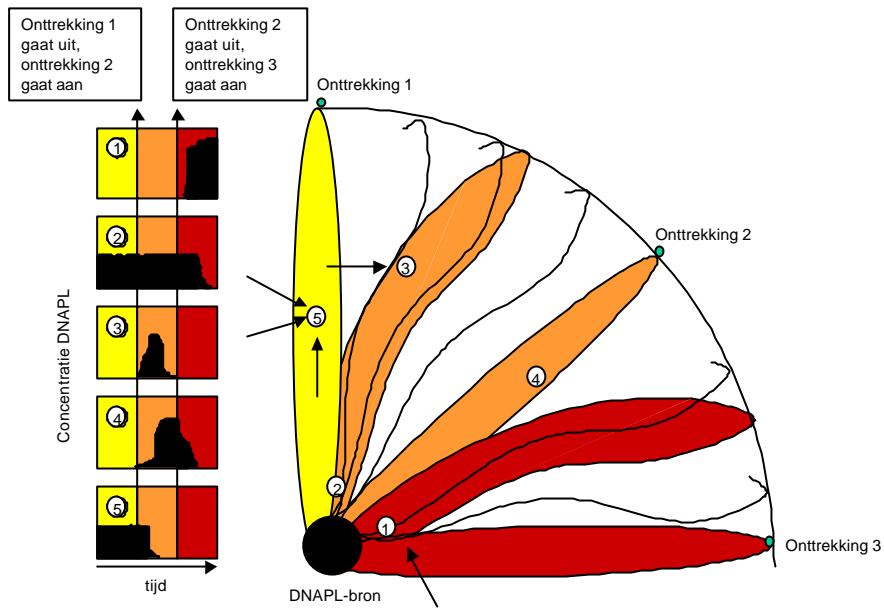


Fig. 29. Werkingsprincipe van dynamische monitoring.

### Evaluatie

Dynamische monitoring is door Pankow en Cherry [1996] ontwikkeld als hulpmiddel om stagnerende 'pump & treat' saneringen bij DNAPL-verontreinigde locaties te herdimensioneren. In de loop van een sanering zal de pluim van verontreinigd grondwater, die ontstaan is als gevolg van natuurlijke grondwaterstroming, krimpen tot een zeer smalle pluim van de bronzone (DNAPL) naar het onttrekkingsmiddel. Dit geldt wanneer de onttrekking stroomafwaarts van de bron is geplaatst (zie fig. 30).

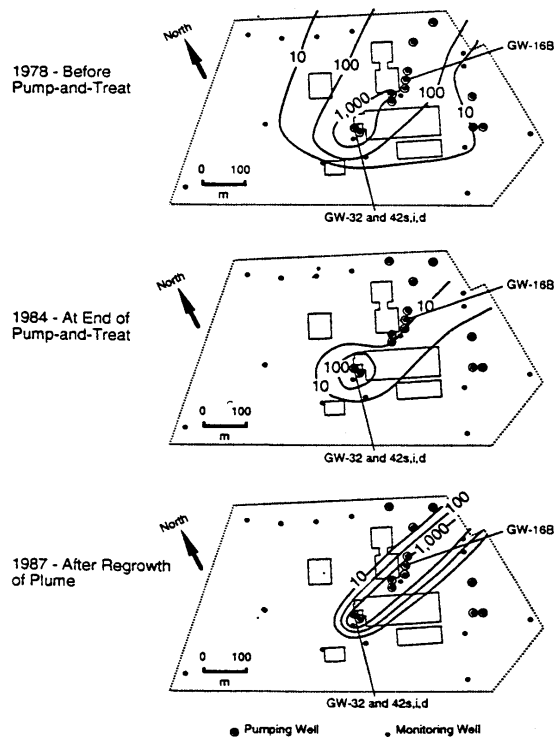


Fig. 30. Onttrekking als dynamische monitoring [naar Pankow en Cherry, 1996].

Binnen het project DNAPLKAR is de methodiek uitontwikkeld om te komen tot een scheiding van bronzone (DNAPL) en pluimzone en daarmee tot een optimale aanpak van een DNAPL-locatie. Dynamische monitoring kan worden toegepast tijdens (stagnerende) grondwatersaneringen met het doel de effectiviteit te verhogen.

Interessanter is het dynamische monitoring te integreren in een (cyclisch) onderzoek naar de positie van de DNAPL in de bodem in plaats van een traditionele aanpak van oriënterend onderzoek tot bestek en uitvoering te volgen. De kans op het bepalen van de positie van DNAPL's is bij zo'n cyclische werkwijze groter. Een cyclisch onderzoek van een DNAPL-locatie bestaat uit het opstellen van een grof conceptueel model, op basis van een globale verkenning, dat vervolgens op basis van grondwateronttrekking volgens een bepaald pompregime en dynamische monitoring van concentratiemetingen wordt bijgesteld.

Dynamische monitoring is getest op de locatie te Tilburg. Het betreft een stagnerende grondwatersanering. Op de monitoringsgegevens is met terugwerkende kracht de methodiek toegepast. De verkregen resultaten zijn het vertrekpunt geweest voor een periode van actieve dynamische monitoring. Gedurende twee periodes van een half jaar zijn onder onderscheidende onttrekkingsregimes concentratiemetingen uitgevoerd. Ten behoeve hiervan zijn aanvullende monitoringsfilters geplaatst. In figuur 31 is de samenhang tussen de concentratiemetingen en de diverse stromingssituaties van het grondwater geïllustreerd. Duidelijk zijn een aantal gebieden te onderscheiden waar wel of geen puur product aanwezig is. Indien een scherpere afbakening gewenst is, moeten of een aantal peilbuizen worden bijgeplaatst of nieuwe stromingssituaties aan het systeem worden opgelegd. Voor het slagen van de methodiek is tijd een onmisbare factor.



Fig. 31. Dynamische monitoring te Tilburg.

## HOOFDSTUK 5

### DNAPLKLAR IN DE PRAKTIJK

#### 5.1 Inleiding

Vooralsnog zijn vooral de technische problemen besproken die bij de aanpak van DNAPL-locaties naar voren komen. Het algemene gedrag van DNAPL's (concept) is behandeld en er is ingegaan op de toepassing van die kennis om een beeld van de problematiek op een locatie te krijgen (conceptueel model). In het daaropvolgende hoofdstuk is een gereedschapskist van toepasbare technieken gepresenteerd. Een en ander heeft geresulteerd in methodieken om de bronzone te karakteriseren. Deze methodieken zijn getoetst in de praktijk en de ervaringen zijn beschreven.

Het toepassen van de kennis en methodieken in een praktijkgeval vraagt nog extra input. Zo speelt de fase waarin een project zich bevindt een rol en de saneringstechnieken die voor de oplossing van een probleem kunnen worden ingezet.

In de onderstaande paragrafen wordt allereerst ingegaan op saneringstechnieken, waarbij wordt ingezoomd op de eisen die dergelijke technieken aan het karteren van de bronzone en de bodemopbouw stellen. Vervolgens wordt per projectfase getracht van de onderzochte methodieken aan te geven welke kunnen worden toegepast en waarom. Hierbij wordt een relatie gelegd met saneringstechnieken.

#### 5.2 Saneringstechnieken

Op basis van het conceptueel model en enkele karakteristieken van saneringsvarianten (a priori kennis) kan al snel een beeld worden verkregen van potentiële saneringstechnieken.

Wanneer een pluim zich slechts zeer beperkt verspreidt en de gehalten in de pluim daarbij acceptabel blijven, is een volledig extensieve variant (NA) een optie. In een dergelijke variant wordt feitelijk alleen gemonitord of de verspreiding en gehalten werkelijk laag blijven. In veel gevallen echter is de DNAPL doorgedrongen in watervoerende pakketten. In deze pakketten stroomt het water over het algemeen snel en is verspreiding onvermijdelijk. Hierbij is dan een meer intensieve aanpak noodzakelijk.

Het concept van DNAPLKLAR stelt dat deze intensievere aanpak zich allereerst op de bron moet richten. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om de pluim zoveel (extensief) mogelijk te verwijderen. In vele onderzoeksprojecten zijn diverse saneringstechnieken daarvoor nader op hun potentie onderzocht. Met name de biologische variant heeft bewezen in veel gevallen een prima optie te zijn. Dergelijke varianten behalen bij afscherming van de bron over het algemeen binnen een acceptabele tijd het gewenste resultaat.

Het doel van de bronaanpak is daarmee het voorkomen van een frustrerende werking op de sanering van de pluim. Dit kan op twee manieren: het verwijderen van de DNAPL, of het tegengaan van verspreiding. Het verwijderen van de DNAPL wordt in Nederland nog niet al te veel toegepast. Vooralsnog worden mondjesmaat voor de ondiepe verontreinigingen in Nederland technieken toegepast om de vracht in de bron zodanig te reduceren dat de maatregel op termijn kan worden gestaakt. Dit omdat voor een effectieve toepassing hiervan, een bijzonder goede kartering van de bronzone en de bodemopbouw noodzakelijk zijn en dit zeer kostbaar (en vrijwel onmogelijk) is voor grotere diepten.



In de meeste gevallen zullen saneringstechnieken gericht zijn op het voorkomen van verspreiding. Dit betekent een eeuwigdurende ingreep. Ook deze saneringstechnieken stellen eisen. Een isolatievariant wordt uit kosten oogpunt liefst zo krap mogelijk rondom de bron geplaatst, maar bij een te krappe plaatsing wordt de werking tenietgedaan. Naast de diepte van de bron is een goede laterale kartering van de bron dan essentieel. Van sommige varianten, zoals de geohydrologische variant, kan in de tijd het milieurendement worden geoptimaliseerd door een goede laterale en verticale kartering van de bron. Andere, zoals een reactieve barrière, maken gebruik van goedkope lang gaande processen en kennen relatief hoge implementatiekosten. Er is daarbij een minder nauwkeurige kartering nodig voor een resultaat met een bijzonder hoog milieurendement. In tabel 7 wordt een overzicht gegeven van de saneringstechnieken.

Tabel 7. Overzicht van de saneringstechnieken.

<i>karacteristieken</i>	<i>implementatiekosten</i>	<i>exploitatiekosten/jaar</i>	<i>tijd</i>	<i>energieverbruik/jaar</i>	<i>waterverbruik/jaar</i>	<i>emissies andere milieus</i>	<i>horizontale detaillering bron</i>	<i>verticale detaillering bron</i>	<i>bodemopbouw</i>	<i>toepassingsdiepte m-mv</i>	<i>beperkingen</i>
<i>ontwerp</i>											
geohydro	laag	hoog	oneindig	hoog	hoog	hoog	matig	matig	matig	-	K-waarde
civ. isolatie	hoog	matig	oneindig	matig	matig	matig	hoog	laag	laag	30	ruimt. inrich.
react. barrière	hoog	laag	oneindig	laag	geen	geen	matig	laag	matig	20	O <sub>2</sub> / NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
stomen/strippen	matig	hoog	eindig	hoog	geen	hoog	hoog	hoog	hoog	15	hor. heterogeen
surfactants	matig	hoog	eindig	hoog	matig	hoog	hoog	hoog	matig	-	K-waarde
natuurlijke afbraak	laag	laag	oneindig	geen	geen	geen	laag	laag	matig	-	bron/anaëroob/DOC

Legenda:

implementatiekosten

exploitatiekosten/jaar

tijd

energieverbruik/jaar

waterverbruik/jaar

emissies andere milieus

horizontale detaillering bron

verticale detaillering bron

bodemopbouw

toepassingsdiepte

beperkingen

kosten voor het aanbrengen van de 'hardware'

kosten voor de bedrijfsvoering en de monitoring

totale saneringsduur (incl. actieve nazorg)

verbruikte energie door pompen, zuiveringen en dergelijke

extra verontreinigd grondwater en onttrekking - infiltratie (zie RMK-handleiding)

finaal afval, oppervlaktewater en luchtemissie

lengte, breedte van de bron en het identificeren van meerdere bronnen

verticale verdeling van de bron (zinklagen, residuaire lagen en schone lagen)

verticale heterogeniteit van de bodem die van invloed is op de werking van de saneringstechniek (b.v. verticale stroming van lucht)

maximale diepte tot welke saneringstechniek uitvoerbaar is

kenmerkende beperkingen die bepalend zijn voor de toepasbaarheid van de saneringstechniek

### 5.3 Projectfase

Een project kent vele ontwikkelingsfasen en heeft in veel gevallen al een hele geschiedenis. Dit is vaak van grote invloed op het uitstippelen van de strategie. Over het algemeen zijn de volgende fasen in de bodemsanering te herkennen:

- oriënterend en nader onderzoek;
- aanvullend- en saneringsonderzoek;
- dimensionering, saneringsplan en bestek;
- aanbidding en implementatie;
- exploitatie en evaluatie.

De methodieken, die beschreven zijn in het voorgaande hoofdstuk, worden gebruikt in deze projectfasen. De ene methodiek past echter beter in de ene fase, de andere in een andere fase. In de volgende paragrafen wordt per onderzoeksfase ingegaan op de doelstelling van de fase en de algemene activiteiten die kenmerkend zijn voor de fase.

Vervolgens wordt aangegeven welke DNAPL-KAR-methodieken in de fasen kunnen worden toegepast en enkele praktische tips die vanuit het DNAPL-concept van belang kunnen zijn.

#### 5.3.1 *Oriënterend en nader onderzoek*

Het doel van deze fase is het vaststellen van de saneringsnoodzaak. Iedere project begint met een eerste fase die vooral gericht is op de definiëring van het probleem. Volgens protocol wordt het bodemonderzoek uitgevoerd, hetgeen leidt tot een uitspraak of sanering noodzakelijk is of niet. Te denken valt aan een oriënterend en nader onderzoek. Over oplossingen wordt nog niet gedacht. Het onderzoek is vooral gericht op de buitenste contouren in de vorm van concentraties en omvang van de verontreiniging (horizontaal en verticaal) en potentiële risico's.

#### 5.3.2 *Aanvullend onderzoek en saneringsonderzoek*

Het doel van deze fase is het selecteren van één of enkele saneringsvarianten. Als uit deze fase volgt dat er moet worden gesaneerd, begint de onderzoeksfase waarin specifiek over de aanpak van het probleem wordt gedacht. De opdrachtgever realiseert zich dat er nog teveel open einden zijn om reeds een calculatie te maken van de saneringskosten. Dat betekent dat gedacht wordt aan oplossingsrichtingen en de informatie die nodig is om daarover een uitspraak te doen. Het conceptuele model, dat tussen de oren van de adviseur leeft, mag worden aangevuld tot een niveau waarop een afweging kan worden gemaakt tussen de verschillende saneringsvarianten.

In deze fase worden de potentiële saneringsresultaten reeds vergeleken met de wensen van het bevoegd gezag en de opdrachtgever. De adviseur moet ervoor zorgdragen dat het gewenste resultaat realistisch is. Zoals is beschreven, zijn de technische knelpunten van DNAPL's complex. Afspraken over het resultaat moeten daarom vooral gericht zijn op het beschrijven van de gewenste eindsituatie in termen van risicoreductie, milieuverdiensite en beschikbare tijd, vooral niet in waarden zoals bijvoorbeeld terugsaneerwaarden. De risico's zijn de verspreiding van verontreinigd grondwater. Het milieurendement wordt bepaald door de hoeveelheid verbruikt grondwater, de omvang van de resterende verontreiniging, de emissies naar lucht en oppervlaktewater en het verbruik van energie.

Belangrijk is nu om het onderzoek uit te voeren gericht op de toepasbaarheid van saneringstechnieken. Sommige technieken kunnen met a priori kennis reeds worden afgeschreven, andere vereisen verdieping van het conceptueel model. Het onderzoek moet zodanig worden opgezet dat de toepasbaarheid van slechts enkele technieken overblijft als saneringsoptie om het gewenste saneringsresultaat te behalen. Van deze varianten kunnen kosten, risicoreductie en milieurendement met elkaar worden vergeleken (feitelijk worden de wensen van opdrachtgever en overheid 'op waarde gezet': wat is de verbeterde milieuverdiensite mij waard). Daarnaast moet de informatie worden verzameld die een verder ontwerp van de overgebleven technieken in saneringsvarianten mogelijk maakt.

De informatie ten aanzien van bronkartering is in deze fase vooral gericht op de informatie die voor alle, op basis van a priori kennis, toepasbare saneringstechnieken van belang is.

#### 5.3.3 *Dimensionering, saneringsplan en bestek*

Als een project in de ontwerpfasen komt, leeft de verwachting dat reeds voldoende onderzoek is verricht om oplossingsvarianten af te kunnen wegen en de optimale variant zodanig kan worden gedetailleerd dat een bestek kan worden opgesteld. Als de ontwerper tevens betrokken is geweest bij het voorafgaand onderzoek zal deze opgave niet tot onoverkomelijke problemen leiden. Als dit echter niet het geval is, zal de ontwerper moeten roeien met de riemen die hij heeft. Dat wil zeggen: hij moet inschatten of voldoende basisinput beschikbaar is en zijn ontwerp zo opstellen dat eventuele onzekerheden door flexibel ontwerpen kunnen worden opgevangen. De

knelpunten, die een dergelijke insteek dwarsbomen, zullen toch met een minimaal onderzoek moeten worden opgelost.

Hoe de situatie ook is, uitgangspunt van de ontwerper moet zijn dat het conceptueel model dat van de locatie bestaat inderdaad gebaseerd is op een concept en geen zekerheid is. Ontwerpen is omgaan met onzekerheden en het ontwerp moet zodanig zijn dat in de bedrijfsvoering op de onzekerheden kan worden geanticipeerd. Dit uitgangspunt impliceert dat gedurende de uitvoering nieuwe informatie ontstaat omtrent de verontreinigingssituatie. De factor tijd is hierbij zeer belangrijk. Een oneindig lange saneringsmaatregel betekent letterlijk het exploiteren van een maatregel gedurende honderd(en) jaar. Over deze gehele periode speelt de milieuverdiensite van een variant. Gedurende deze gehele periode worden ook onderdelen vervangen en controlemaatregelen uitgevoerd. Voor het maken van kosten gedurende deze periode gelden kapitalisatietrucs. Van deze aspecten moet een adviseur en opdrachtgever goed doordringen zijn en gebruik maken. De strategie stopt niet bij de implementatie van een saneringsvariant. Tijd moet onderdeel zijn van de strategie.

Het kennisverwerven en optimaliseren van de sanering stopt dus niet bij het ontwerp. Het juist beschrijven van een dergelijke aanpak in een RAW-bestek is lastig. Het kan dan ook een goede strategie zijn ontwerp en uitvoering te bundelen in één hand. Bijvoorbeeld een consortium of één aannemer. Een nieuwe tendens, die hierop aansluit, is het prestatiebestek.

Wordt voor een strategie met prestatiebestek gekozen, dan wordt in de ontwerpfase een globaal ontwerp gemaakt dat wordt vastgelegd in een saneringsplan. Op basis van dit saneringsplan kan de saneringsdoelstelling bij het bevoegd gezag worden getoetst, kunnen de randvoorwaarden aan de oplossing worden vastgelegd, kunnen vergunningen worden aangevraagd en kan het uitvoeringsbudget en de eventuele verdeling van kosten worden gemaakt. Vervolgens wordt een zogenaamd prestatiebestek uitgeschreven. In het prestatiebestek staat de saneringsdoelstelling beschreven, worden de randvoorwaarden waaraan de sanering moet voldoen gegeven en worden de gunningscriteria gedefinieerd. Nadrukkelijk wordt het ontwerp vrijgelaten aan de uitvoerende partij. Een prestatiebestek geeft ruimte om een ontwerp cyclisch te verbeteren. Door de specifieke bronkarteringsproblematiek is een prestatiebestek een uitgelezen besteksvorm voor complexe DNAPL-locaties.

#### 5.3.4 *Aanbieding en implementatie*

Is reeds een bestek opgesteld voor de uitvoering van de sanering van een DNAPL-locatie, dan is de uitvoeringsfase begonnen. Zoals gezegd zijn er twee fasen te onderscheiden in de uitvoering van een moderne sanering: een implementatiefase, waarin de hardware wordt geïnstalleerd, en een bedrijfsvoeringsfase waarin de hardware wordt bestuurd om de uitvoering naar het gewenste resultaat te leiden.

Is het een RAW-achtig bestek, dan staat eigenlijk vast welke hardware wordt geïnstalleerd. Het is de aannemer wel vrij hieraan kleine technische optimalisaties toe te voegen. Het uitgangspunt moet zijn: het ontwerp is fout. Biedt daarom een flexibele uitvoering van het systeem aan of een alternatief als de risico's te groot worden. Laat in ieder geval een goede monitoring onderdeel zijn van de aanbidding.

Is het bestek in de vorm van een prestatiebestek, dan kan de aannemer volgens de principes van de ontwerpfase tot een optimale aanbidding komen. Belangrijk daarbij is het identificeren en analyseren van faalgebeurtenissen voorafgaand en tijdens de sanering. Door deze te onderkennen en in een procesbesturing en kwaliteitsplan vast te leggen, kan de consequentie van falen worden beperkt. De aanbidding wordt zo een plafond-aanbidding met een plan voor minderwerk.

Een bruikbare methode voor het verkennen en analyseren van faalgebeurtenissen bij bodemsanering is ontwikkeld in het NOBIS-project 'Kwantificering van financiële risico's bij bodemsanering' [Hetterschijt et al., 2000]. Hierbij zijn voor pump & treat, stoominjectie en sparging saneringen de financiële risico's verkend en geanalyseerd. De opgedane kennis is van groot belang gebleken voor de variantkeuze en het ontwerp.

### 5.3.5 *Exploitatie en evaluatie*

Loopt het systeem al enige tijd en is er stagnatie opgetreden, dan kan het helpen om met de monitoringsdata een *backwards-modelling* te verrichten. Zoals gezegd is het uitgangspunt dat gedurende de uitvoering nieuwe informatie ontstaat omtrent de verontreinigingssituatie. Wellicht dat in een meerwerk-aanbieding een optimalisatie van het ontwerp kan worden uitgevoerd.

Ook indien er geen stagnatie is opgetreden, is het analyseren van bestaande monitoringsdata zinvol. Wellicht kan tijdens een onderhouds- of vervangingsronde een wijziging aan het systeem worden aangebracht, waardoor het milieurendement kan worden verbeterd of waardoor de kosten kunnen worden verminderd. Wellicht dat zelfs het veranderen van de saneringstechniek lucratief is wanneer een gedegen kapitalisatie wordt uitgevoerd. Dit is zeker het geval wanneer de trend van afkoop van de sanering doorzet. Er is dan sprake van een budget wat op een zo effectief mogelijke manier moet worden ingezet.

## 5.4 **Toepassingsgebieden**

In tabel 8 is alle kennis gebundeld. De tabel kan vanuit de bovenkant worden benaderd wanneer vanuit de projectfase wordt bekeken welke methodieken toepasbaar zijn:

1. In welke fase bevindt het project zich?
2. Welke verontreinigingssituatie kent het project en/of welke informatie moet worden verzameld?
3. Welke methodiek kan daarvoor worden toegepast?
4. En ter controle: moet die informatie wel worden verzameld, uitgaande van de saneringsvarianten die op basis van de bestaande kennis waarschijnlijk kunnen worden toegepast?

Of de tabel kan vanuit het perspectief van toepasbare saneringsvarianten worden ingestoken. Dat wil zeggen van onderaf worden gelezen:

1. Welke saneringsvarianten kunnen op basis van de bestaande kennis worden ingezet?
2. Welke methodieken moeten daarbij worden toegepast?
3. Welke methodieken vallen af op basis van de verontreinigingssituatie?

Voordat tot een keuze van één of meerdere methodieken wordt overgegaan is het belangrijk om ten allen tijde een aantal overwegingen in het achterhoofd te houden:

- Het DNAPL-concept berust niet op directe metingen van pure DNAPL, maar op concentratiemetingen van DNAPL-componenten opgelost in het grondwater. Dit legt beperkingen op aan de resolutie waarmee de bronzone in kaart wordt gebracht.
- De methodieken zijn gericht op het aangeven van de grens tussen bronzone en pluimzone en doen derhalve geen uitspraak over de hoeveelheid massa in de bronzone. De hoeveelheid vracht is met name van belang bij een op vrachtverwijdering gerichte saneringstechniek.
- Het in kaart brengen van DNAPL's blijft in het algemeen een tijdrovende en kostbare inspanning. Dus waarom geen gebruik maken van dit gegeven als de omstandigheden het toestaan?

Tabel 8. Toepassingsgebieden van methodieken.

projectfase	exploitatie					+		+	+
	aanbieding/implementatie				+	+	+	+	+
dimensionering/aaneringsplan	aanvullend- en saneringsonderzoek		+	+	+		+		
	oriënterend en nader onderzoek	+							
benodigde informatie	basis		<i>bodemopbouw complex</i>		<i>verticale detaillering van de bron</i>		<i>horizontale detaillering van de bron</i>		
	globaal hor/vert.		<i>ondiep (&lt; 30 m)</i>	<i>diep (&gt; 30 m)</i>	<i>ondiep (&lt; 30 m)</i>	<i>diep (&gt; 30 m)</i>	<i>ondiep matig detail (&lt; 30 m)</i>	<i>ondiep hoog detail (&lt; 30 m)</i>	<i>diep (&gt; 30 m)</i>
methodiek	boringen met filters § 4.2		georadar en sonderingen § 4.3	HRS en boringen § 4.4	sonderingen en grondwatersonde § 4.5	gedifferentieerd onttrekken § 4.6	Conespiper § 4.7	dynamische monitoring § 4.8	dynamische monitoring § 4.8
	geohydrologische beheersing	+	+	+	+ <sup>2, 3</sup>	+ <sup>3</sup>	-	+ <sup>3</sup>	+ <sup>3, 6</sup>
ontwerp	civieltechnische isolatie	+	-	-	-	-	+	+ <sup>4, 5</sup>	-
	reactieve barrière	+	-	-	-	-	+	+ <sup>4, 5</sup>	-
	stomen/strippen	+	+	-	+	-	-	+ <sup>4</sup>	-
	spoelen met surfactants	+	+	+	+	+ <sup>4</sup>	-	+ <sup>4</sup>	+ <sup>4</sup>
	natuurlijke afbraak	+ <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup> Wiedemeyer-reeks al meenemen

<sup>2</sup> indien dieper dan 15 m-mv en/of gelaagd pakket

<sup>3</sup> ter verbetering van milieurendement (en kosten)

<sup>4</sup> indien tijd beschikbaar

<sup>5</sup> grens bron/pluim in stroomafwaartse richting niet te bepalen

<sup>6</sup> indien brede pluim

### CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

#### *Bronkartering vanuit het saneringsperspectief*

Het scheiden van de bron en de pluim door middel van een (intensieve) bronaanpak is de eerste vereiste van een kosteneffectieve DNAPL-sanering. Het doel van de bronaanpak is het voorkomen van een frustrerende werking op de sanering van de pluim. Het zogenaamde dweilen met de kraan open, waarbij de bron als kraan voor de levering van verontreiniging aan de pluim kan worden gezien. Dit kan op twee manieren: het verwijderen van de DNAPL (weghalen van de kraan) of het tegengaan van verspreiding (dichtdraaien van de kraan). Voor iedere techniek is het van belang de positie van de bron te kennen, voor de één gedetailleerder dan voor de andere. Het vaststellen van de positie van het puur product is een moeizame en kostbare aan gelegenheid. Het is dan ook essentieel om de bronkartering doelgericht uit te voeren vanuit het saneringsperspectief, uitgaande van a priori kennis, reeds onderzochte parameters en rekening houdend met de fase waarin een project zich bevindt. Wordt er net begonnen en is een scan van saneringsmogelijkheden gewenst, of is reeds een sanering gaande en is karakterisatie gewenst omdat de sanering stagneert?

Geconcludeerd kan worden dat het voor ieder oplossing van belang is de locatie van de bron vast te stellen. Iedere techniek vraagt echter een andere mate van detail. Dit gegeven is van cruciaal belang voor het opzetten van het juiste onderzoeksprogramma.

#### *Werken met een conceptueel model*

Door het slim toepassen van methodieken kan de bronzone effectief in beeld worden gebracht. Wanneer de algemene kennis en ervaring van de adviseur wordt gecombineerd met informatie over de te karakteriseren locatie ontstaat een beeld tussen de oren dat wordt aangeduid als het conceptueel model. Voor de karakterisatie van de bronzone zijn meerdere lijnen waarlangs het conceptueel model kan worden gevoed:

1. zoveel mogelijk informatie halen uit een (reeds uitgevoerd) regulier nader onderzoek;
2. in kaart brengen van de bodemopbouw ter identificatie van verspreidingspaden van puur product en geologische traps waarop zich zinklagen kunnen vormen;
3. indirecte metingen in de pluim, waarbij verhoogde gehalten een indicatie kunnen zijn voor een stroomopwaarts gelegen bron;
4. evaluatie van saneringsresultaten; door gebruik te maken van tijd en te anticiperen op saneringsresultaten kan tijdens de sanering de bronzone worden gekarteerd.

#### *Informatie uit regulier nader onderzoek*

De waarde van meetgegevens wordt bepaald door de wijze waarop meetgegevens zijn verkregen. De praktijk wijst uit dat er nogal eens fouten worden gemaakt (verspreiden van puur product, verkeerde interpretatie van gegevens, enz). Zo zijn er situaties waarbij een gemeten sterk verhoogde concentratie op grotere diepte ook op een andere manier kan worden verklaard.

Mogelijke oorzaken kunnen zijn:

- contaminatie tijdens het uitvoeren van de boorwerkzaamheden;
- permeatie van de stijgbuis in de bronzone;
- lekkage ter plaatse van de verbindingen tussen de stijgbuizen.

Indien er nog een nader onderzoek moet worden uitgevoerd, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Overdenk goed waar de diepe filters worden geplaatst in verband met doorboring van onbekende zinklagen. Feitelijk liever van buiten naar binnen werken dan van binnen naar buiten, zoals gebruikelijk is.
- Plaats boven ondoorlatende lagen korte filters (ca. 1 m), met het 'kontje in de klei', voor het aantonen van zinklagen.
- Plaats in watervoerende pakketten lange filters (ca. 3 m) in verband met de hogere trefkans en voor karakterisering van de pluim.
- Maak gebruik van een filterdiameter van 3" in plaats van 2". Dit maakt de filters geschikt voor korte onttrekkingsproefjes bij twijfel over de betrouwbaarheid van meetgegevens (b.v. door permeatie van het filter of lekkende afsluitingen). Tevens kunnen in een latere fase deze filters mogelijk worden gebruikt voor bijvoorbeeld een geohydrologische beheersing.
- Dicht scheidende lagen af met bentoniet.
- Overweeg, vooral bij het plaatsen van diepe filters, om ook filters te plaatsen in het filtertraject op diepten die in een latere fase van belang kunnen zijn (b.v. midden in het watervoerende pakket).

#### *In kaart brengen van de bodemopbouw*

Het in kaart brengen van de bodemopbouw is de basis voor een goed inzicht in de stroming van puur product, water en lucht. Inzicht hierin is belangrijk bij het opstellen van onderzoeksstrategieën, saneringsonderzoeken en saneringsplannen. Vanuit het perspectief van DNAPL's zijn in de bodemopbouw met name de volgende aspecten van belang:

- *Scheidende lagen*  
Op deze lagen kunnen zinklagen worden gevormd. Onder een continue scheidende laag zal naar verwachting geen DNAPL meer aanwezig zijn.
- *Scheefstelling van lagen*  
Scheefgestelde lagen bepalen de verspreidingsrichting van DNAPL's. In plaats van een overwegend verticale verspreiding ontstaat tevens een horizontale verspreiding.
- *Aantonen van heterogeniteiten*  
Op heterogeniteiten blijft puur product achter in de vorm van residuele verzanding of kleine zinklaagjes.

Sondeergegevens zijn vanwege de meetschaal en de continuïteit van de metingen in verticale richting zeer geschikt om de bodemopbouw te karakteriseren. De sondeergegevens kunnen statistisch worden verwerkt tot een dwarsprofiel met pakketten met eenzelfde doorlatendheid (of indien gewenst intreeweerstand) met een index voor slechtdoorlatende laagjes (aantal, horizontale en verticale omvang). Het voordeel van het bepalen van de bodemopbouw met sonderingen is dat het een gemakkelijk uitvoerbare en betaalbare methode is om een relatief gedetailleerd beeld van de bodem te verkrijgen. In tegenstelling tot geofysische technieken wordt tevens inzicht verkregen in de verschillen in penetratieweerstand (te vertalen naar pakkingsdichtheid) binnen zandpakketten. Het dieptebereik van sonderingen is beperkt (afhankelijk van de bodemopbouw). Voor het in kaart brengen van de diepere bodemopbouw zijn boringen en/of geofysische technieken noodzakelijk.

Het grote voordeel van geofysische technieken, in vergelijking met boringen en sonderingen, is dat er een continu tweedimensionaal beeld van de bodemopbouw wordt verkregen, mits deze metingen worden gekalibreerd met hier en daar een boring. Hiermee wordt alle onzekerheid weggenomen ten aanzien van de continuïteit en scheefstelling van de lagen. Laterale continuïteit van de lagen kan alleen worden vastgesteld bij een hoge dichtheid van boringen/sonderingen. Hetzelfde probleem doet zich voor bij een gestuwde bodemopbouw.

Het afleiden van de helling van gestuwde lagen door het correleren van boringen en sonderingen blijkt in de praktijk alleen uitvoerbaar indien er duidelijk te volgen lagen aanwezig zijn (b.v. kleilagen).

Geofysische technieken maken geen onderscheid tussen zandsoorten, bijvoorbeeld tussen grof en fijn zandige lagen. De overgang van zandlagen kan echter wel een zinklaag veroorzaken of het stroompad van een DNAPL bepalen. Geofysische technieken brengen dus niet alle 'geologische traps' in beeld. Deze overgangen zijn met sonderingen en bij voldoende dikte van de laagjes met boringen wel aan te tonen.

#### *Indirecte metingen in de pluim*

Het is mogelijk om de aanwezigheid van puur product in de ondergrond aan te tonen door het stroomafwaarts met een hoge resolutie meten van verschillen in concentraties van opgeloste DNAPL's.

In het project zijn twee wegdrukbaar grondwatermonstersondes onderzocht: de Conesipper en het slagfilter. Het slagfilter is nog niet geschikt voor commercieel gebruik. Over de Conesipper kan worden geconcludeerd dat voor het in kaart brengen van grote relatieve verschillen in concentraties de resultaten van de metingen voldoende reproduceerbaar zijn. Voor het gebruik van de techniek in oriënterend en nader onderzoek is aanvulling met peilbuizen waarschijnlijk noodzakelijk. Gedacht moet worden aan het verifiëren van afperking met enkele peilbuizen.

Het toepassen van niet-permanente meettechnieken in plaats van permanente meettechnieken levert niet alleen meer informatie op, maar is ook financieel aantrekkelijk. Ze kennen echter wel een beperkt dieptebereik. Vanwege het dieptebereik en de wens te monitoren en te verifiëren zullen permanente meetmethoden hun toegevoegde waarde behouden.

Het toepassen van permanente meettechnieken wordt financieel aantrekkelijker wanneer de meetpunten meer informatie gaan bieden. Bijvoorbeeld wanneer door het toepassen van een grotere buisdiameter uit een filter water onttrokken kan worden, zodat informatie over fluctuaties in gehalten wordt verkregen en de kwaliteit van een grotere hoeveelheid grondwater kan worden bepaald. Hetzelfde geldt voor het toepassen van lange filters. Het is met name het doel van de meting die de uitvoeringswijze bepaalt. Dat permanente meettechnieken ook tot verwarrende resultaten kunnen leiden is duidelijk aangetoond. Het boren door een bronzone is een risicovolle onderneming en gehalten kunnen lager uitpakken dan met een korte (niet-permanente) meting.

Het verdient aanbeveling de toepassingsmogelijkheden van niet-permanente meettechnieken verder uit te dragen en te optimaliseren (b.v. dieptebereik gelijk aan mogelijke sondeerdiepte). Daarnaast is de acceptatie van de meetresultaten in relatie tot NEN- en VPR-voorschriften van belang om ook tot een procedurele verankering van de techniek te komen. Het laatste geldt overigens ook voor het toepassen van permanente technieken in of nabij potentiële bronzones.

Het concept berust niet op directe metingen van pure DNAPL, maar op concentratiemetingen van DNAPL-componenten opgelost in het grondwater. Dit legt beperkingen op aan de resolutie waarmee de bronzone in kaart wordt gebracht. Het verdient aanbeveling een studie te verrichten naar een methodiek om aan de hand van concentraties in de pluim een uitspraak te kunnen doen omtrent de afstand tussen het meetpunt en de bron. Momenteel is dit onduidelijk en is het enige alternatief dynamisch monitoren.

#### *Evaluatie van saneringsresultaten*

Kennis over de ligging van bronzones is voor het ontwerpen van een kosteneffectieve sanering van de ondergrond essentieel. Tijdens het uitvoeren van een sanering gaat over het algemeen



van alles fout. Logisch, want het ontwerp is gebaseerd op een conceptueel model en zo'n model is niet volledig. Feitelijk is de exploitatiefase nog steeds een leerfase. Hierop kan worden geanticipeerd. Het eerst uitgevoerde ontwerp wordt in de tijd verfijnd door de kennis die is opgedaan tijdens de uitvoering. Een dergelijke aanpak is zeker aan te raden wanneer sprake is van een eeuwigdurende beheersing. Het lijkt aantrekkelijk om op voorhand gebruik te maken van die tijd en te anticiperen op het feit dat er dingen fout zullen gaan. In principe kan het idee voor alle saneringstechnieken worden gebruikt. Er is echter één techniek waarmee deze aanpak extra scoort en die ook alleen voor de karakterisatiedoelstelling kan worden ingezet, voorafgaand aan de implementatie van de uiteindelijke saneringsvariant: de geohydrologische onttrekking.

Bij een grondwateronttrekking wordt de verontreiniging in het onttrokken water bepaald door de mate van verontreiniging in het gebied waardoor het aangetrokken grondwater stroomt. Dit gebied kan, met behulp van een geohydrologische modellering, worden bepaald door het identificeren van alle stroombanen (het doorstroomde gebied) die in de onttrekking terechtkomen. Is de verontreiniging in het onttrokken water hoog dan moet een deel van de stroombanen door een bron stromen. Vanuit dit perspectief zijn twee technieken uitgewerkt: *gedifferentieerde onttrekking* en *dynamische monitoring*. Gedifferentieerde onttrekking is een karakteriserende beheersvariant, waarbij in verticale richting een duidelijk onderscheid wordt verkregen in bodemlagen met zinklagen, residuaire verzadiging, opgeloste verontreiniging en schone lagen. Dynamische monitoring is een (tijdelijke) beheersmaatregel, waarbij systematisch een duidelijke horizontale scheiding wordt verkregen tussen de bronzone en pluimzone. Daarnaast kan dynamische monitoring worden toegepast als evaluatie van stagnerende grondwatersaneringen. Verontreiniging over grotere diepte zal leiden tot een combinatie van gedifferentieerd onttrekken en dynamische monitoring, waarbij naar toenemende diepte het accent zal komen te liggen op gedifferentieerd onttrekken.

Beide technieken zijn geschikt als basis voor een beheersmaatregel of als tijdelijke beheersmaatregel (leerfase) voorafgaand aan een andere saneringsvariant. Op het moment dat de bronzone in kaart is gebracht, kan ofwel de optimale permanente beheersing worden geplaatst, ofwel een op vrachtverwijdering gerichte saneringstechniek worden toegepast. Hoewel deze aanpak nieuw en daarmee onbekend is, sluit een dergelijke aanpak naadloos aan op het nieuwe beleid, te weten tijd nemen. Daarnaast kan deze strategie financieel aantrekkelijk zijn.

Op locaties waar sprake is van een diepe, nog niet goed uitgekarteerde, bronzone moet namelijk niet worden gesproken over de kosten van dynamische monitoring of gedifferentieerde onttrekking maar over de winsten. Iedere saneringsmaatregel zal, tenzij uitgebreid onderzoek wordt uitgevoerd, op basis van bestaande informatie moeten worden overgedimensioneerd, of door onbekendheid worden ondergedimensioneerd. Dat zijn de kosten die voorkomen kunnen worden. Stel: de definitieve maatregel wordt pas over 10 jaar geïmplementeerd (b.v. tijdens een herinrichtingsplan). Door een tijdelijke intelligente beheersmaatregel (b.v. dynamische monitoring of gedifferentieerd onttrekken) wordt de verspreiding van verontreiniging voorkomen en wordt de bronzone vanuit het perspectief van de potentiële saneringsmaatregel gekarteerd. Het resultaat is dat over 10 jaar een optimale saneringsmaatregel (RMK) kan worden geïmplementeerd zonder overdimensionering.

Het in kaart brengen van DNAPL's blijft in het algemeen een tijdrovende en kostbare inspanning. Dus waarom geen gebruik maken van dit gegeven als de omstandigheden het toestaan? Het is dan van belang om flexibel te ontwerpen met als uitgangspunt omgaan met onzekerheden.

### *Toekomstperspectief*

Met de technieken en methodieken, zoals uitgewerkt in dit project, is het mogelijk om bronzones (gedetailleerd) in kaart te brengen. Mede vanwege het feit dat er gebruik wordt gemaakt van indirecte metingen, blijft er echter een aanzienlijke onderzoeksinspanning (tijd en kosten) nodig.

De methodieken, die in het rapport worden besproken, lijken nieuw en vooruitstrevend. Zo is alle begin. Wanneer de ontwikkelingen in beleid doorzetten, zal het verwijderen van de bron een belangrijke plaats gaan innemen in saneringsplannen. Dit zal een impuls geven aan onderzoek gericht op bronverwijderingstechnieken. In het kielzog hiervan zal ook het gedetailleerd karakteriseren van DNAPL-locaties belangrijker worden en vaker worden toegepast, hetgeen zal leiden tot kostenreducties, de ontwikkeling van nieuwe technieken en de opbouw van ervaring.

De kostenreductie kan bijvoorbeeld op het vlak van de geofysische technieken worden verwacht. Geofysische technieken zijn nu nog duur, omdat de techniek nog niet commercieel inzetbaar is. Er zijn echter al bedrijven die hun business hebben toegespitst op het gebruik van georadar. Mogelijk dat deze of soortgelijke bedrijven ook het gebruik van seismische technieken zullen gaan vercommercialiseren als de vraag daarnaar toeneemt.

Sondeerinstrumenten als de grondwatermonstersonde, maar ook de conventionele sondeerkoppen, vormen nog geen onderdeel van de velduitrusting van milieubureaus. Het zijn vooral de sondeerbedrijven die met deze instrumenten experimenteren. Vooralsnog is het veldonderzoek vooral gericht op het nader bodemonderzoek en daarmee gestuurd door protocollen. Sondeertechnieken passen niet in deze protocollen. Er is duidelijk sprake van een specialisme. Wordt de specialistische karakterisering van DNAPL-locaties vanuit saneringsperspectief 'big business', dan zullen meer adviesbureaus zich daarin willen specialiseren en de benodigde apparatuur aanschaffen. Daarmee zal de ontwikkeling van sondes ook een impuls krijgen, bijvoorbeeld sensoren om pure DNAPL te detecteren of sondes om anaëroob grondmonsters te nemen. De eerste stappen daartoe worden reeds door de voorhoede gezet.

Is het eenmaal zover en wordt het karakteriseren van DNAPL-locaties big business, dan zal er ervaring worden opgedaan met het karakteriseren. Specialisme gaat over in routinematig werk. Ervaring over de hoeveelheden DNAPL in de bron en de vorm van bronnen zal evolueren. Deze ervaring zal kostenreducerend werken en leiden tot nieuwe methodieken en specialismes.

Ook het cyclisch werken, het flexibel ontwerpen en het gebruik maken van tijd, wordt steeds meer ingevuld. Een ieder op zijn eigen manier, maar met nieuwe methodieken tot gevolg. Ook hier zijn de eerste stappen gezet met dit rapport en de explosie van prestatiebestekken op de markt.



## LITERATUUR

- Anderson, M.R., R.L. Johnson en J.F. Pankow, 1992.  
Dissolution of dense chlorinated solvents into groundwater: 3 modelling contaminant plumes from fingers and pools of solvent.  
Environ. Sci. Technol. 26, pp. 901-908.
- Hetterschijt, R.A.A., C.B.M. te Stroet, M. van Zutphen, W. Schlebaum, M.H. Nijboer, H. de Sain, en J.G. Hartog, 2000.  
Financiële risico's van saneringsvarianten - Kwantitatieve risicoanalyse (QRA) ter ondersteuning bij variantkeuze.  
CUR/NOBIS-rapport 98-1-10, CUR/NOBIS, Gouda.
- Johnson, R.L. en J.F. Pankow, 1992.  
Dissolution of dense chlorinated solvents into groundwater: 2 Source functions for pools of solvent.  
Environ. Sci. Technol. 26, pp. 896-901.
- Pankow, J.F. en J.A. Cherry, 1996.  
Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: history, behavior and remediation.  
Waterloo Press.
- Ruegg en Van de Wateren, 1981.  
Mededelingen RGD, V35, aflevering 1 t/m 7.
- Vonk, M.W., 1985.  
Permeatie van organische verbindingen door leidingmaterialen.  
Mededelingnr. 85, KIWA, Rijswijk.
- Vreeken, C. en J.H.A. Driessen, 1992.  
Problemen met het gebruik van kunststof peilbuizen voor onderzoek van de kwaliteit van het grondwater.  
H<sub>2</sub>O (25), nr. 20.
- Waterloo Centre for Groundwater Research (WCGR), 1994.  
Diagnosis and Remediation of DNAPL Sites.  
WCGR, Arlington, Virginia.

