

NOBIS 98-1-09  
PARTITIONING INTERWELL TRACER TEST  
VOOR DNAPL-KARAKTERISATIE (PITT)

Toepassing op een met DNAPL verontreinigde  
locatie in Mierlo

drs. R.A.A. Hetterschijt (TNO-NITG)  
drs. J.R. Valstar (TNO-NITG)  
ir. M. van Zutphen (TNO-NITG)  
ir. C.H.J.E. Schuren (Tauw bv)  
dr.ir. S.J.T. Eskes (Tauw bv)  
ing. K.M.J. van den Brink (Tauw bv)  
mw. K. Reimer (TNO-NITG)

november 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, "©"Partitioning Interwell Tracer Test voor DNAPL-karakterisatie (PITT) - Toepassing op een met DNAPL verontreinigde locatie in Mierlo", november 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, "©"Partitioning Interwell Tracer Test for DNAPL characterization (PITT) - Application at a DNAPL-contaminated site in Mierlo", November 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**

Partitioning Interwell Tracer Test voor  
DNAPL-karakterisatie (PITT)  
Toepassing op een met DNAPL verontreinigde  
locatie in Mierlo

**CUR/NOBIS rapportnummer**

98-1-09

**Project rapportnummer**

98-1-09

---

**Auteur(s)**

drs. R.A.A. Hetterschijt  
drs. J.R. Valstar  
ir. M. van Zutphen  
ir. C.H.J.E. Schuren  
dr.ir. S.J.T. Eskes  
ing. K.M.J. van den Brink  
mw. K. Reimer

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 56  
**Bijlagen:** 33

---

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

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (drs. R.A.A. Hetterschijt, 030-2564704)  
Provincie Noord-Brabant (ir. A.A. van der Koppel, 073-6808187)  
Provincie Limburg (drs. F. Martens, 043-3897446)  
Tauw bv (ir. C.H.J.E. Schuren, 0570-699591)

---

**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Samenvatting**

De karakterisatie van DNAPL-bronzones is van cruciaal belang om deze verontreiniging effectief te kunnen saneren. De Partial Interwell Tracer Test (PITT) is een effectieve methode om de bronzones te karakteriseren. De methode berust op het verschil tussen het gedrag van twee of meerdere tracers die tegelijkertijd in de bodem worden geïnjecteerd. Eén tracer is een conservatieve tracer die niet met de DNAPL-bronzones reageert. De andere tracer is een partitionerende tracer. Deze tracer verdeelt zich in een bepaalde verhouding over het grondwater en de DNAPL. Hierdoor zal deze tracer zich langzamer verplaatsen dan de conservatieve tracer, indien het onderweg DNAPL's tegenkomt. Door op een aantal plaatsen de doorbraakcurven te meten, kan worden bepaald over welk traject de partitionerende tracer retardeert. In dat traject bevindt zich een DNAPL-bronzone. Tevens is de grootte van de retardatie afhankelijk van de hoeveelheid DNAPL in de ondergrond.

Gedurende 1,5 maand is daartoe een tracertest uitgevoerd op een met DNAPL verontreinigde locatie in Mierlo. Het 'reactieve' gedrag van de tracers ten opzichte van de DNAPL is vastgesteld in een laboratoriumexperiment, hetgeen de interpretatie van de veldproef vergemakkelijkt. De resultaten van de veldproef zijn vergeleken met conventionele karakterisatiemethoden, zoals boringen. Hieruit is gebleken dat het met de PITT goed mogelijk is de omvang en massa DNAPL in de ondergrond vast te stellen. De methode is dan ook een welkome aanvulling op de in het project DNAPL-KAR uitgewerkte karakterisatiemethoden, waarmee het niet mogelijk is om de massa DNAPL in de ondergrond eenduidig vast te stellen.

De toepassing van een PITT is vooral effectief indien de saneringstechniek kan worden geoptimaliseerd als de bronzones nauwkeurig in kaart worden gebracht. Hierbij valt te denken aan 'pump & treat' saneringen, reactieve schermen en directe verwijdering van de DNAPL-bronzone.

De kosten van een PITT zijn sterk afhankelijk van de verontreinigingssituatie (mogelijke omvang van de bronzone, diepte van de verontreiniging) en de nauwkeurigheid waarmee de bronzone in kaart moet worden gebracht. De kosten worden geschat op 40 kf indien vrijwel geen ruimtelijk detail over de bronzone gewenst is tot 250 kf indien wel ruimtelijk detail over de locatie van de bronzone gewenst is en de doorbraken van de tracers in een 25-tal peilbuizen worden bemonsterd. De PITT kan worden toegepast indien:

- de verontreiniging bestaat uit (D)NAPL's;
  - er geen veen aanwezig is op de locatie;
  - er in de buurt van de locatie geen onttrekkingen plaatsvinden waarbij het debiet niet bekend is;
  - de locatie voor de duur van de test toegankelijk is.
-

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

DNAPL, karakterisatie, tracertest

**Vrije trefwoorden:**

modellering, pilotproef

---

**Titel project**

Partitioning Interwell Tracer Test voor  
DNAPL-karakterisatie (PITT)

**Projectleiding**

TNO-NITG (drs. R.A.A. Hetterschijt,  
030-2564704)

---

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

**Report title**

Partitioning Interwell Tracer Test for  
DNAPL characterization (PITT)  
Application at a DNAPL-contaminated  
site in Mierlo

**CUR/NOBIS report number**

98-1-09

**Project report number**

98-1-09

---

**Author(s)**

drs. R.A.A. Hetterschijt  
drs. J.R. Valstar  
ir. M. van Zutphen  
ir. C.H.J.E. Schuren  
dr.ir. S.J.T. Eskes  
ing. K.M.J. van den Brink  
Mrs K. Reimer

**Number of pages**

**Report:** 56

**Appendices:** 33

---

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

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO (drs. R.A.A. Hetterschijt, 030-2564704)  
Province of Noord-Brabant (ir. A.A. van der Koppel, 073-6808187)  
Province of Limburg (drs. F. Martens, 043-3897446)  
Tauw bv (ir. C.H.J.E. Schuren, 0570-699591)

---

**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Abstract**

The characterization of DNAPL is of crucial importance to remediate this contamination effectively. The Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) is an effective method to characterize DNAPLs. The method is based on the difference in behaviour of two or more tracers, which are injected in the subsurface simultaneously. The first tracer is a conservative tracer that does not react with the DNAPL. The other tracer is a partitioning tracer. This tracer is partly distributed over the water and the DNAPL. Therefore this tracer will flow slower than the conservative tracer, when it encounters DNAPLs. By measuring the breakthrough at a number of wells it is possible to determine in which area the partitioning tracer is retarded. In that area there is DNAPL. The time of delay is also related to the amount of DNAPL present in the subsurface.

During 1.5 months the tracer test was conducted on a DNAPL-contaminated site in Mierlo. The reactive behaviour of the tracers with respect to DNAPL is obtained by laboratory experiments. The results of the field test were compared with conventional characterization like soil sampling. Hereby it was concluded that the PITT gives good estimates of the extent of and the amount of mass of DNAPL in the subsurface. The method is a welcome alternative to the methods that were developed in the project DNAPL-KAR, which did not offer the possibility to characterize the amount of DNAPL in the subsurface exclusively.

The applicability of a PITT is especially effective when the remediation technique can be optimized if the location of the DNAPL is characterized more adequately, for instance for 'pump & treat' remediation, reactive barriers and techniques that directly remove the DNAPLs.

The costs of a PITT strongly depend on the local situation of the contamination (probable extension of the DNAPL in horizontal and vertical direction) and the resolution with which the DNAPL is supposed to be characterized. The costs of a PITT are estimated to be 40 kf when no spatial detail about the source zone is needed to 250 kf when spatial detail about the DNAPLs is desired and 25 breakthrough curves are being collected. The PITT can be applied when:

- the contamination consists of (D)NAPLs;
  - there is no peat present at the location;
  - no pumping takes place around the site about which no pumping rates are known;
  - the location is available for the duration of the test.
-

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

characterization, DNAPL, tracer test

**Uncontrolled terms:**

modelling, pilot

---

**Project title**

Partitioning Interwell Tracer Test for  
DNAPL characterization (PITT)

**Projectmanagement**

TNO-NITG (drs. R.A.A. Hetterschijt,  
030-2564704)

---

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

# INHOUD

		SAMENVATTING	vii
		SUMMARY	xiii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
		1.1 Achtergrond	1
		1.2 Probleem en doelstelling	1
		1.3 Leeswijzer	2
Hoofdstuk	2	OPZET VAN HET ONDERZOEK	3
		2.1 Inleiding	3
		2.2 Theoretische achtergrond	3
		2.3 Tracers	4
		2.4 Kolomproeven	5
		2.5 Veldtest	6
		2.6 Interpretatie van meetgegevens	6
Hoofdstuk	3	KOLOMEXPERIMENTEN	9
		3.1 Inleiding	9
		3.2 Opzet en uitvoering	9
		3.3 Resultaten	9
		3.4 Interpretatie	10
Hoofdstuk	4	VELDTEST PITT	13
		4.1 Beschrijving van de locatie	13
		4.1.1 Geo(hydro)logie en verontreinigingssituatie	15
		4.2 Ontwerp en uitvoering	15
		4.2.1 Injectiewater	16
		4.2.2 Tracers	17
		4.2.3 Installatie voor de onttrekking	18
		4.2.4 Voorverkenning	18
		4.2.5 Monsternamen en analyses	18
		4.3 Resultaten	18
		4.3.1 Conventionele karakterisatie van DNAPL	18
		4.3.2 Doorbraakcurven van de PITT	19
Hoofdstuk	5	MODELLERING	21
		5.1 Opzet van de modellering	21
		5.2 Modellering van de conservatieve tracer	23
		5.3 Modellering van partitionerende tracers	26
Hoofdstuk	6	INTERPRETATIE EN DISCUSSIE VAN DE MODELLERING	31
		6.1 Berekening van de DNAPL-verzadigingsgraad	31
		6.2 Betrouwbaarheid van de resultaten	31
		6.3 Discussie	35

Hoofdstuk	7	ERVARINGSPROTOCOL	37
		7.1 Inleiding	37
		7.2 Criteria voor de locatiekeuze van de NOBIS-PITT-pilot	37
		7.3 Criteria voor de toepassing van de PITT op een locatie in het algemeen	41
		7.4 Faalanalyse	45
		7.5 PITT als kosteneffectieve karakterisatie voor een saneringsontwerp	46
		7.5.1 Inleiding	46
		7.5.2 Ontgraven	47
		7.5.3 Pump & treat	47
		7.5.4 Reactieve schermen	48
		7.5.5 Directe verwijderingstechnieken voor DNAPL-bronzones	49
		7.5.6 Samenvatting	50
		7.6 Toepassing van een PITT bij stagnerende grondwater-saneringsontwerpen	50
Hoofdstuk	8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	51
		8.1 Conclusies	51
		8.2 Aanbevelingen	51
		LITERATUUR	53
Bijlage	A	OPZET, RESULTATEN EN UITWERKING VAN KOLOMEXPERIMENTEN	
Bijlage	B	BOORSTATEN	
Bijlage	C	ANALYSES VAN BODEMMONSTERS	
Bijlage	D	DOORBRAAKCURVEN VAN DE PITT	
Bijlage	E	BESCHRIJVING VAN HET INVERSE MODEL	
Bijlage	F	RESULTATEN VAN INVERSE MODELLERING	
Bijlage	G	VERTALING VAN DE INVLOED VAN SYSTEEMRUIS NAAR AANGEPASTE RETARDATIEFACTOREN	
Bijlage	H	MOMENTENANALYSE	



## SAMENVATTING

### Partitioning Interwell Tracer Test voor DNAPL-karakterisatie (PITT)

In dit rapport wordt het doel en principe van de Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) beschreven en wordt het ontwerp, de uitvoering en de interpretatie van een PITT op een locatie in Mierlo beschreven.

De PITT is ontwikkeld om de hoeveelheid en verzadigingsgraad in de bodem van sommige stoffen te kunnen vaststellen. De test is in eerste instantie toegepast in de oliewereld om de restverzadiging van olievelden te kunnen vaststellen. Sinds kort wordt de test ook toegepast voor de karakterisatie van Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL's). Dit onderzoek beschrijft de uitvoering van de eerste PITT in Nederland voor de karakterisatie van DNAPL's.

De werking van de PITT berust op het principe dat partitionerende tracers zich in een bepaalde verhouding verdelen over het grondwater en over de DNAPL. Daardoor zullen deze tracers zich langzamer door de bodem verplaatsen dan conservatieve tracers die uitsluitend zijn opgelost in het grondwater. Door nu een tracertest uit te voeren met zowel een conservatieve als een partitionerende tracer en de doorbraakcurven in meerdere peilbuizen te meten, kan worden bepaald waar de partitionerende tracer wordt vertraagd. In dit traject is dan een DNAPL-bronzone aanwezig.

Met behulp van kolomproeven of uit literatuuronderzoek kan de relatie tussen de retardatie, de mate van vertraging, van de partitionerende tracer en de verzadigingsgraad van de DNAPL worden bepaald. De DNAPL-verzadigingsgraad is gedefinieerd als het percentage van de poriëruimte die is gevuld met DNAPL. In dit onderzoek zijn kolomproeven met de DNAPL, tetrachlooretheen (Per), uitgevoerd om deze relatie te bepalen. Een voorbeeld van de gemeten doorbraakcurve is te zien in figuur I.

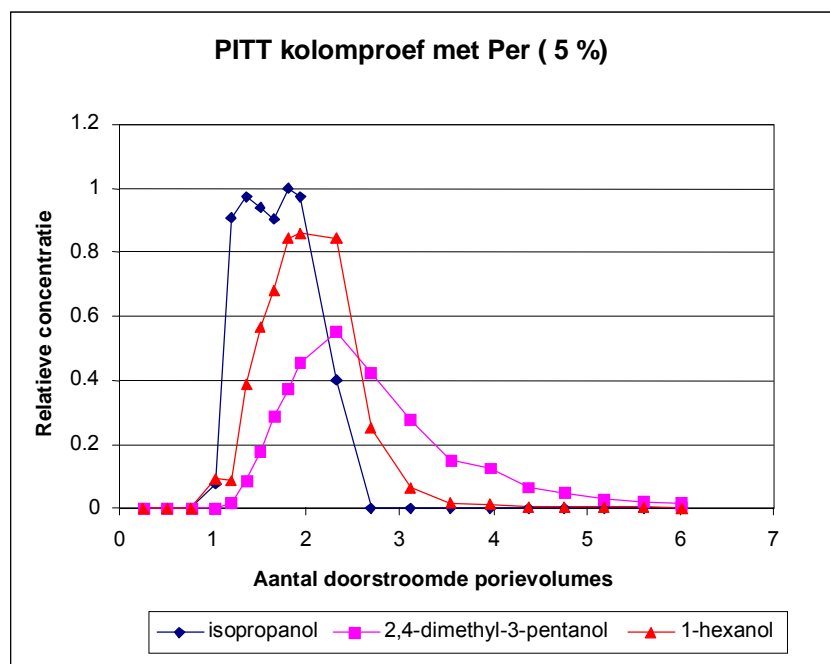
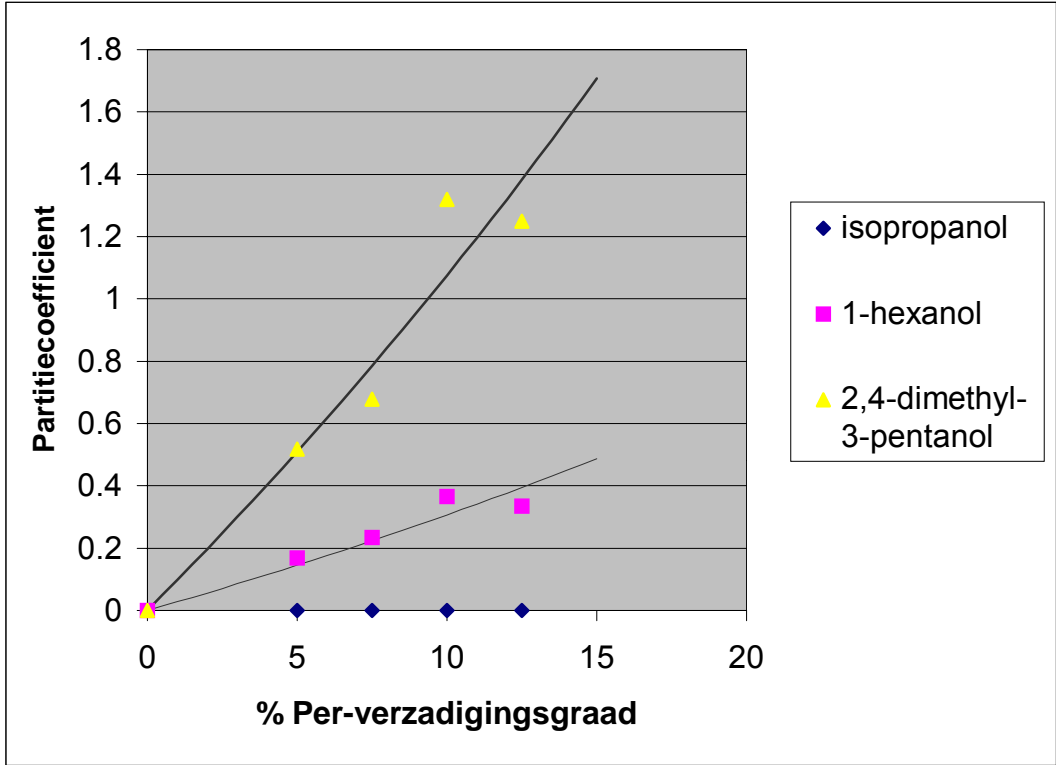


Fig. I. Doorbraakcurven van de tracers tijdens een kolomexperiment.



Uiteindelijk is gekozen om de test toe te passen op een locatie in Mierlo. Op deze locatie is geen veen aanwezig en bevindt de Per-verontreiniging zich op ongeveer een meter beneden de grondwaterspiegel. Een overzicht van de locatie is gegeven in figuur III.

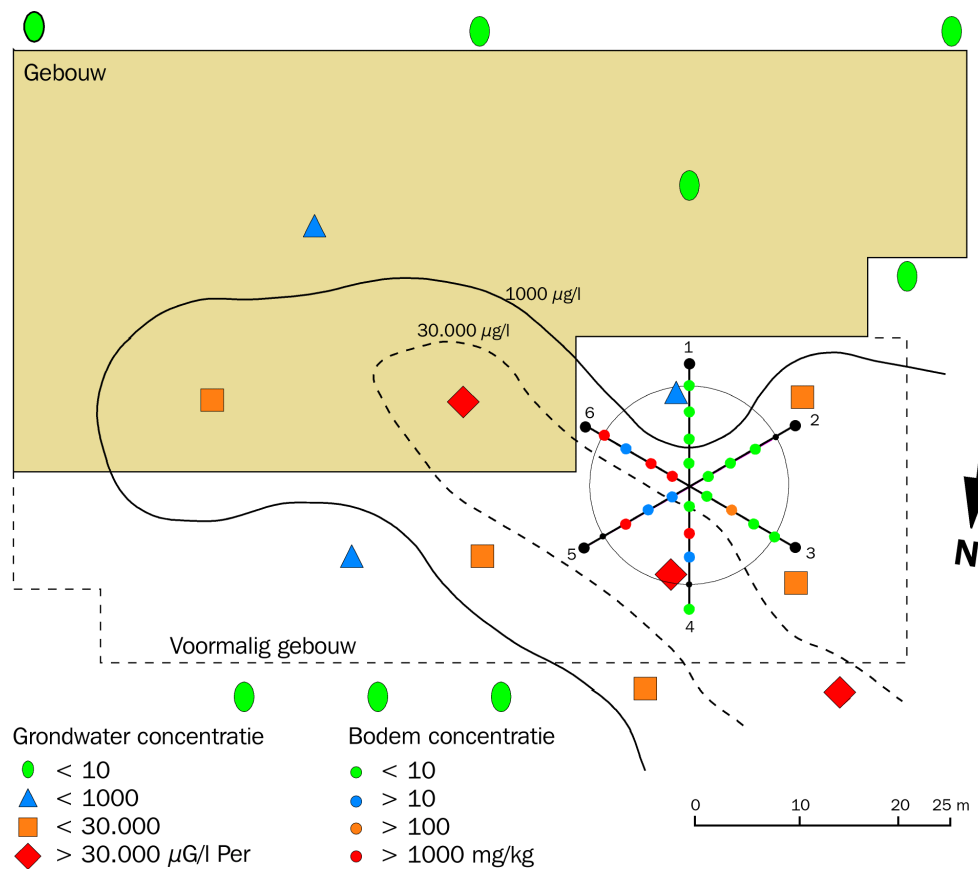


Fig. III. Overzicht van de locatie met gemeten bodem- en grondwaterconcentraties en configuratie van peilbuizen voor de PITT op de locatie Mierlo. Het centrum van de ster is de injectieput; de uiteinden van de zes genummerde raaien zijn de onttrekkingsputten en tussenin liggen per raai 4 monitoringspeilbuizen

De PITT is uitgevoerd op een locatie van ongeveer 16 bij 16 m<sup>2</sup>. Gedurende 2,5 dag is water met de tracers geïnjecteerd in het centrum van de locatie. Na deze 2,5 dag is water zonder tracer geïnjecteerd. De gebruikte tracers zijn bromide als conservatieve tracer en isopropanol, 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol als partitionerende tracers.

In een twintigtal peilbuizen zijn de doorbraken van de tracers gemeten. Hieruit is gebleken dat in een aantal peilbuizen de partitionerende tracers later doorbreken dan de conservatieve tracer, zodat bovenstrooms van deze peilbuizen een DNAPL aanwezig is.

Een voorbeeld van de doorbraakcurven is gegeven in figuur IV.

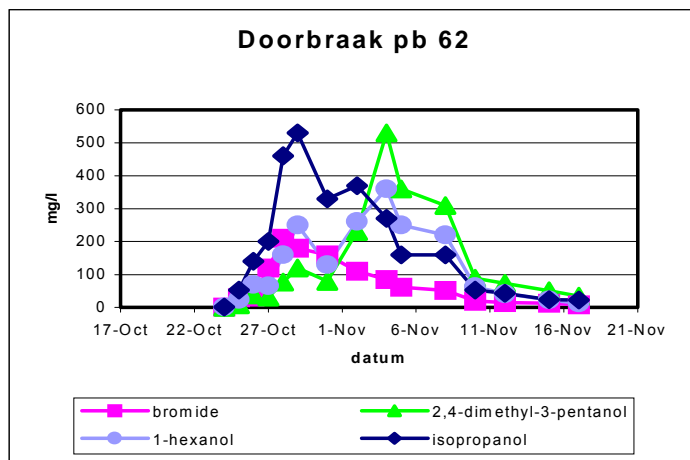
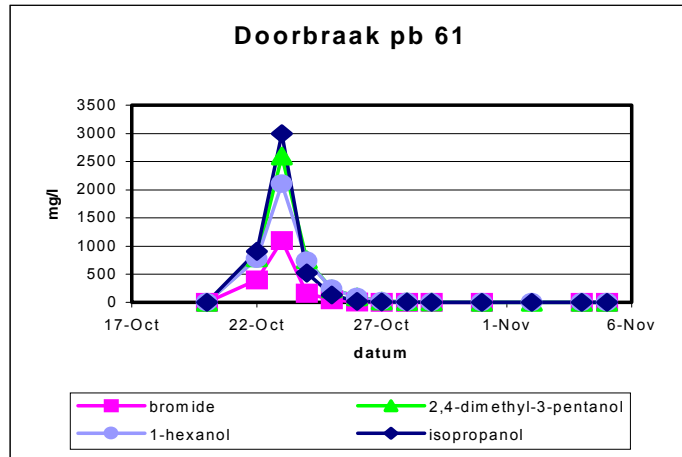


Fig. IV. Gemeten doorbraakcurven tijdens de uitvoering van de PITT.

De data zijn geïnterpreteerd door de doorbraakcurven te fitten met behulp van een invers model. Hiertoe zijn eerst de bromidedata gebruikt om de doorlatendheid, porositeit, dispersiviteiten en adsorptieparameters te schatten. Vervolgens zijn de data van de partitionerende tracers gebruikt om de retardatiefactoren van deze tracers te schatten. Met deze retardatiefactoren is dan uiteindelijk een schatting gemaakt van de Per-verzadigingsgraad. De ruimtelijke verdeling van de verzadigingsgraden, die bepaald is met de data van 1-hexanol, wordt weergegeven in figuur V.

De ligging van de enkele 'hot spots' in raai 5 en 6 komt overeen met de resultaten van de bodemonsters.

Een ruimtelijke verdeling van de Per-verzadigingsgraad, die bepaald is met de 2,4-dimethyl-3-pentanol, geeft gemiddeld genomen een lagere schatting. De locaties, waarop de PITT de 'hot spots' van de DNAPL-verontreiniging aantoont, komen gedeeltelijk overeen maar vertonen ook duidelijke verschillen.

Fig. V. Schatting van de Per-verzadigingsgraad bepaald uit de data van 1-hexanol.

Het NOBIS-PITT-project heeft aangetoond dat karakterisatie met behulp van een PITT in Nederland goed toepasbaar is. De uitvoering van de PITT op de locatie Mierlo heeft duidelijk een vertraging weergegeven van de partitionerende tracers ten opzichte van de conservatieve tracers. Hieruit valt af te leiden dat op de locatie DNAPL-bronzones aanwezig zijn.

Met behulp van een inverse modellering valt de ligging van de DNAPL-bronzones goed te schatten en blijkt dat ook de orde van grootte van de totale massa valt te schatten. De geschatte hoeveelheid Per komt in orde van grootte overeen met de totale hoeveelheid Per die geschat is door middel van de analyse van een beperkt aantal bodemonsters.

De toepassing van een PITT is vooral kosteneffectief indien de saneringstechniek kan worden geoptimaliseerd als de bronzones nauwkeurig in kaart worden gebracht. Hierbij valt te denken aan 'pump & treat' saneringen, reactieve schermen en directe verwijdering van de DNAPL-bronzone.

De kosten van een PITT zijn sterk afhankelijk van de verontreinigingssituatie (mogelijke omvang van de bronzone, diepte van de verontreiniging) en de nauwkeurigheid waarmee de bronzone in kaart moet worden gebracht. De kosten worden geschat op 40 kf indien vrijwel geen ruimtelijk

detail over de bronzone gewenst is tot 250 kf indien wel ruimtelijk detail over de locatie van de bronzone gewenst is en de doorbraken van de tracers in een 25-tal peilbuizen worden bemonsterd. Een PITT geeft wel een effectief, ruimtelijk gemiddeld beeld van de DNAPL-verzadigingsgraad. Concurrerende saneringstechnieken geven puntwaarnemingen (bodemmonsters) of hooguit een ruimtelijk beeld waar de verontreiniging zich bevindt zonder een schatting van de hoeveelheid DNAPL [DNAPLKAR, Weytingh et al., 2000].

Het verdient aanbeveling om de PITT toe te passen indien:

- de verontreiniging bestaat uit (D)NAPL's;
- er geen veen aanwezig is op de locatie;
- er in de buurt van de locatie geen onttrekkingen plaatsvinden waarbij het debiet niet bekend is;
- de locatie voor de duur van de test toegankelijk is voor zowel het aanbrengen en onderhouden van de infrastructuur ter plaatse (pompen, peilbuizen, zuiveringsinstallatie) als ook het nemen van grondwatermonsters;
- er door de betere karakterisatie van de DNAPL-bronzone een doelmatiger ontwerp van de saneringsstrategie kan worden gemaakt.

## SUMMARY

### Partitioning Interwell Tracer Test for DNAPL characterization (PITT)

In this report, the objective and principle of the Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) is described and the design, execution and interpretation of a PITT on a location in Mierlo are discussed.

The PITT is developed to determine the saturation in the soil of specific chemical species. The test was initially applied in petroleum engineering to determine the oil saturation of oil fields after exploration. Since recently, the test is also applied to characterize Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs). This research describes the application of the first PITT in the Netherlands to characterize DNAPLs.

The principle of the PITT is based on the partitioning tracers that will distribute in a specific ratio over groundwater and the DNAPL. Therefore, these tracers will be transported slower than conservative tracers, which will exclusively stay in groundwater. By applying a tracer test using both a conservative tracer and a partitioning tracer and by measuring the breakthrough curves in several monitoring wells, it can be determined in which region the partitioning tracer is retarded. In that region, DNAPLs are present.

From column experiments or from literature survey, the relationship between the retardation of the partitioning tracer and the saturation of the DNAPL can be determined. The DNAPL-saturation is defined as the percentage of the pore volume that is occupied by the DNAPL. In the study, column experiments with the DNAPL perchloroethene (PCE) have been performed to determine the relation between retardation and saturation. An example of a measured column breakthrough curve can be seen in figure 1.

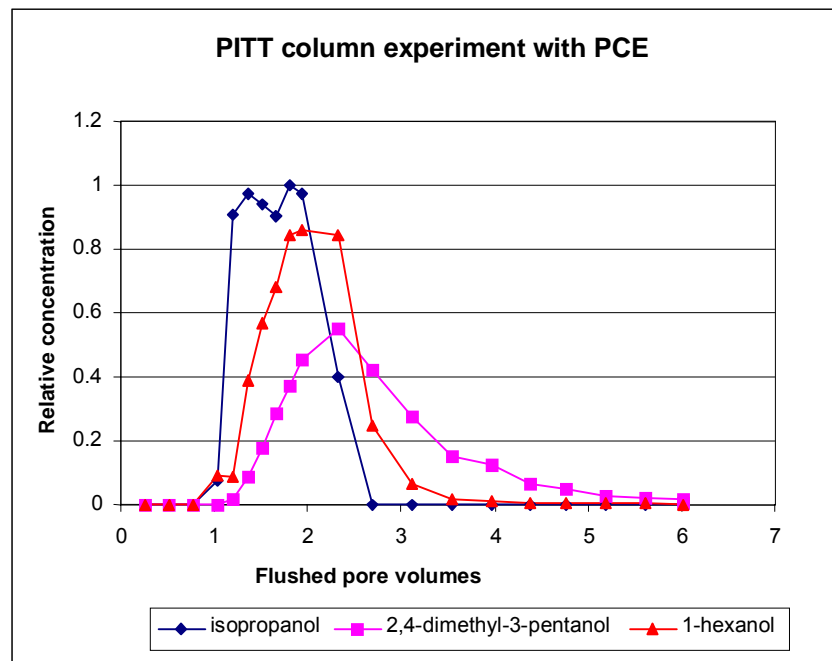
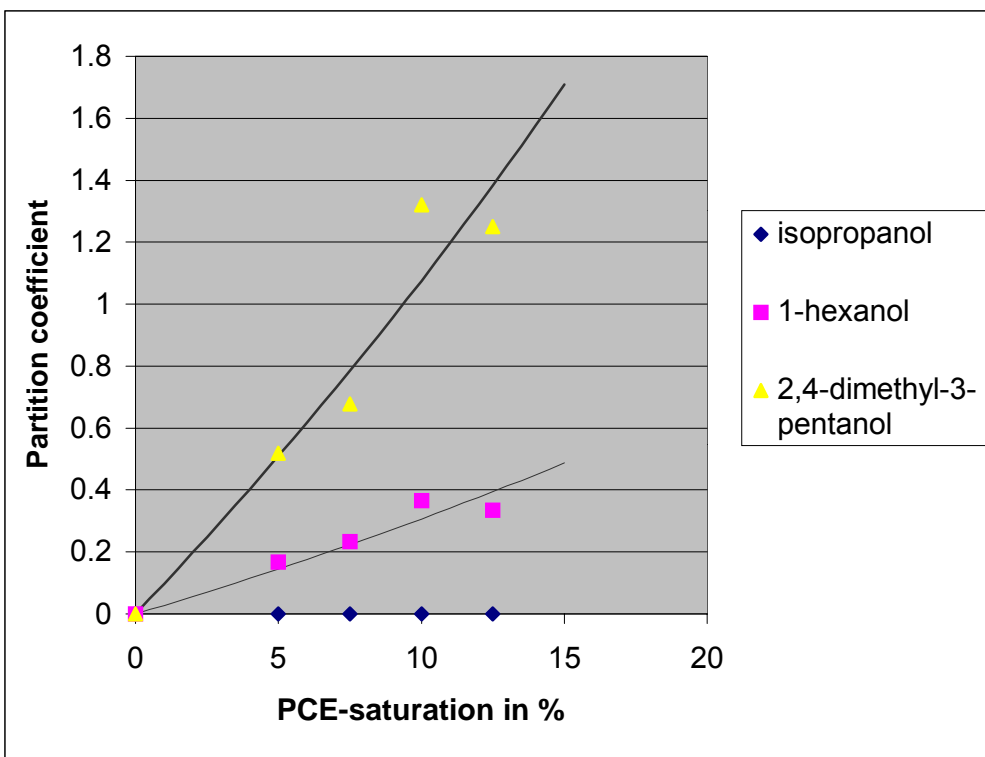


Fig. 1. Breakthrough curves tracers during a column experiment.





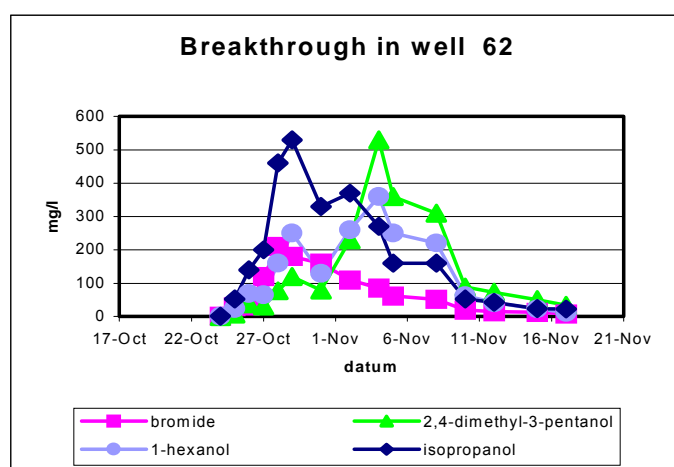
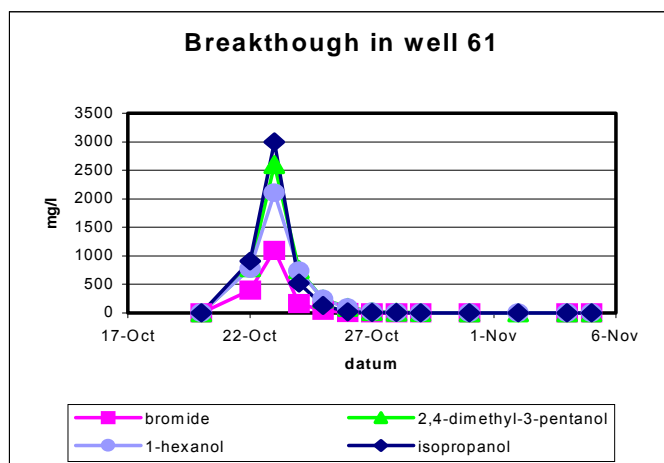


Fig. IV. Measured breakthrough curves during the field test.

The data have been interpreted by fitting the breakthrough curves using an inverse model. First the bromide data have been used to estimate the spatial distribution of the conductivity, porosity, dispersivity and adsorption parameters. Afterwards the partitioning tracers have been used to estimate the retardation factors of these tracers. From these retardation factors, estimates of the DNAPL-saturation have been obtained. The spatial distribution of the DNAPL-saturation as obtained from the 1-hexanol data is shown in figure V.

The location of some of the hot spots along lines 5 and 6 agree with results obtained from soil samples.

The spatial distribution of the PCE-saturation as obtained from 2,4-dimethyl-3-pentanol gives on average lower values. The locations at which PITT determines the hot spots of the DNAPL agree partly with the 1-hexanol data, but also show some differences.

Fig. V. Estimate of the PCE-saturation obtained from the 1-hexanol data.

The NOBIS-PITT project has shown that characterization of DNAPLs using PITT can be applied successfully in the Netherlands. The execution of the PITT on the site in Mierlo showed the retardation of the partitioning tracers compared to the conservative tracers clearly. Therefore, it could be concluded that DNAPLs are present on the site.

Using the inverse model, the location of the DNAPLs can be estimated. The order of magnitude of the mass of the DNAPL can also be estimated. The estimated amount of mass is of the same order of magnitude as an estimate that was based on a limited number of soil samples.

PITT can be applied cost effectively when the remediation technique can be optimized if the DNAPLs are adequately characterized. Examples of such techniques are pump & treat remediation, reactive barriers and direct DNAPL-removal techniques.

The costs of a PITT strongly depends on the local contamination situation (extension of the DNAPL, depth of the contamination) and the accuracy with which the source zone of DNAPLs should be characterized. The costs of a PITT are estimated from 40 kf when no spatial detail about the DNAPL is needed, to 250 kf when detail about the DNAPL-distribution is desired and breakthrough curves in 25 monitoring wells will be analysed. The PITT gives effectively, spatially

averaged estimates of the DNAPL-saturation. Other characterization techniques give only point measurements (soil samples) or a spatial distribution of where the DNAPL is, without giving an estimate of how much DNAPL is present [DNAPLKAR, Weytingh et al., 2000].

PITT should be applied when:

- the contamination can be present as a DNAPL;
- no peat is present on the site;
- there is no groundwater subtraction close to the site or there are only subtractions about which pumping rates are known;
- the site is available for the duration of the test to install and maintain the infrastructure (pumping and monitoring wells, treatment plant) as well as to take groundwater samples;
- the characterization of the DNAPL is useful to design the remediation technique more cost effectively.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Achtergrond

In het kader van het NOBIS-project 'PITT' is onderzoek gedaan naar een kosteneffectieve en betrouwbare karakterisatiemethode van DNAPL-bronzones in de bodem. Het is gebleken dat bijvoorbeeld gechloroerde koolwaterstoffen als een aparte vloeistoffase ofwel DNAPL's (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*) een secundaire verontreinigingsbron in de ondergrond vormen: vanuit deze aparte vloeistoffase lost de verontreiniging langzaam op in het grondwater. Sanering en/of beheersing van met DNAPL verontreinigde locaties dient dan ook mede gericht te zijn op deze bronzones.

Het grillige voorkomen van DNAPL-bronzones beperkt de waarde van puntmetingen voor karakterisatie. In het kader van het NOBIS-project 'DNAPL-KAR' [Weytingh et al., 2000] is een methode ontwikkeld om deze puntmetingen op te schalen. De methode, die hiervoor kan worden toegepast, is dynamisch monitoren. Deze methode heeft het nadeel dat het gaat om indirecte metingen, die geen informatie bevatten over de DNAPL-verzadigingsgraad.

Vanuit de olie-exploratie zijn tracertests, zoals de *Partitioning Interwell Tracer Test* (PITT), ontwikkeld waarmee het voorkomen van en de verzadigingsgraad van DNAPL's kan worden gekarakteriseerd. De PITT is ook van toepassing op LNAPL's (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*), maar in dit rapport wordt alleen de werking van de PITT bij DNAPL's beschreven. De werking van de PITT berust op het volledig doorstromen van een DNAPL-bronzone met een conservatieve tracer en met een DNAPL-reagerende tracer. Verschillen in doorbaak die worden gemeten in een netwerk van peilbuizen geven een twee- of driedimensionaal beeld van de DNAPL-verzadigingsgraad. De test heeft bovendien een grotere 'support'schaal dan puntmetingen en lijkt veelbelovend als karakteriseringsmethode.

In de Verenigde Staten is op laboratoriumschaal en op zeer beperkte veldschaal ervaring opgedaan met de PITT voor milieutoepassingen. In dit project wordt de PITT ingezet om (een deel van) de bronzone van een met DNAPL verontreinigde locatie op te sporen en te karakteriseren. Het toepassen van een *Partitioning Interwell Tracer Test* op verontreinigde locaties kan drie doelen hebben:

1. aantonen *dat* DNAPL in de ondergrond (b.v. onder een gebouw) aanwezig is;
2. aantonen *waar* DNAPL zich in de ondergrond bevindt (horizontaal en/of verticaal);
3. aantonen *hoeveel* DNAPL in de ondergrond aanwezig is.

Deze drie aspecten zijn van belang voor het bepalen van de mogelijke sanerings- en beheersingsopties en de consequenties van deze parameters op de effectiviteit en de duur van de verschillende sanerings- en beheersingsopties.

#### 1.2 Probleem en doelstelling

De locatie van pure fase DNAPL's is van cruciaal belang om dit type verontreiniging adequaat aan te kunnen pakken, maar het is zeer lastig om de exacte locatie, waar pure DNAPL aanwezig is, te bepalen.

Het NOBIS-project 'PITT' heeft als doel te toetsen of de PITT met gebruikmaking van de huidige state of the art met betrekking tot veldtechnieken, monitoring en modelleringstechnieken al kan

worden ingezet om het voorkomen van puur product in de ondergrond beter in kaart te krijgen (met name de verzadigingsgraad). Daarnaast wordt een ervaringsprotocol voor de keuze van een geschikte locatie, het ontwerp en de uitvoeringsaspecten van een PITT geformuleerd, waarbij de aandacht zal uitgaan naar het beoordelen van het kosteneffectief inzetten van het concept.

### 1.3 **Leeswijzer**

Dit rapport doet verslag van een Partitioning Interwell Tracer Test. Hoofdstuk 2 gaat in op de gehanteerde opzet van het onderzoek en de theoretische achtergronden. Hoofdstuk 3 beschrijft de kolomexperimenten, die nodig zijn om de relatie tussen de verzadigingsgraad van de DNAPL en de mate van retardatie van de tracers te bepalen. In hoofdstuk 4 wordt het ontwerp, de uitvoering en de resultaten van de PITT op de locatie in Mierlo beschreven. In hoofdstuk 5 wordt met behulp van een inverse modellering een ruimtelijk beeld van de retardatiefactoren van de tracers bepaald. Hoofdstuk 6 vertaalt deze retardatiefactoren naar de verzadigingsgraad van de DNAPL en geeft een discussie over de bereikte resultaten. Hoofdstuk 7 beschrijft de ervaring, opgedaan in dit project, die van belang is om een PITT op andere locaties toe te passen. Hoofdstuk 8 sluit af met de conclusies van het PITT-project en geeft aanbevelingen voor het toepassen van een PITT op andere locaties.

## HOOFDSTUK 2

### OPZET VAN HET ONDERZOEK

#### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de werking van de Partitioning Interwell Tracer Test (PITT). De test is gebaseerd op het partitionerend gedrag van bepaalde tracers ten opzichte van pure fase DNAPL's in de bodem. Onder dit partitionerend gedrag wordt verstaan dat de tracer zich in een bepaalde verhouding verdeelt over grondwater en pure DNAPL. De conservatieve tracer ondervindt geen invloed van de aanwezigheid van de DNAPL. De partitionerende tracer zal zich in een bepaalde verhouding herverdelen over het grondwater en de DNAPL, met als gevolg dat deze tracer zich langzamer verplaatst. Door een zorgvuldige selectie van de te gebruiken tracers kan een verschil in doorbraken ontstaan die zijn te verklaren door de aanwezigheid van een bepaalde hoeveelheid DNAPL in de bodem.

Voor het toepassen van een PITT voor DNAPL-karakterisatie moeten de volgende vier stappen worden doorlopen:

1. Er moet worden onderzocht of de locatie wel geschikt is voor het uitvoeren van een PITT. Hiervoor moet de locatie toegankelijk zijn en moet er de mogelijkheid zijn om de injectie- en onttrekkingsfilters en monitoringspeilbuizen te plaatsen en moet er plaats zijn voor een waterzuiveringsinstallatie gedurende de tijd van de uitvoering.
2. Om tot een uitspraak te kunnen komen hoeveel DNAPL er op een bepaalde locatie in de bodem aanwezig is, moet de relatie tussen de retardatie van de partitionerende tracer en de hoeveelheid DNAPL bekend zijn. Deze relatie kan soms worden gevonden in de literatuur [Wilson en Mackay, 1995]. Voor de tracers, die in dit onderzoek gebruikt zijn (isopropanol, 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol), was deze relatie nog niet bekend en is deze bepaald met behulp van kolomexperimenten (zie hoofdstuk 3).
3. Daarnaast wordt er dieper ingegaan op de uitvoeringsaspecten om een PITT op veldschaal te kunnen uitvoeren. Hierbij wordt ten eerste gekeken naar het doel waarvoor de test wordt gebruikt. Ten tweede moet er worden gekeken naar locatiespecifieke aspecten, die de uitvoering van een PITT kunnen verhinderen of bemoeilijken.
4. Als laatste moeten de in de test verzamelde data worden geïnterpreteerd. Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van een *state of the art* inverse modelleringstechniek [Valstar, 2000], waarmee de relatie tussen de veldmetingen en zowel de hoeveelheid als de ruimtelijke verdeling van de DNAPL kan worden bepaald.

In 2.2 zullen de theoretische achtergronden van de PITT nader worden uitgelegd. Vervolgens zal in 2.3 worden besproken welke tracers kunnen worden gebruikt bij de PITT en met welke eigenschappen van deze tracers rekening moet worden gehouden. Daarna wordt in 2.4 de opzet van de kolomexperimenten besproken. In 2.5 komen de aspecten aan de orde die betrekking hebben op de locatie waar een PITT wordt uitgevoerd. Tenslotte wordt in 2.5 ingegaan op de methoden, waarmee de meetgegevens kunnen worden geïnterpreteerd en wat daarvan de specifieke voor- en nadelen zijn.

#### 2.2 Theoretische achtergrond

In 1.1 is al aangegeven dat vanuit de olie-exploratie een tracertest is ontwikkeld, waarmee de DNAPL-verzadigingsgraad kan worden bepaald. De werking van de test berust op het principe dat een apolaire stof affiniteit heeft met een andere apolaire stof. In een bekersglas dat deels met water, een polaire stof, en deels met een apolaire stof is gevuld, zal een derde apolaire stof

liever oplossen in de apolaire dan de polaire vloeistof. Zo zal ook een apolaire tracer opgelost in het grondwater zich verdelen (*partitioning*) over het polaire water en de apolaire D. De apolaire tracer 'reageert' dus met de DNAPL. Omdat een deel van de apolaire tracer zo wordt 'weggevangen' door DNAPL's, zal de effectieve stroomsnelheid van de tracer lager zijn dan die van een conservatieve tracer. Uit de literatuur [Wilson en Mackay, 1995; Nelson en Brusseau, 1996] is gebleken, dat de grootte van de vertraging een maat is voor de hoeveelheid DNAPL in de doorstroomde bodem, ofwel de DNAPL-verzadigingsgraad.

Het bovenbeschreven principe kan worden vertaald naar een generieke testopzet van een Partitioning Interwell Tracer Test. De DNAPL-verzadigingsgraad kan op een locatie worden bepaald door de vertraging van de reagerende tracer ten opzichte van een conservatieve tracer te bepalen. Een PITT zal in het algemeen dan ook bestaan uit een systeem waarmee beide tracers door injectie worden toegevoegd aan het grondwater. Voor de aanvang van de opstelling moet nauwgezet worden nagegaan welk volume bodem (zowel horizontaal als verticaal) moet worden onderzocht. Dit gebied wordt het testgebied genoemd. Met een netwerk van monitoringspunten in het testgebied wordt de doorbraak van beide tracers gevolgd. Vaak wordt het grondwater stroomafwaarts van het testgebied weer onttrokken om een gecontroleerde stromingssituatie te creëren en de grondwaterstroming te versnellen. De natuurlijke grondwaterstroming is vaak te traag om de tracers over een afstand van tientallen meters in enkele maanden te verplaatsen en de uitvoeringsduur van de PITT beperkt te houden.

De laterale grootte van het testgebied wordt afgestemd op de horizontale verbreiding van de vermoedelijke bronzone die moet worden onderzocht. Hierbij moet worden gedacht aan een oppervlak van 1000 vierkante meters (bijvoorbeeld 30·30 meter) bij enkele meters dikte (bijvoorbeeld van 5 tot 8 m-mv). Het gehele testgebied moet worden doorspoeld met beide tracers. De grootte van het testgebied bepaalt de afstand tussen de infiltratie- en onttrekkingsmiddelen en het debiet in relatie tot de achtergrondstroming. Bij de bepaling van de omvang van het testgebied moet onder meer rekening worden gehouden met de maximale tijdsduur (in verband met de mogelijke afbreekbaarheid van de tracers en kosten) en de beschikbare tijdsduur (in verband met andere (bouw)processen op de locatie). Naarmate de afstand tussen de injectie- en onttrekkingsmiddelen toeneemt, zal meer grondwater moeten worden geïnjecteerd en onttrokken. Om de duur van de PITT niet onaanvaardbaar te verlengen, zal veelal het debiet toenemen. Het aantal monitoringsfilters wordt bepaald door de grootte van het testgebied en de gewenste resolutie in horizontale en verticale zin. In 2.5 zal hierop verder worden ingegaan.

### 2.3 Tracers

Een PITT is in feite een 'dubbele of meervoudige' tracertest: een conservatieve tracer en een (of meerdere) partitionerende tracer(s). De conservatieve tracer reageert niet met het sediment en ook niet met de DNAPL. De tracer gaat zonder retardatie mee met het grondwater en geeft zodoende informatie over de snelheid van de grondwaterstroming. De partitionerende tracer(s) reageert(reageren) evenmin met het sediment, maar wordt indien deze in contact komt met DNAPL geretardeerd. De mate van retardatie van de partitionerende tracers ten opzichte van de conservatieve tracers wordt bepaald aan de hand van de doorbraakcurven<sup>1</sup>. Deze retardatie is een indicatie voor de aanwezigheid van DNAPL's en een maat voor de hoeveelheid van de DNAPL in de doorstroomde ondergrond. Het meten van de retardatie van de partitionerende tracer(s) ten opzichte van de conservatieve tracer is zeer belangrijk om de effecten van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond te ondervangen.

---

<sup>1</sup> Een doorbraakcurve geeft de relatie tussen de concentratie van een tracer en de tijd op een bepaalde locatie grafisch weer.

Bepaling van de retardatie ten opzichte van een modelmatig bepaalde doorbraakcurve is niet wenselijk, omdat modelvoorspellingen meestal onvoldoende nauwkeurig zijn omdat de heterogene ondergrond niet voldoende bekend is.

Bij de selectie van zowel de partitionerende als de conservatieve tracers moet allereerst worden nagegaan of de tracers niet reeds in de bodem aanwezig zijn. Indien dit het geval is, moet worden uitgezien naar een andere tracer, omdat de doorbraakcurve hierdoor wordt verstoord. Bij gechlorideerde verbindingen, zoals Tri en Per, moet worden afgezien van het gebruik van NaCl als primaire conservatieve tracer. Door de (bio)chemische omzetting van Tri en Per in de ondergrond zal  $\text{Cl}^-$  al in het grondwater aanwezig zijn. De 'next best' conservatieve tracer is NaBr. Bromide zal in het algemeen niet of in lage concentraties in het grondwater op saneringslocaties aanwezig zijn.

Voor de selectie van de partitionerende tracers is er een groot aantal tracers beschikbaar.  $\text{SF}_6$  is een partitionerende tracer die veel gebruikt is in de PITT-studies [Wilson en Mackay, 1995; Nelson en Brusseau, 1996; Rao et al., 1998]. Deze tracer is vrijwel inert en heeft geen negatieve milieuaspecten. Een belangrijk nadeel voor het gebruik van  $\text{SF}_6$  is de grote vluchtigheid van deze stof. De Henry-constante voor  $\text{SF}_6$  is circa 160. Dit houdt in dat  $\text{SF}_6$  in een afgesloten ruimte met 50 % lucht en 50 % water zich bij 20 °C over de beide fasen verdeelt in de verhouding 160:1. Voor de toepassing van  $\text{SF}_6$  in een PITT betekent dit dat elk contact tussen de water- en gasfase moet worden voorkomen, omdat anders de resultaten niet te interpreteren zijn: het onderscheid tussen retardatie en vervluchtiging is dan niet te maken. Dit is de reden waarom deze tracer niet is gebruikt tijdens de veldtest van dit onderzoek.

Alcoholen zijn een ander type partitionerende tracers. Alcoholen zijn goed oplosbaar in water en hebben daarnaast een grote affiniteit voor de apolaire DNAPL. Enkele aandachtspunten bij de selectie van alcoholen voor partitionerende tracers zijn:

- de afbraaksnelheid;
- de voorwaarden voor het injecteren en zuiveren of lozen van de alcoholen tijdens de test;
- de mate van retardatie (langere ketens leiden tot grotere retardatie);
- de beschikbaarheid en levertijd van de alcoholen;
- de kostprijs (verschillende alcoholen kunnen zeer duur zijn: > f 1000,-- per 100 ml).

De afbraaksnelheid moet zodanig laag zijn dat de afbraak een minimale invloed heeft op de interpretatie van de metingen. De retardatie moet zodanig groot zijn dat het verschil in doorbraak met de conservatieve tracer duidelijk te meten is. Tevens moet de retardatie klein genoeg zijn om tijdens de test het gehele te onderzoeken gebied te doorstromen.

Veel gebruikte alcoholen zijn [Wise et al., 1999; Young et al., 1999]:

- isopropanol;
- hexanol;
- pentanol;
- 1,2-dimethyl-3-butanol;
- 2,4-dimethyl-3-pentanol.

## 2.4 Kolomproeven

Voor enkele van deze tracers, onder andere  $\text{SF}_6$ , is bekend hoe deze tracer zich verdeelt over het grondwater en de DNAPL. Van de andere tracers is deze relatie nog onbekend. Deze relatie kan worden bepaald door middel van laboratoriumproeven. Hierbij worden zowel de conservatieve als de partitionerende tracer door een kolom geleid, waarin een bekende hoeveelheid



DNAPL als puur product aanwezig is. Uit het verschil in doorbraakcurven kan de verdeling van de partitionerende tracer over het grondwater en de DNAPL worden afgeleid. Indien deze experimenten worden uitgevoerd bij verschillende DNAPL-verzadigingsgraden is de relatie tussen de verzadigingsgraad van de DNAPL in de bodem en de mate van retardatie te bepalen. De uitvoering en interpretatie van de kolomproeven voor dit onderzoek worden beschreven in hoofdstuk 3.

## 2.5 Veldtest

Bij de uitvoering van de PITT zijn er verschillende aspecten die bepalend zijn voor het ontwerp van het systeem. Het doel van de test moet duidelijk zijn. Er kunnen verschillende ontwerpen worden opgesteld, afhankelijk van de locatiespecifieke doeleinden.

Bij het opstellen van de verschillende ontwerpen moet worden gedacht aan:

- de stromingsrichting(en) van het water: uniforme stroming, radiale stroming bij onttrekkingen en/of verticale stroming;
- de preventie van het droogvallen van sommige onttrekkingsfilters en de verhoging van de grondwaterstand tot aan het maaiveld bij de injectiefilters;
- het gebruik van alleen de effluentconcentraties in de extractieputten of ook monitoringspunten tussen de injectie- en extractiefilters;
- de onderlinge afstand tussen de injectie- en extractieputten in relatie tot de tijdsduur van de PITT;
- het gebruik van één of meerdere partitionerende tracers en de mate van afbraak en partitionering;
- de mogelijke verstoringen op de locatie die invloed hebben op de tracers, zoals de aanwezigheid van veen (er wordt vermoed dat de partitionerende tracers hier ook aan retarderen);
- de mogelijkheid op contact van de tracer met de bodemlucht in de onverzadigde zone ( $\text{SF}_6$  vervluchtigt in die situatie);
- de vereiste resolutie van de resultaten (wat zijn weerslag heeft op de onderlinge afstand van de meetpunten en de monitoringsfrequentie);
- de toegankelijkheid van het terrein (aanwezigheid van bebouwing waardoor geen putten kunnen worden aangebracht);
- de mogelijkheid tot plaatsing, het ontwerp en de dimensionering van een grondwaterzuiveringsinstallatie;
- de invloed van onttrekkingen van derden.

Een aantal andere (niet-technische) aspecten vereisen aandacht. Hierbij moet onder meer worden gedacht aan: lozingsvergunningen, onttrekkingsvergunningen, kosten van de test, vergunningen in het kader van de hinderwet ten behoeve van de plaatsing van de zuiveringsinstallatie en de opslag van de tracers, en de voor de uitvoering van de PITT beschikbare tijd.

Rekeninghoudend met al deze verschillende aandachtspunten moet een locatiespecifiek ontwerp worden opgesteld.

## 2.6 Interpretatie van meetgegevens

De omstandigheden in het veld zijn minder ideaal voor het uitvoeren en interpreteren van een PITT dan de omstandigheden in het laboratorium. De heterogeniteit van de ondergrond, en de daarmee samenhangende distributie van de DNAPL, kan consequenties hebben voor de betrouwbaarheid van de PITT om DNAPL te karakteriseren.

Met name de 'hydrologische ontoegankelijkheid'<sup>2</sup> van de tracer tot de DNAPL en het optreden van niet-evenwichtsprocessen<sup>3</sup> kunnen resulteren in een onderschatting van de DNAPL-verzadigingsgraad. Bovenstaande situaties treden sneller op in sterk heterogene poreuze media met een niet-uniforme DNAPL-distributie en wanneer een PITT wordt toegepast in lokale zones met een zeer hoge verzadigingsgraad (zinklagen).

Partitionering van de tracer is een niet-evenwichtsproces wanneer de DNAPL-fase relatief 'dik' is in de dimensie loodrecht op de grondwaterstroming. De concentratiegradiënt tussen de tracerconcentratie in het grondwater en in de DNAPL bepaalt of de tracer van de DNAPL naar het water wordt getransporteerd of juist andersom. Wanneer tracerhoudend grondwater over de DNAPL stroomt, zal de tracer in de DNAPL worden gedreven. Wanneer vervolgens tracervrij grondwater (de chaser) over de DNAPL stroomt, zal de tracer weer terug in het grondwater komen. In het geval dat de tracerpuls te kort duurt, kan de DNAPL niet volledig verzadigd raken met de tracer, waardoor een gedeelte van de tracer bij het passeren van de chaser niet in het grondwater terechtkomt, maar juist dieper de DNAPL ingaat. Een deel van de tracer lijkt dan gedurende langere tijd gebonden aan de DNAPL, waardoor niet alle tracer wordt teruggevangen in de onttrekkingsputten. Bovendien zal het front van de partitionerende tracer sneller doorbreken, omdat een gedeelte van de tracer niet in contact is gekomen met de DNAPL.

Er zijn diverse methoden om de meetgegevens van een PITT te analyseren. In reeds bestaande literatuur wordt gebruik gemaakt van de tijdsmomenten van de doorbraakcurven in de verschillende peilbuizen [James et al., 1997]. Deze methode zal in hoofdstuk 3 bij de interpretatie van de kolomexperimenten nader worden uitgelegd. Een nadeel van deze methode is dat men exact moet weten of meerdere peilbuizen langs dezelfde stroombaan liggen en dat er een grote hoeveelheid punten op een doorbraakcurve beschikbaar moeten zijn om de momenten nauwkeurig te kunnen schatten.

Een andere methode om de meetgegevens te interpreteren is door gebruik te maken van een invers transportmodel. Deze 'state of the art' techniek is onlangs tijdens een promotieonderzoek ontwikkeld bij TNO-NITG [Valstar, 2000] voor een enkele tracer en is vervolgens aangepast voor de specifieke eisen van de PITT. Hierbij worden onbekende bodemparameters, zoals de doorlatendheid, porositeit en dispersiviteit zodanig aangepast dat de doorbraakcurven van de conservatieve tracer worden gefit. Vervolgens worden de doorbraakcurven van de partitionerende tracers gefit, waarbij alleen de parameters mogen worden aangepast die betrekking hebben op de partitionering. Deze parameters zijn de retardatiefactoren van de partitionerende tracers. Vanuit deze ruimtelijk verdeelde retardatiefactoren kan vervolgens met behulp van de uit de kolomexperimenten bepaalde relaties de verzadigingsgraad van de DNAPL analytisch worden afgeleid. Een voordeel van deze methode is dat er ook rekening kan worden gehouden met niet-evenwichtsprocessen. Hiervoor moet wel lang genoeg worden gemeten om de staart in de doorbraakcurven adequaat te kunnen bepalen. Een uitgebreide beschrijving van deze methode wordt gegeven in bijlage E.

---

<sup>2</sup> Onder hydrologische ontoegankelijkheid wordt verstaan de mate waarin de tracers in contact kunnen komen met de NAPL's. Dit kan bijvoorbeeld worden gelimiteerd doordat NAPL's ingesloten zijn in *pockets*. Hierdoor kan de massa NAPL worden onderschat.

<sup>3</sup> Onder een niet-evenwichtsproces wordt verstaan dat de tracer een langzame uitwisseling vertoont tussen het grondwater en de DNAPL en dat deze te kort in contact is met de DNAPL om een evenwichtssituatie te bereiken



## HOOFDSTUK 3

### KOLOMEXPERIMENTEN

#### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de relatie tussen de vertraging van de partitionerende tracers en de DNAPL-verzadigingsgraad bepaald. Hiertoe wordt een aantal kolomexperimenten uitgevoerd, waarin bij verschillende DNAPL-verzadigingsgraden de doorbraken van de conservatieve en de partitionerende tracers worden bepaald. Met deze gegevens wordt de retardatiefactor bij verschillende DNAPL-verzadigingsgraden voor de partitionerende tracers bepaald.

#### 3.2 Opzet en uitvoering

De opzet en de uitvoering van de kolomexperimenten worden beschreven in bijlage A.

#### 3.3 Resultaten

De doorbraakcurven van de drie tracers in één van de uitgevoerde experimenten zijn weergegeven in figuur 1. Dit betreft het experiment met een Per-verzadigingsgraad van 5 %. De Per-verzadigingsgraad is gedefinieerd als het percentage van de porieruimte die is gevuld met Per. De concentraties zijn in figuur 1 weergegeven als relatieve concentraties in vergelijking met de concentratie van het influent. De doorbraakcurven van de overige experimenten met Per-verzadigingsgraden van 7,5 %, 10 % en 12,5 % zijn weergegeven in de figuren A2 - A4 van bijlage A. De bromidemetingen zijn alleen uitgevoerd voor de kolomproeven met een Per-verzadigingsgraad van 7,5 % en 12,5 %. Hieruit is gebleken dat bromide en isopropanol dezelfde doorbraak vertonen. Bij de andere kolomproeven wordt de doorbraak van isopropanol gebruikt voor de doorbraak van bromide in de verdere berekeningen.

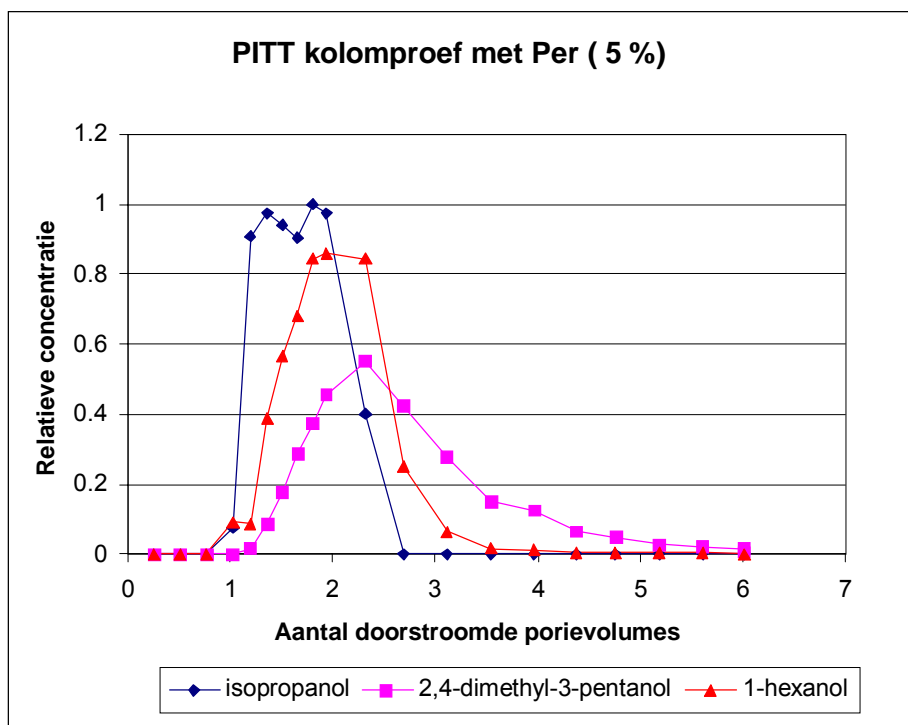


Fig. 1. Doorbraakcurven van de kolomexperimenten bij een Per-verzadigingsgraad van 5 %.

De doorbraakcurven voor de drie experimenten geven duidelijk aan dat de aanwezigheid van Per in de poriën significante invloed heeft op de retardatie van 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol. Dit effect is niet zichtbaar voor isopropanol, dat dezelfde doorbraak vertoont als bromide. Deze verdeling tussen de drie doorbraken (eerst isopropanol en later 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol) komen overeen met de veldwaarnemingen. Tevens is er ook een kolomproef uitgevoerd zonder Per. Hierbij is vastgesteld dat de tracers 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol niet vertragen ten opzichte van isopropanol en kan worden geconcludeerd, dat er geen retardatie van deze tracers plaatsvindt aan de in de kolom gebruikte bodem. De doorbraakcurven van dit blanco experiment worden gegeven in figuur A5 van bijlage A.

### 3.4 Interpretatie

Om de doorbraakcurven te kunnen vertalen naar retardatie van de desbetreffende tracer wordt eerst de gemiddelde doorbraaktijd uitgerekend. Dit gebeurt met behulp van de momentenmethode [Jin et al., 1995] in bijlage A. In deze bijlage wordt de relatie berekend tussen de partiticoëfficiënt (de verhouding tussen de massa tracer die zich in de DNAPL bevindt en de massa tracer die zich in het grondwater bevindt indien deze in evenwicht zijn) en de Per-verzadigingsgraad. De partiticoëfficiënt voor de verschillende tracers is bepaald bij 4 verschillende verzadigingsgraden van Per. Bovendien is bekend, dat bij een bodem waarin zich geen DNAPL bevindt (verzadigingsgraad is 0) er geen retardatie optreedt en dus de partiticoëfficiënt gelijk is aan nul. De relatie tussen de Per-verzadigingsgraad en de partiticoëfficiënten voor de verschillende tracers wordt grafisch weergegeven in figuur 2.

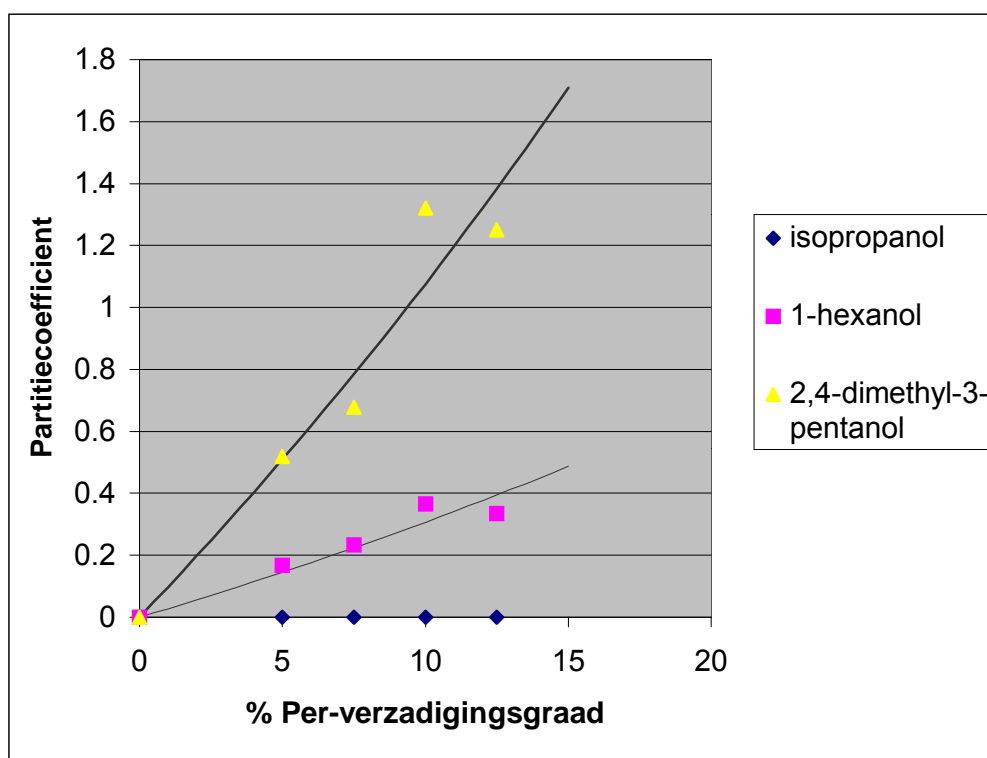


Fig. 2. Relatie tussen de Per-verzadigingsgraad en de partiticoëfficiënt voor de partitionerende tracers.

Hieruit volgt dat de partiticoëfficiënt groter wordt (en daarmee de retardatie van de tracer) naarmate de verzadigingsgraad van Per hoger is. Bij een Per-verzadigingsgraad van 12,5 % is de partiticoëfficiënt echter weer lager dan bij een Per-verzadigingsgraad van 10 %. Een mogelijke

fysische verklaring voor dit effect is dat er bij een toenemende Per-verzadigingsgraad een steeds groter gedeelte van de poriënruimte niet voor grondwaterstroming beschikbaar is, doordat de Per daar al aanwezig is. Hierdoor ontstaat er een andere stromingssituatie en is het mogelijk dat een groot gedeelte van het grondwater door een gedeelte van de buis stroomt waar lokaal de Per-verzadiging laag is. Dit effect is specifiek voor dit kolomexperiment en treedt waarschijnlijk niet op in de veldproef. Indien dit effect ook optreedt tijdens de veldproef zal de hoeveelheid DNAPL, die in de bodem aanwezig is, worden onderschat. Derhalve lijken de partitievoëfficiënten die in de kolomexperimenten zijn bepaald bij een hogere Per-verzadigingsgraad minder betrouwbaar. Bij een lagere Per-verzadigingsgraad liggen de punten wel bij benadering op een rechte lijn. Het lijkt er dus op dat de partitievoëfficiënten van 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol bij benadering lineair toenemen met de Per-verzadigingsgraad zolang deze verzadigingsgraad kleiner blijft dan 7,5 %.

Dit komt overeen met de relatie die Rao et al. [1998] geven bij de aanname dat de tracer niet retardeert aan de bodem zelf:

$$R = 1 + K_d = \frac{S_n K_n}{1 - S_n} \quad (3.1)$$

waarin:

$S_n$  is de verzadigingsgraad van de DNAPL;

$K_n$  is de partitievoëfficiënt ten opzichte van DNAPL-water.

Deze relatie is weliswaar niet-lineair, maar bij een lage DNAPL-verzadigingsgraad is deze relatie vrijwel lineair. Indien deze formule wordt gefit voor de Per-verzadigingsgraad van 5 % en 7,5 % door middel van de kleinste kwadratenmethode volgt voor  $K_n$  2,98 voor 1-hexanol en 8,8 voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.





## HOOFDSTUK 4

### VELDTEST PITT

#### 4.1 Beschrijving van de locatie

De locatie, waar de werkzaamheden zijn uitgevoerd, is gelegen op het terrein van Opticolor b.v. te Mierlo. Opticolor b.v. heeft onlangs (1999) het onderhavige pand overgenomen van een textielbewerksbedrijf. Bij de bedrijfsprocessen is Per gebruikt. Bij bodemonderzoeken, uitgevoerd door Tauw en Promeco [Promeco, 1997], zijn extreem hoge concentraties Per in het grondwater aangetroffen (tot tweemaal de oplosbaarheid). De verontreiniging is voornamelijk aangetroffen onder en ten noordwesten van de hal, die onlangs is gesloopt (zie fig. 3).

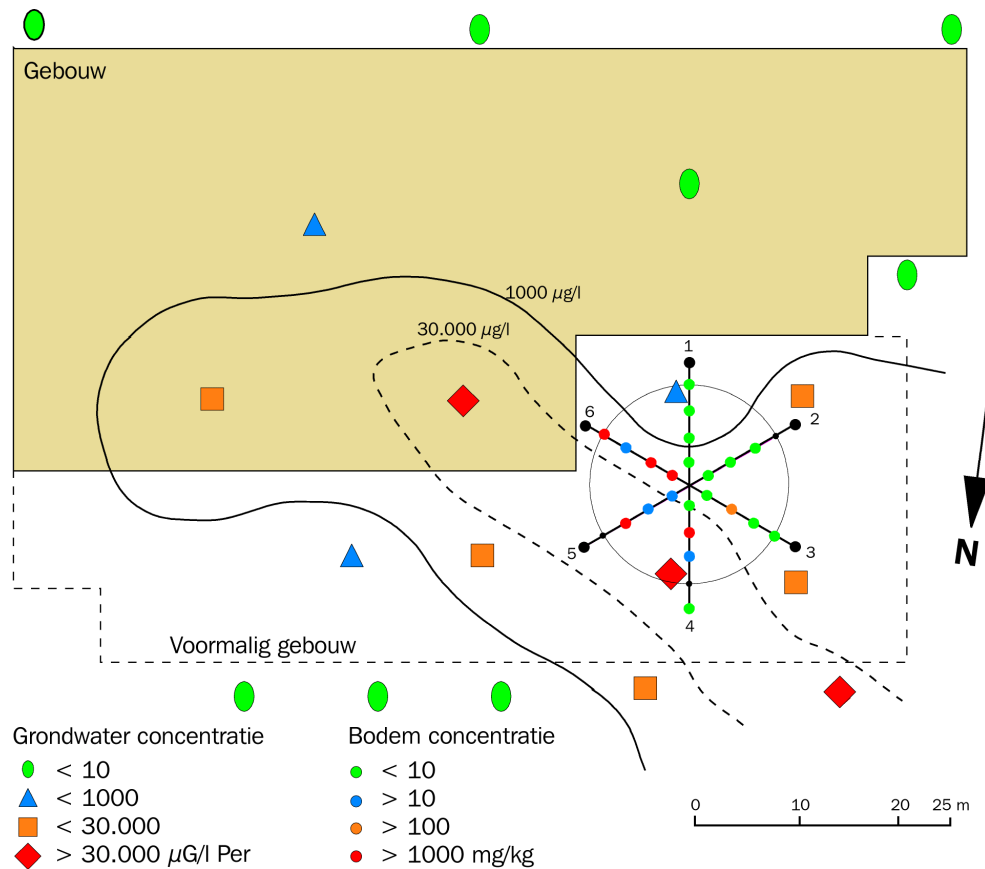


Fig. 3. Overzicht van de locatie met gemeten bodem- en grondwaterconcentraties en configuratie van peilbuizen voor de PITT op de locatie Mierlo. Het centrum van de ster is de injectieput; de uiteinden van de zes genummerde raaien zijn de onttrekkingsputten en tussenin liggen per raai 4 monitoringspeilbuizen.

Een gedetailleerd overzicht van de peilbuizen met de locatienummers is weergegeven in figuur 4.

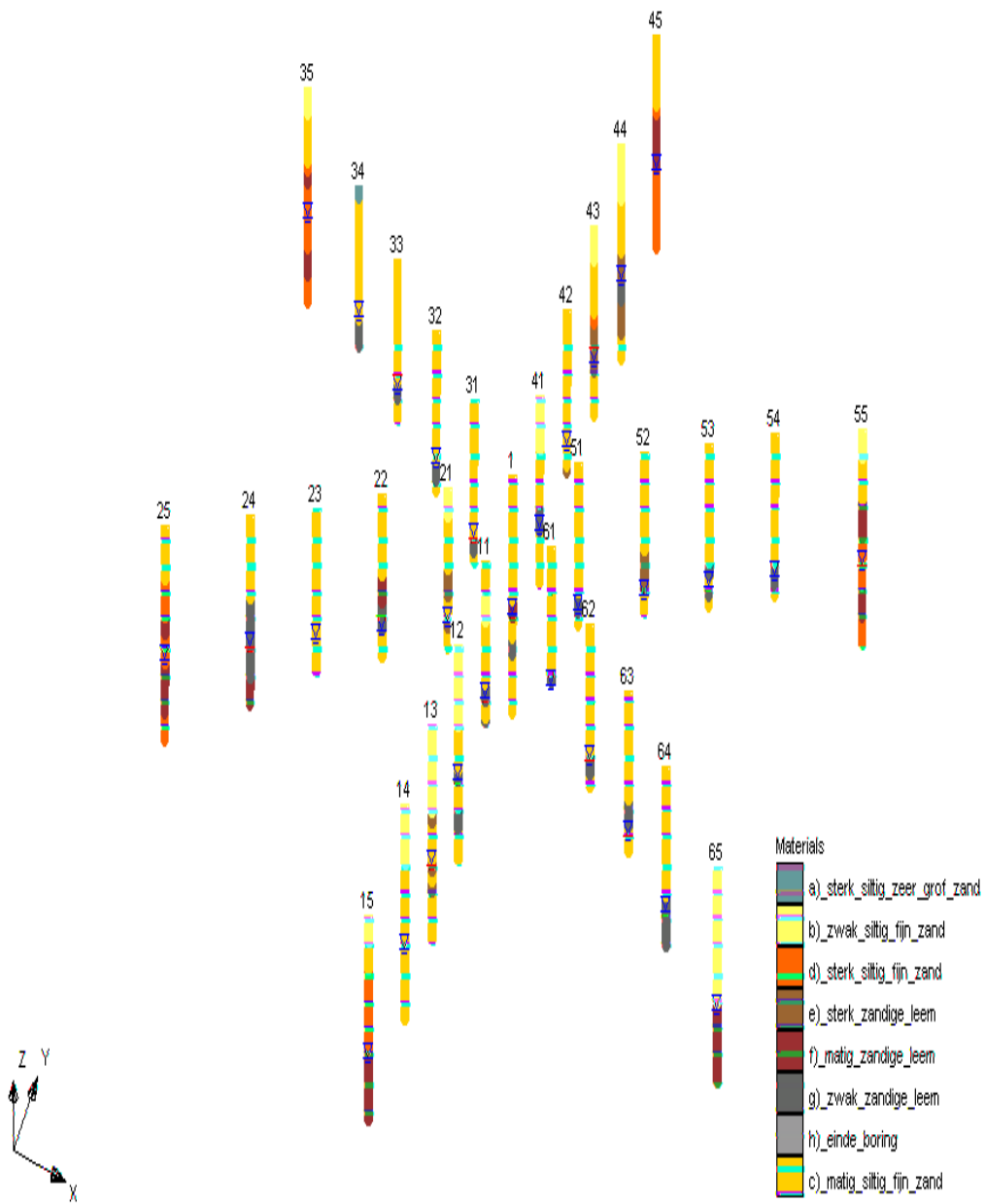


Fig. 4. Overzicht van de locatie van de peilbuizen en de beschrijving van de boorstaten.

Een overzicht van de uitvoering van de PITT op de locatie is weergegeven in figuur 5.



Fig. 5. Foto van de uitvoering van de PITT.

#### 4.1.1 *Geo(hydro)logie en verontreinigingssituatie*

De deklaag bestaat uit fijn zand met daaronder op circa 3 - 4 m-mv een leemlaag. De Perverontreiniging op deze locatie is voor zover bekend gelegen op een diepte van 3,5 tot 4,5 m-mv op deze leemlaag. De ligging en verbreiding van de leemlaag variëren in het onderzoeksgebied. Het grondwater staat op circa 2,70 m-mv, wat inhoudt dat boven de DNAPL een laag van circa 0,80 m grondwater aanwezig is. De uitvoering van de PITT is beperkt tot deze diepte.

In het grondwater zijn concentraties tot 320 mg/l gemeten, wat ongeveer tweemaal de oplosbaarheid van Per is (150 mg/l bij 10 °C). In het sediment zijn concentraties boven 14 g/kg ds aangetroffen. Beide waarden geven aan dat in de ondergrond Per als DNAPL aanwezig is. De hoogste concentraties zijn aangetroffen op drie locaties gelegen in het hart van de in figuur 3 aangegeven contour. Van de (afbraak)producten Tri en cis-dichlooretheen (Cis) zijn op verschillende plaatsen eveneens hoge concentraties aangetroffen.

#### 4.2 **Ontwerp en uitvoering**

Voor het uitvoeren van de PITT wordt gebruik gemaakt van een cirkelvormig puttensysteem. In het centrum van de cirkel worden de tracers geïnjecteerd en aan de randen van de cirkel wordt het water met zes extractieputten onttrokken. De putconfiguratie, zoals is gebruikt in de test, is schematisch weergegeven in figuur 4. Voor dit ontwerp is gekozen om een drietal redenen. Allereerst kan met dit ontwerp een (vrijwel) gesloten systeem worden verkregen, zodat een zo groot mogelijk percentage van de tracers in de onttrekkingsmiddelen wordt opgevangen. Daarnaast voorkomt dit ontwerp dat de onttrekkingsfilters droogvallen. Een derde reden is dat in sommige raaien zeer hoge concentraties DNAPL zijn gevonden en andere raaien vrijwel schoon zijn, zodat er een duidelijk verschil in partitionering tussen de verschillende raaien wordt verwacht.

De theoretisch berekende stijghoogtenverdeling, die bij dit ontwerp hoort, wordt weergegeven in figuur 6.

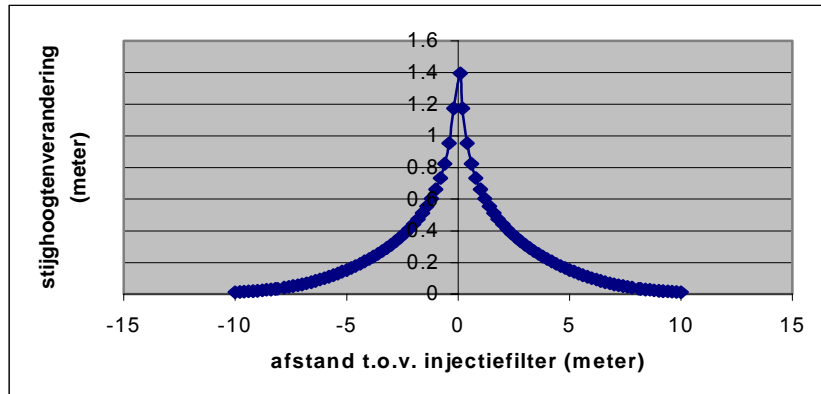


Fig. 6. Doorsnede van de modelvoorspelling van de stijghoogtenverdeling.

Deze stijghoogtenverdeling is gebaseerd op een pakket met een doorlatendheid van 2 m/dag, een dikte van 1 m en een debiet van 4 m<sup>3</sup>/dag en putfilters met een straal van 0,1 m. Het is duidelijk dat de stijghoogtenverlaging in de onttrekkingsputten minimaal is en de stijghoogtenstijging in de injectieput aanzienlijk is. Het gebruikte ontwerp is ideaal voor deze locatie, omdat hier een zeer geringe aquiferdikte is en een relatief dikke onverzadigde zone.

Omdat de verzadigde dikte van de laag boven de leemlaag zeer gering is, is ervoor gekozen om maar één filter per observatiepeilbuis te plaatsen. Hierdoor zal dus alleen informatie worden verkregen over de laterale spreiding van de verontreiniging in de ondergrond. De monsters worden alleen in de 4-6 tussengelegen monitoringsputten genomen en niet in de injectie- of onttrekkingsputten.

De tracertest is uitgevoerd van 19 oktober tot en met 17 november.

#### 4.2.1 *Injectiewater*

Het geplande injectiedebiet was 4 m<sup>3</sup>/dag en zou, zoals gezegd, worden geïnjecteerd in het midden van de cirkelvormige testopzet. Het water zou worden geïnjecteerd in twee filters (diameter 50 mm, HDPE, met zandomstorting). Het bovenste filter ligt boven de leemlaag. Hierin zou volgens planning 2 m<sup>3</sup>/dag water, waarin de tracers zijn opgelost, worden geïnjecteerd. Het tweede filter ligt onder de leemlaag en hierin zou volgens de planning ook 2 m<sup>3</sup>/dag water worden geïnjecteerd. Dit water zou echter geen tracers bevatten. Deze debieten waren zo gepland om een minimaal stijghoogteverval over de leemlaag te creëren, zodat de tracer hier niet doorheen kon worden getrokken. Dit kan worden gecontroleerd door stijghoogtemetingen. In dat geval zal een gedeelte van de tracer veel langer onderweg zijn vanwege de lage stroomsnelheid door de leemlaag. Dit gedeelte van de tracer komt door de vermoedelijke locatie van de DNAPL-bronzone (net boven de leemlaag) en bevat naar verwachting de meeste informatie over de hoeveelheid DNAPL. Daarom moet dit gedeelte van de tracer in een goed doorlatende zone blijven, zodat het bemonsterd kan worden.

De injectiedebieten, die in werkelijkheid zijn gehanteerd, bedragen gemiddeld 1,2 m<sup>3</sup>/dag in het bovenste filter en 0,5 m<sup>3</sup>/dag in het onderste filter. Bij grotere debieten loopt de injectiepeilbuis over. Het debiet, zoals dat is gemeten in het bovenste filter gedurende de injectie van de tracer, is weergegeven in figuur 7.

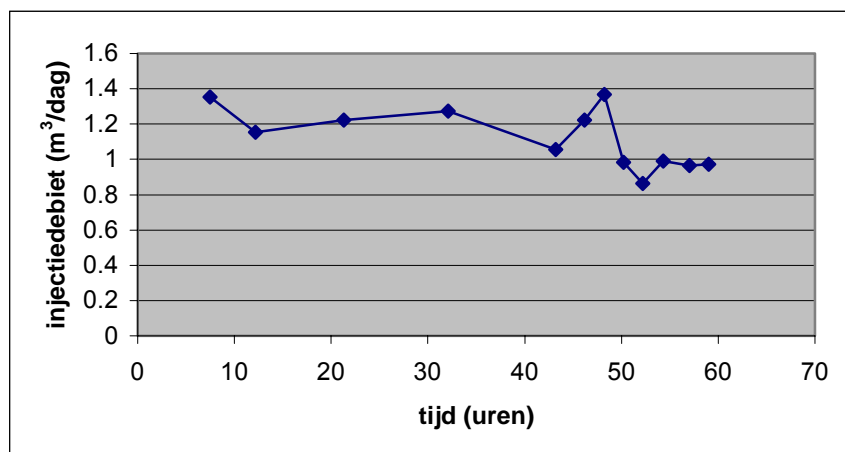
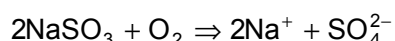


Fig. 7. Injectiedebiet in het bovenste filter tijdens de injectie van de tracer.

Water dat gebruikt is voor de injectie van de tracers is verkregen van het interne waterleiding-systeem op de locatie. Dit water is via een watermeter door HDPE- of PVC-leidingen geleid naar de locatie. Het water bevatte zuurstof, wat kon reageren met het mogelijk in het grondwater aanwezige ijzer. Om verstopping van de injectie- en extractiefilters door neerslag van ijzer-(hydr)oxide te voorkomen, is het water voorbehandeld met natriumsulfiet waarmee de zuurstof in het water omgezet is met de volgende reactie:



#### 4.2.2 Tracers

Voor het uitvoeren van de PITT is gebruik gemaakt van twee type tracers: bromide als een conservatieve tracer en 1-hexanol, isopropanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol als *partitionerende* tracers. Voor deze tracers is gekozen omdat deze partitioneren in de DNAPL en aanzienlijk minder vluchtig zijn dan de aanvankelijk geplande tracer SF<sub>6</sub>. De tracers moeten in contact komen met de DNAPL's en niet door bijvoorbeeld vervluchtiging uit de bodem verdwijnen. De dosering van de tracers is continu gebeurd met een slangenpomp waarvan het debiet regelbaar is. De toe te dienen tracerstoffen zijn voor de gehele uitvoering van het project in één keer klaargemaakt. Dit om te voorkomen dat in de loop van de tijd de onderlinge verhoudingen kunnen variëren.

De toediening van de tracers heeft gedurende 2,5 dag plaatsgevonden. Deze periode is zodanig lang, dat er tijdens de doorbraak in een peilbuis meerdere monsters genomen kunnen worden, gebaseerd op eenmaal daags bemonsteren, en de doorbraakcurve goed valt vast te leggen. Na de injectie van de tracers is de injectie van tracerloos water (de chaser) doorgegaan tot het einde van de tracertest.

De bromideconcentratie van het injectiedebiet was 650 mg/l en de concentraties van de partitionerende tracers was 2200 mg/l voor isopropanol en 2300 mg/l voor 2,4-dimethyl-3-pentanol en 1-hexanol. De bemonstering van de tracer in het injectiewater heeft gedurende de drie dagen van de injectie viermaal per 24 uur plaatsgevonden. Het debiet is gemeten met een standaard watermeter.

#### 4.2.3 *Installatie voor de onttrekking*

Het werkelijke onttrekkingsdebiet was tijdens de PITT 0,12 m<sup>3</sup>/dag en was min of meer evenredig verdeeld over de 6 onttrekkingsputten. Dit was kleiner dan het geplande onttrekkingsdebiet, hetgeen even groot was als het geplande injectiedebiet. Het stromingspatroon is hierdoor vooral aan de buitenkant van de opstelling wat veranderd ten opzichte van het ontwerp. Dit effect wordt meegenomen tijdens de modellering van de PITT in hoofdstuk 5. De onttrekking gebeurde met een slangenpomp, omdat onderwaterpompen het lage benodigde debiet niet aankonden.

#### 4.2.4 *Voorverkenning*

Verschillende voorverkenningen zijn uitgevoerd. Allereerst is door middel van een aantal aanvullende boringen binnen het testgebied en de directe omgeving een meer gedetailleerd beeld verkregen van de bodemopbouw, met de ligging van de leemlaag (-lagen) in het bijzonder. Daarnaast is door middel van een *on-site* screening, onderzoek verricht naar de aanwezigheid van DNAPL's in zowel laterale richting als over de diepte. Hiervoor is door middel van een kleurtest (Sudan rood meting) nagegaan of in bodemonsters DNAPL zit. Indien dit het geval was, zijn grondmonsters genomen waarvan in het laboratorium het gehalte DNAPL is bepaald.

Verder is voor de aanvang van de tracertest met de partitionerende tracers een verkennende tracertest uitgevoerd met chloride (NaCl). Dit is nodig omdat het voor de uitvoering van het experiment van essentieel belang is om duidelijkheid te verkrijgen over de werkelijke doorlatendheid van de bodem. Deze tracertest met chloride heeft een indicatie gegeven over de doorlatendheid van de verschillende bodemlagen en de mogelijke stromingssnelheden die hierin verkregen kunnen worden. Op basis van de zo verkregen gegevens over de doorlatendheid is de PITT uitgevoerd. Nogmaals wordt aangegeven dat door de heterogeniteit van de ondergrond een modelmatige schatting van de doorbraakcurven niet voldoende nauwkeurig is. Daarnaast moest worden voorkomen dat bij de monsternamen een foutief schema zou worden gehanteerd, waardoor de piek van de doorbraak zou kunnen worden gemist.

De chloride-tracer brak na ongeveer 1 dag door in de eerste ring peilbuizen, hetgeen ook de verwachting was.

#### 4.2.5 *Monsternamen en analyses*

Voor het analyseren van het verloop van de tracers zijn monitoringsfilters geplaatst. Deze filters zijn zo dicht mogelijk bij de leemlaag geplaatst om de reactie van de partitionerende tracer ten opzichte van de conservatieve tracer te kunnen waarnemen. Er zijn 24 (4-6) meetfilters met een effectieve filterlengte van 0,5 m geplaatst in de directe lijn tussen de injectieputten en de extractieputten (zie fig. 4). De afstand tussen de aangrenzende peilbuizen en de eerste peilbuis en de injectieput bedraagt 1,5 m, terwijl de onttrekkingsput op 2 m van de buitenste monitoringspeilbuis ligt.

De monsternamen heeft gedurende het begin van de tracertest dagelijks plaatsgevonden. Later is deze frequentie verlaagd tot 2 keer per week. Tijdens de uitvoering bleek dat de peilbuizen 22 en 43 vrijwel droogstonden. De monsters uit peilbuis 24 zijn niet geanalyseerd, omdat peilbuis 23 pas net aan het einde van de test doorbrak en de doorbraak in peilbuis 24 derhalve nog niet werd verwacht. De analyse van de monsters is uitgevoerd door het laboratorium van Tauw.

### 4.3 **Resultaten**

#### 4.3.1 *Conventionele karakterisatie van DNAPL*

Tijdens het zetten van de peilbuizen en de injectie- en onttrekkingsfilters zijn de beschrijvingen van de boringen gemaakt. Deze boorstaten zijn weergegeven in bijlage B. Uit deze boringen blijkt

dat de leemlaag gemiddeld tussen 2,80 en 3,40 m-mv aanwezig is, maar dat in enkele peilbuizen de leemlaag niet is aangetroffen.

Op een aantal plaatsen zijn tijdens de boringen ook Sudan rood metingen uitgevoerd. Met behulp van deze metingen kan worden bepaald of puur product DNAPL in de bodem aanwezig is. De resultaten van de Sudan rood metingen zijn aangegeven op de boorstaten in bijlage B. Deze meting heeft positief gereageerd op de locaties: injectieput en de peilbuizen 32, 42, 43, 44, 45, 51, 53, 54, 55, 61, 62, 63 en 64 (zie fig. 4 voor de ligging van deze peilbuizen).

Tijdens het zetten van de peilbuizen zijn op een aantal locaties ook bodemmonsters genomen. Deze zijn in het laboratorium geanalyseerd op Per. De resultaten van deze analyses zijn weergegeven in bijlage C. Op de locaties van de peilbuizen 32, 53, 61, 62 en 64 zijn duidelijk hoge concentraties Per aanwezig (> 100 mg/kg ds). Dit klopt met de Sudan rood metingen die hier ook positief waren.

#### 4.3.2 Doorbraakcurven van de PITT

De doorbraakcurven, die bij de tracettest zijn gemeten, zijn weergegeven in bijlage D. Hieruit blijkt duidelijk dat de partitionerende tracers later doorbreken dan bromide in de peilbuizen 13, 32, 41, 42, 53, 62, 63 en 64. De peilbuizen 31, 51 en 52 geven eenzelfde piekdoorbraak voor bromide en de partitionerende tracers, maar de partitionerende tracers hebben duidelijk een ander tailing hetgeen kan duiden op een niet-evenwichtsproces. De peilbuizen 12 en 52 geven duidelijk meerdere doorbraken aan. Dit kan worden veroorzaakt door twee fronten, die op verschillende diepten doorbreken, en die beide worden bemonsterd vanuit hetzelfde filter.





## HOOFDSTUK 5

### MODELLERING

#### 5.1 Opzet van de modellering

De modellering van de PITT wordt in twee fasen gedaan. In de eerste fase worden de modelparameters geschat door middel van een invers model met behulp van de bromidedata. In deze fase wordt een schatting gemaakt voor alle bodemparameters, die van invloed zijn op het transport van de conservatieve tracer bromide, zoals de doorlatendheid, porositeit, dispersiviteiten en adsorptieparameters. Vervolgens worden de reactieve tracers gebruikt om de partiticoëfficiënten voor deze tracers ten gevolge van de partitionering aan de DNAPL's te schatten. In deze fase worden de overige modelparameters niet meer veranderd, zodat het verschil in doorbraak tussen bromide en de alcoholen uitsluitend wordt verklaard door de partitionering aan de DNAPL's.

De fysische processen, die door het model worden beschreven, zijn advectie, dispersie en een kinetische uitwisseling tussen een mobiele en immobiele zone. Voor dit laatste proces is gekozen omdat sommige doorbraakcurven een lange staart vertonen, hetgeen wijst op een niet-evenwichtssysteem. Een uitgebreide beschrijving van het model wordt gegeven in bijlage E.

#### *Systeemruis*

Helaas is het onmogelijk gebleken om de doorbraakcurven van de tracers exact te fitten met uitsluitend de bovengenoemde fysische processen. Daarom bevat het model ook systeemruis, een 'black box' term, waarmee alle resterende fouten van het model kunnen worden gekwantificeerd. Voorbeelden van mogelijke resterende fouten zijn: de verwaarlozing of vereenvoudiging van fysische processen (b.v. niet-evenwicht in het partitioneringsproces en afbraak) en discretisatiefouten.

Systeemruis wordt vaak toegepast in andere disciplines, zoals elektrotechniek [Schweppe, 1973] en oceanografie [Bennett, 1992], maar wordt ook gebruikt in de geohydrologie [Van Geer, 1987; Te Stroet, 1995]. Het voordeel van deze systeemruis is dat de schatting van de overige modelparameters beter verloopt, omdat deze niet hoeven te worden aangepast om de gevolgen van de fouten in het model te verklaren. Bovendien zijn met behulp van systeemruis de doorbraakcurven beter te fitten. Een gevaar van het gebruik van systeemruis is dat deze ook een gedeelte van de fysische processen kan verklaren, die in werkelijkheid worden veroorzaakt door een fysisch proces dat wel in het model aanwezig is. Om dit te voorkomen moet de invloed van systeemruis zo klein mogelijk worden gehouden, waarbij de doorbraakcurven wel adequaat gefit moeten worden.

#### *Modelgebied*

Van het testgebied is een tweedimensionaal model gemaakt met een oppervlakte van circa 18 bij 18 m<sup>2</sup>. De modelementen zijn rechthoekig en hebben een grote van 0,375 m in de x-richting en 0,433 m in de y-richting. Het model bestaat totaal uit 49 bij 43 knooppunten. De grootte van de cellen is zodanig gekozen, dat alle peilbuizen en de injectieput op een knooppunt van het modelgrid liggen (zie fig. 8).

Fig. 8. Modelgrid en ligging van de injectieput (1), onttrekkingsputten (15, 25, 35, 45, 55 en 65) en monitoringspeilbuizen (overige peilbuizen).

#### Modelparameters

Het injectiedebiet is 1,2 m<sup>3</sup>/dag en bevat alleen tracers gedurende de eerste 2,5 dagen. Daarna blijft het injectiedebiet gelijk, maar is de concentratie in het geïnjecteerde water gelijk aan nul. De onttrekkingsdebieten zijn 0,02 m<sup>3</sup>/dag voor alle 6 onttrekkingen. De tijdstap waarmee het model wordt doorgerekend is 0,25 dagen. De a-priori statistieken van de modelparameters en de meetfouten worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. A-priori statistieken van de modelparameters en de meetfouten.

modelparameter	gemiddelde	variantie	correlatielengte
In transmissiviteit *	ln (0,75 m <sup>2</sup> /dag)	1,0	1,0 m
In dispersiviteit, longitudinaal	ln (0,075 m)	1,0	1,0 m
In dispersiviteit, transversaal	ln (0,025 m)	1,0	∞
In mobiele porositeit maal de dikte van het doorstroomde pakket	ln (0,075 m)	1,0	∞
In uitwisselingscoëfficiënt	ln (0,001 1/dag)	1,0	1,0 m
In immobiele porositeit maal de dikte van het doorstroomde pakket	ln (0,15 m)	1,0	∞
systeemruisparameter	0,0	0,001	1,0 m
meetfout	0,0	(10 % van de meetwaarde) <sup>2</sup>	-

\* Met de notatie 'ln transmissiviteit' wordt aangegeven dat de werkelijk parameter die tijdens het inverse model wordt geschat de natuurlijke logaritme van de transmissiviteit is. De bijbehorende gemiddelden en variantie gelden voor de natuurlijke logaritme van de parameter.

Van de meeste parameters wordt in het inverse model de waarde voor de natuurlijke logaritme geschat. Dit heeft als voordeel dat de werkelijk parameters nooit negatief kunnen worden in het inverse model en sommige bodemparameters blijken vaak ook een lognormaal verdeelde functie te zijn, zoals de doorlatendheid en transmissiviteit [Bierkens, 1994]. Het gemiddelde van de transmissiviteit is bepaald op de gemeten stijghoogten tijdens de uitvoering van de PITT.

Op de locatie in Mierlo bleek het helaas niet mogelijk te zijn om de doorbraakcurven van alle tracers met uitsluitend de bovengenoemde fysische processen en het gebruikte modelgrid te fitten. Een kleinere discretisatie en een driedimensionaal model zouden uitkomsten kunnen bieden, maar dit vergt een zeer lange rekentijd (meerdere weken) voor het inverse model. Bovendien heeft een driedimensionaal model alleen meerwaarde indien de metingen ook in drie dimensies zijn uitgevoerd, hetgeen in Mierlo niet het geval is.

Om de doorbraakcurven toch goed te kunnen fitten, wordt in het model ook een systeemruisterm meegeschat. Deze systeemruis is een vergaarbak voor alle fouten van het model. Deze fouten kunnen worden veroorzaakt door de te grove discretisatie of de te grove vereenvoudiging van de fysische processen.

Uiteraard is het de bedoeling om deze systeemruisterm zo klein mogelijk te houden, om zodoende het verloop van de doorbraakcurve zoveel mogelijk uit fysisch onderbouwde verschijnselen te verklaren. Bovendien moet het verschil in de gemiddelde doorbraaktijd ten gevolge van deze systeemruis klein zijn, omdat anders de schatting van de partiticoëfficiënten van de reactieve tracer niet meer accuraat kan plaatsvinden. Indien de invloed van de systeemruis niet klein is, kan het effect van de systeemruis worden vertaald naar een correctie op de retardatiefactor voor de partitionerende tracers door de gemiddelde doorbraaktijden van alle tracers met elkaar te vergelijken en hieruit een effectieve retardatie te bepalen. Deze vertaling van de systeemruis naar een aangepaste retardatiefactor is verder uitgewerkt in bijlage G.

#### *Gebruikte meetdata*

Van de gemeten doorbraakcurven zijn een aantal metingen niet meegenomen in het inverse model. Dit zijn alle metingen van de gehele 2<sup>e</sup> raai, omdat de peilbuizen waarin data zijn gemeten, 21 en 23, zeer lage concentraties vertonen en het goed mogelijk is dat het grondwater onder de filters doorstroomt. Ook peilbuis 12 wordt niet meegenomen in deze berekeningen, omdat deze een drietal verschillende doorbraakpieken geeft (zie fig. D1 in bijlage D). Het is mogelijk dat de grondwaterstromen in drie verschillende laagjes stroomt en het filter van de peilbuis in alle drie de laagjes staat. Deze mogelijke gelaagdheid is niet te modelleren met het tweedimensionale model, zodat het fitten van deze doorbraak zeer discutabele modelparameters kan geven. De metingen in de overige peilbuizen worden wel meegenomen in het inverse model, maar niet alle punten op de doorbraakcurven zijn meegenomen in het inverse model om rekentijd te besparen.

## **5.2 Modelling van de conservatieve tracer**

De berekende en gemeten doorbraakcurven van de bromidedata worden weergegeven in figuur 9.

De fit van de doorbraakcurven is over het algemeen zeer goed. Zoals reeds is vermeld, zijn de metingen in de peilbuizen 12, 21 en 23 niet meegenomen in het inverse model. Deze doorbraken worden dan ook niet goed gefit. De overige verschillen tussen de meetwaarden en de berekende waarden verklaart het inverse model uit een meetfout.

Fig. 9. Berekende en gemeten doorbraakcurven van bromide.

*Geschatte bodemparameters*

De schatting van de bijbehorende bodemparameters, de transmissiviteit, de mobiele porositeit maal de dikte van het doorstroomde pakket en de uitwisselingscoëfficiënt tussen mobiele en im-mobiele zone zijn weergegeven in figuur 10 en in de figuren F1 en F2 van bijlage F.

Uit het grillige verloop van het geschatte transmissiviteitsveld valt af te leiden dat de stroom-banen niet overal recht zullen lopen. Dit heeft tot gevolg dat de peilbuizen binnen een raai niet op dezelfde stroombaan zullen liggen.

Fig. 10. Geschatte verdeling van de transmissiviteit in (m<sup>2</sup>/dag).

De schatting van de overige modelparameters die niet variëren in de ruimte, de dispersiviteiten en de immobiele porositeit, zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Schatting van de dispersiviteiten en de immobiele porositeit.

modelparameters	a-priori schatting	a-posteriori schatting
longitudinale dispersiviteit	0,075 m	0,107 m
transversale dispersiviteit	0,025 m	0,004 m
immobiele porositeit	0,10	0,10

Om te kijken of de schatting van de systeemruis een grote invloed heeft op de doorbraakcurven zijn deze nogmaals uitgerekend met berekende modelparameters, maar zonder systeemruis. De resulterende doorbraakcurven zijn weergegeven in figuur F3 van bijlage F.

Uit de verschillen tussen de figuren 9 en F3 van bijlage F blijkt dat de invloed van de systeemruis op de doorbraaktijden wel degelijk van belang is. De geschatte retardatiefactoren voor de

partitionerende tracers moeten dan ook worden gecorrigeerd voor dit effect. In bijlage G zijn de gemiddelde doorbraaktijden en de doorbraaktijd van de piek weergegeven in tabelvorm.

### 5.3 Modelling van partitionerende tracers

De berekende en gemeten doorbraakcurven van de twee partitionerende tracers worden weergegeven in figuur 11 (1-hexanol) en figuur F4 (2,4-dimethyl-3-pentanol) in bijlage F. De tracer isopropanol bleek zowel in de veldtest als in de kolomproeven niet te retarderen ten opzichte van bromide en is daarom niet meegenomen in de verdere modellering.

Fig. 11. Berekende en gemeten doorbraakcurven van 1-hexanol.

De berekende concentraties komen over het algemeen goed overeen met de gemeten concentraties. De doorbraakcurven van peilbuis 12, 21 en 23 komen niet overeen met de gemeten doorbraakcurven, maar deze data waren ook niet meegenomen in het inverse model. Bij de overige peilbuizen valt het op dat de berekende doorbraken van zowel 1-hexanol als 2,4-dimethyl-3-pentanol de tweede piek in peilbuis 52 missen en het inverse model het verschil in concentraties verklaart via de meetfout.

Om te controleren of de systeemruis hier ook een grote invloed heeft op de doorbraaktijden is ook weer een modelrun uitgemaakt, waarbij de schatting voor de systeemruis op 0 is gezet. De berekende doorbraakcurven voor de tracers zonder systeemruis zijn weergegeven in de figuren F5 en F6 van bijlage F.

Ook hier blijkt dat de invloed van de systeemruis op de doorbraakcurven niet te verwaarlozen valt en moet er voor dit effect worden gecorrigeerd om betrouwbare retardatiefactoren te kunnen berekenen.

De ongecorrigeerde berekende retardatiefactoren, zoals die rechtsreeks met het inverse model zijn bepaald voor deze 2 tracers, worden weergegeven in de figuren 12 en F7 van bijlage F.

Fig. 12. Berekende retardatiefactoren voor 1-hexanol.

Bij deze retardatiefactoren moet rekening worden gehouden met het feit dat de a-priori schatting van deze retardatiefactor 1,1 was. Bij de meeste peilbuizen in de buitenste ring zijn de tracers nog niet of nauwelijks doorgebroken, zodat er buiten de 3<sup>e</sup> ring peilbuizen geen informatie over de vertraging van de partitionerende tracers in de metingen aanwezig is. De schatting van de retardatiefactor in deze gebieden blijft dan ook op het a-priori gemiddelde staan en zijn derhalve niet betrouwbaarder dan de schatting vooraf.

*Correctie voor de invloed van de systeemruis op de geschatte retardatiefactoren*

Het blijkt dat de schatting van de systeemruis zodanig groot is dat het de gemiddelde doorbraaktijd in de monitoringspeilbuizen duidelijk beïnvloedt. Derhalve bepalen niet alleen de berekende retardatiefactoren het verschil tussen de doorbraak van de verschillende tracers, maar ook de schattingen van de systeemruis. Het is de verwachting dat het enige proces, dat de vertraging van de partitionerende tracers in werkelijkheid veroorzaakt, de retardatie aan de DNAPL is. Daarom moet de extra vertraging, die wordt veroorzaakt door de systeemruis, ook worden vertaald naar een grotere of kleinere retardatiefactor. De methode, die hiervoor is toegepast, wordt beschreven in de bijlage G.

Bij deze methode wordt één aanname gedaan. Er wordt van uitgegaan dat de vertraging, die tussen 2 peilbuizen in een raai wordt opgelopen, uitsluitend wordt veroorzaakt door partitionering in het gebied tussen de twee peilbuizen. Gezien de grillige ruimtelijke verdeling van de transmissiviteit is het niet ondenkbaar dat sommige peilbuizen niet op dezelfde stroombaan liggen. Daarom veroorzaakt deze aanname een extra onzekerheid van de uiteindelijke schatting van de retardatiefactoren.

Bovendien worden de gebieden buiten de 3<sup>e</sup> raai niet gecorrigeerd, omdat in de buitenste ring peilbuizen de tracers niet of nauwelijks waren doorgebroken op het einde van de veldtest.

De resultaten van de aangepaste retardatiefactoren worden voor 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol weergegeven in de figuren 13 en F8 van bijlage F.

Het blijkt dat de ruimtelijk verdeling van de retardatiefactoren voor 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol grotendeels hetzelfde ruimtelijk patroon vertoont. De retardatiefactoren van raai 3 en 4 zijn voor beide tracers vrijwel gelijk aan 1, behalve in het gebied tussen peilbuis 31 en 32. Verder zijn de retardatiefactoren voor beide tracers hoog tussen peilbuis 12 en 13, tussen peilbuis 52 en 53 en tussen de injectieput en peilbuis 51. Bij raai 6 is de retardatiefactor voor 2,4-dimethyl-3-pentanol hoog, terwijl de retardatiefactor voor 1-hexanol alleen bij peilbuis 62 verhoogd is.



Fig. 13. Retardatiefactor voor 1-hexanol, na correctie voor de invloed van de systeemruis.



## INTERPRETATIE EN DISCUSSIE VAN DE MODELLERING

### 6.1 Berekening van de DNAPL-verzadigingsgraad

Met behulp van de in hoofdstuk 5 berekende retardatiefactoren voor 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol wordt nu een schatting gemaakt van de Per-verzadigingsgraad op het terrein. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de relatie tussen de Per-verzadigingsgraad ( $S_{\text{per}}$ ) en de retardatiefactor ( $R$ ) van de tracer die met de kolomproeven zijn bepaald.

De relatie die wordt gebruikt is bepaald uit de grafiek van figuur 2.

$$S_{\text{per}} = \frac{R_{1\text{-hexanol}} - 1}{R_{1\text{-hexanol}} + 1,98} \cdot 100 \% \quad (6.1)$$

$$S_{\text{per}} = \frac{R_{2,4\text{-dimethyl-3-pentanol}} - 1}{R_{2,4\text{-dimethyl-3-pentanol}} + 7,8} \cdot 100 \% \quad (6.2)$$

Hierbij wordt aangenomen dat het effect, dat bij hoge verzadigingsgraden (12,5 % in de kolomproef) de retardatiefactor lager kan zijn omdat de tracers om de gebieden met een hoge Per-verzadiging heen stromen, niet optreedt bij de veldproef. Mocht dit wel optreden, dan leidt dit tot een onderschatting van de Per-verzadigingsgraad.

De resulterende ruimtelijke verdeling van de Per-verzadigingsgraad voor 1-hexanol en voor 2,4-dimethyl-3-pentanol wordt weergegeven in de figuren 14 en 15.

### 6.2 Betrouwbaarheid van de resultaten

Uit de figuren 14 en 15 blijkt al dat de Per-verzadigingsgraad, die met beide tracers zijn bepaald, niet exact overeenkomen. Op sommige locaties worden met beide tracers hoge Per-verzadigingsgraden bepaald, maar op andere locaties komen de schattingen minder goed overeen.

Met behulp van beide tracers zal nu een schatting worden gemaakt van de totale massa Per die aanwezig is op de locatie. Tevens wordt er een schatting gemaakt van het absolute minimum en maximum van de Per-verzadigingsgraad op de locatie. Hiertoe worden van beide schattingen van de Per-verzadigingsgraad de minima en maxima per modelcel bepaald en deze vervolgens gesommeerd en omgewerkt naar massa om de uiterste totale vracht aan Per uit te rekenen.

De schatting van de totale massa Per gebeurt alleen binnen de eerste drie ringen, omdat de proef vrijwel geen informatie heeft opgeleverd over de Per-verzadigingsgraad buiten de eerste drie ringen.

Fig. 14. Schatting van de Per-verzadigingsgraad bepaald uit data van 1-hexanol.

Fig. 15. Schatting van de Per-verzadigingsgraad bepaald uit data van 2,4-dimethyl-3-pentanol.

De totale vracht aan Per wordt omgerekend naar massa met behulp van de volgende formule:

$$m_{\text{per}} = \sum S_{\text{per}} \cdot n \cdot D \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho \quad (6.3)$$

waarin:

- $m_{\text{per}}$  is de totale massa Per;
- $S_{\text{per}}$  is de Per-verzadigingsgraad;
- $n \cdot D$  is de porositeit maal de dikte van het pakket;
- $\Delta x$  is de cellengte in de x-richting;
- $\Delta y$  is de cellengte in de y-richting;
- $\rho$  is het soortelijk gewicht van Per (1623 kg/m<sup>3</sup>).

De schattingen van de totale massa aan Per binnen de eerste drie ringen bedraagt 204 kg voor de data van 1-hexanol en 82 kg voor de data van 2,4-dimethyl-3-pentanol. Indien per modelcel steeds de minima en maxima uit beide datasets worden gekozen, bedragen de schattingen van

de massa aan Per 71 kg en 214 kg respectievelijk. Hieruit blijkt dat de schatting uit de data van 1-hexanol vrijwel altijd groter is dan de schatting uit de data van 2,4-dimethyl-3-pentanol.

*Vergelijking met bodemmonsters en concentratiemetingen in grondwater*

De schattingen van de Per-verzadigingsgraad zullen nu worden vergeleken met de resultaten van de bodemmonsters, die zijn genomen tijdens het plaatsen van de peilbuizen. De concentraties van deze bodemmonsters zijn weergegeven in bijlage C. De ruimtelijke verspreiding van de bodemmonsters is weergegeven in figuur 16.

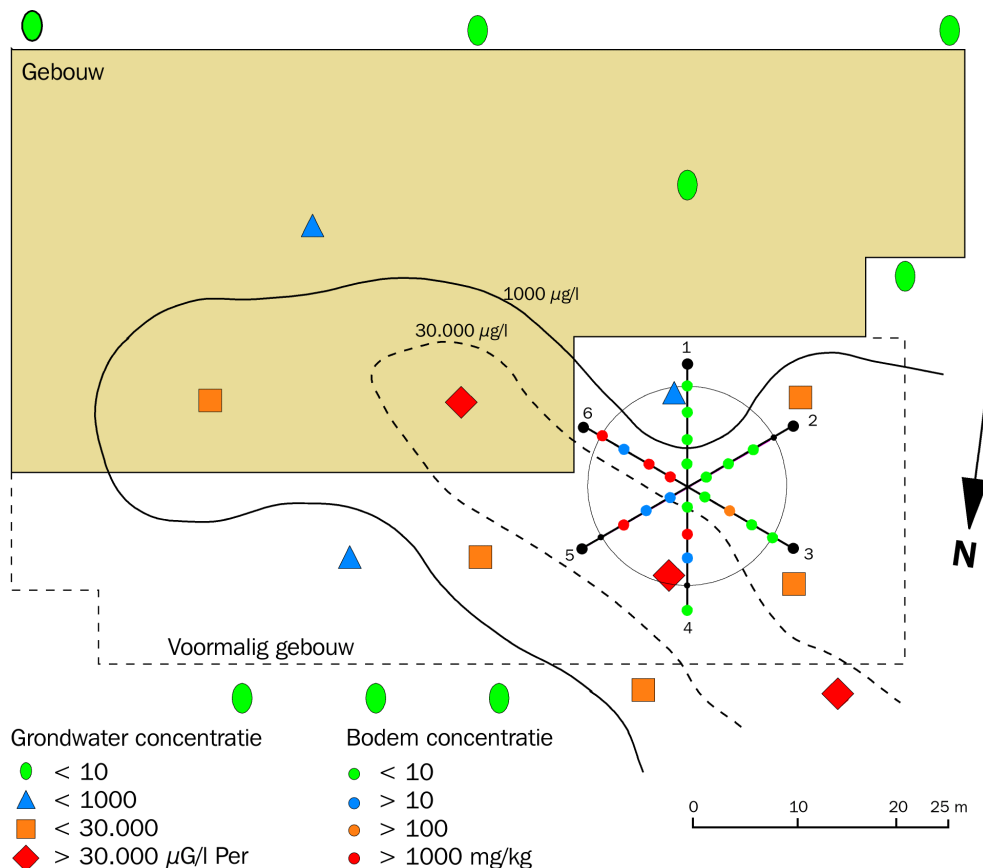


Fig. 16. Ruimtelijke verspreiding van de bodemconcentraties op de locaties van de peilbuizen.

De bodemmonsters zijn lokale puntwaarnemingen, die geen duidelijke ruimtelijke structuur vertonen. Interpolatie van deze data hangt sterk af van de gebruikte interpolatiemethode, zodat hier is besloten om uitsluitend de totale vracht aan Per uit te rekenen aan de hand van het gemiddelde van de bodemmonsters. Tevens wordt ook de standaardafwijking uitgerekend. Een schatting van het gemiddelde en de standaardafwijking zijn dan als volgt uit de bodemmonsters te bepalen:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k \tag{6.4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N (S_k - \mu)^2} \tag{6.5}$$

waarin:

- $\mu$  is de schatting van de gemiddelde bodemconcentratie;
- $S_k$  zijn de concentraties van bodemmonster k;
- N is het aantal bodemmonsters;
- $\sigma$  is de schatting van de standaardafwijking.

Om een goed vergelijk te kunnen maken met de schatting van de PITT worden alleen de bodemmonsters van de binnenste drie ringen gebruikt, omdat de PITT vrijwel geen informatie oplevert over de vierde ring.

De bodemmonsters in bijlage C hebben een gemiddelde van 595 mg/kg ds en de standaardafwijking bedraagt 300 mg/kg ds. De schatting van het gemiddelde wordt zeer sterk bepaald door de hoge waarnemingen. Het net missen of wel meenemen van een bodemmonster met een hoge concentratie heeft dan ook een grote invloed op de uiteindelijk schatting van het gemiddelde.

De geschatte totale massa aan Per binnen de binnenste drie ringen bedraagt 61 kg, indien 1,610 kg/l voor het soortelijk gewicht van de droge stof (Marshall en Holmes [1979] geven deze waarde voor het soortelijk gewicht van zand) en 1,0 m voor de dikte van het pakket wordt aangehouden. De betrouwbaarheid van deze schatting van de totale massa Per is relatief klein, gezien de zeer grillige ruimtelijke spreiding van de concentraties in de bodemmonsters.

De geschatte ruimtelijke verdeling van de Per-verzadigingsgraden verklaart ook het globale patroon van de grondwatermonsters in figuur 16. De hoge Per-verzadigingsgraden in raai 5 en 6 zorgen voor hoge Per-concentraties in het grondwater benedenstreams van deze raaien. Raai 6 ligt in figuur 16 weliswaar net buiten de 30 mg/l-contour, maar deze is slechts gebaseerd op een beperkt aantal metingen.

#### *Vergelijking met de momentenmethode*

Een schatting van de massa van de totale hoeveelheid Per binnen de eerste drie ringen is ook bepaald met de momentenmethode. Deze berekening is uitgewerkt in bijlage H. De schatting van de hoeveelheid Per met behulp van de data van 1-hexanol bedraagt 158 kg, terwijl de schatting met behulp van de data van 2,4-dimethyl-3-pentanol 66 kg bedraagt.

### 6.3 Discussie

De interpretatie van de PITT geeft duidelijk aan dat op de locatie in Mierlo Per als puur product aanwezig is. Ook toont de PITT aan waar de 'hot spots' van de verontreiniging globaal zitten. De verzadigingsgraad en de totale hoeveelheid Per vallen niet nauwkeurig te bepalen, maar de orde van grootte is wel vast te stellen. Deze orde van grootte komt ook overeen met een schatting die gebaseerd is op bodemmonsters. De schattingen van de massa Per zijn voor de verschillende analysemethoden weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. Schattingen van de massa Per in kg in de binnenste drie ringen bij verschillende analysemethoden.

analysemethode	1-hexanol	2,4-dimethyl-3-pentanol
PITT invers model	204	82
PITT momentenanalyse	158	66
bodemmonsters	61	

De PITT in Mierlo geeft doorbraakcurven die een veel grilliger verloop hebben dan de meeste andere PITT's die zijn beschreven in de literatuur [Annable et al., 1998; Jin et al., 1995; Wilson en Mackay, 1995]. Een uitzondering hierop is het veldexperiment uitgevoerd op de Tucson International Airport Area Superfund Site [Nelson en Brusseau, 1996]. Dit grillige verloop blijkt vooral uit het feit dat sommige doorbraken meerdere pieken vertonen en uit de lange tailing die in sommige doorbraakcurven optreden. Dit grillige verloop wordt veroorzaakt door de heterogene bodemopbouw, die kenmerkend is voor de Formatie van Nuenen. Door deze heterogene bodemopbouw is het onwaarschijnlijk dat sommige peilbuizen die in een raai liggen ook op dezelfde stroombaan liggen. Ondanks dit grillige gedrag in de doorbraakcurven blijkt de PITT toch een goede methode om de aanwezigheid van DNAPL, de locatie van de 'hot spots' en een orde van grootte van de DNAPL-verzadigingsgraad te bepalen.



### ERVARINGSPROTOCOL

#### 7.1 Inleiding

Verschillende criteria moeten worden beschouwd alvorens te besluiten een PITT te overwegen voor de karakterisatie van een verontreinigde locatie. De criteria voor de selectie van een locatie voor het uitvoeren van een demonstratie PITT-pilot verschillen sterk van de criteria om na te gaan of een PITT een wenselijke techniek is op een verontreinigde locatie. Voor de keuze van een locatie voor het uitvoeren van een pilot moet een optimale locatie worden gekozen. Bij de toepassing van PITT's op een bepaalde verontreinigde locatie ontbreekt de mogelijkheid van selectie. Wel kunnen er keuzes worden gemaakt over het nut en de wijze van uitvoering van een PITT op deze locatie ten opzichte van de kosten. Hiervoor moeten ook de risico's van het mogelijke falen van een PITT bekend zijn. Vervolgens zal de kosteneffectiviteit van een PITT worden besproken.

In 7.2 wordt de locatiekeuze voor de uitvoering van de NOBIS-PITT-pilot besproken. Vervolgens zullen in 7.3 de criteria worden besproken of de PITT kan worden toegepast op een specifieke locatie. De faalanalyse zal worden besproken in 7.4. Tenslotte wordt in 7.5 een guideline voor de kosteneffectieve toepassing van de PITT in praktijksituaties besproken.

#### 7.2 Criteria voor de locatiekeuze van de NOBIS-PITT-pilot

In tabel 4 wordt voor de uitvoering van de PITT-pilot een indicatief overzicht met primaire en secundaire criteria gegeven. Onder de primaire criteria worden de criteria verstaan waaraan moet worden voldaan voor het succesvol uitvoeren van de PITT-pilot. Secundaire criteria zijn niet vereist, maar maken de toepassing van de PITT-pilot (financieel) aantrekkelijker en/of minder complex.

##### *Randvoorwaarden binnen het NOBIS-project*

Het doel van dit NOBIS-project is het toetsen van de praktische bruikbaarheid van de PITT om de locatie, omvang en verzadigingsgraad van DNAPL-bronzones te bepalen op een in Noord-Brabant gelegen locatie. Tot nu toe is de PITT toegepast in laboratoriumopstellingen en op zeer gecontroleerde veldschaal in het buitenland. De PITT, die in het kader van dit project in het veld is uitgevoerd, heeft het karakter van een proef. Het verdient dan ook de voorkeur om de test eerst uit te voeren op een relatief eenvoudige en kleinschalige locatie alvorens over te gaan tot *full-scale* implementatie. De toegevoegde waarde van dit project is dat de test wordt uitgevoerd in het veld, waarbij de verontreinigingssituatie, de bodemopbouw en de geohydrologie niet precies gestuurd zijn, zoals wel het geval is bij laboratoriumtests en gecontroleerde veldtests.

De voorkeur voor het uitvoeren van de PITT op een relatief eenvoudige en kleinschalige locatie is dus een randvoorwaarde geweest voor dit project. Deze randvoorwaarde brengt een aantal selectiecriteria met zich mee, die dan ook wellicht specifiek zijn voor dit project en hierna zullen worden besproken.

Tabel 4. Criteria voor de selectie van een locatie voor het uitvoeren van een PITT-pilot op een verontreinigde locatie.

<i>Primaire criteria:</i>	
De verontreiniging moet bestaan uit vluchtige tot semi-vluchtige verbindingen (VOC's of SVOC's) ook als puur product aanwezig in de bodem. Diepte van de DNAPL: minimaal 1 meter onder de grondwaterspiegel en maximaal 25 meter beneden het maaiveld.	Het NOBIS-project heeft als belangrijkste doel de mogelijkheden van PITT's te laten zien. De techniek komt duidelijk tot zijn recht als karakterisatietechniek van DNAPL's, zoals Per en Tri. Een minimale dekking met grondwater van de DNAPL van circa 1 meter is nodig, omdat voor de onttrekkingsputten voldoende grondwater aanwezig moet zijn. Dieper dan 25 m-mv leidt tot aanzienlijk hogere kosten.
Afwezigheid van veenlagen in het bron-gebied.	Veen kan (is nog niet onderzocht) een storend effect hebben op de bruikbaarheid van partitionerende tracers voor de detectie van DNAPL's. Het vermoeden bestaat dat de tracers ook in het veen partitioneren, waardoor er geen onderscheid kan worden gemaakt tussen de effecten van veen en DNAPL en het resultaat dan niet eenduidig interpreteerbaar is.
Goed doorlatende lagen (zand) in het target-gebied.	De tracers moeten zich zonder grote stijghoogteverschillen door doorlatende bodemlagen verspreiden en de duur van de test moet beperkt blijven. Slechter doorlatende lenzen vormen geen probleem.
De toegankelijkheid van de locatie moet goed zijn.	Voor het uitvoeren van de pilot moet de locatie toegankelijk zijn voor de aanleg van bovengrondse constructies en dergelijke; de locatie moet liefst goed bereikbaar zijn. Uit uitvoeringsoverwegingen moet personeel ook te allen tijde op de locatie aanwezig kunnen zijn.
Dikte van de bronzone.	Het uitvoeren van de NOBIS-PITT-pilot beperkt zich tot een gering verticaal interval (tot 5 meter) en een ruimere horizontale verspreiding.
Beschikbaarheid van de locatie.	De eigenaar van de locatie moet toestemming geven om gedurende de test op de locatie te komen.
Onttrekkingen.	Onttrekkingen in de buurt van de locatie kunnen van grote invloed zijn op de grondwaterstroming op de locatie. Continue onttrekkingen met een bekend debiet zijn geen probleem, omdat hiermee rekening kan worden gehouden. Niet-continue onttrekkingen kunnen de tracers uit het onderzoeksgebied wegtrekken.
<i>Secundaire criteria:</i>	
Achtergrondstroming van het grondwater.	Een hoge achtergrondstroming van het grondwater heeft sterke invloed op de wijze waarop de pilot kan worden uitgevoerd. De grondwaterstroming bepaalt onder meer de injectie- en extractie-debieten en de zuiveringskosten.
Aanwezigheid van een werkzame grondwaterzuiveringsinstallatie.	Het onttrokken grondwater moet voor de lozing op het riool worden gezuiverd. Indien een zuiveringsinstallatie aanwezig is en hiervoor gebruikt kan worden, vormt dit een aanzienlijke reductie van de kosten.
Aanwezigheid van deepwells die voor het onderzoek gebruikt kunnen worden.	Het plaatsen van onttrekkingsputten tot op grote diepte vormt een aanzienlijke kostenpost. Indien voor de PITT bruikbare putten op de locatie aanwezig zijn, is dit zeer aantrekkelijk.

#### *Aard van de verontreiniging*

Alleen op locaties waar een sterke aanwijzing bestaat dat koolwaterstoffen als een aparte vloeistoffase (DNAPL's) in de ondergrond aanwezig zijn, is het uitvoeren van een PITT zinvol. De test is niet geschikt voor een eerste algemene karakterisatie van de verontreinigingssituatie, omdat voor een kosteneffectief ontwerp van de test lay-out een gebied aan te wijzen moet zijn waar DNAPL's worden vermoed.

De test zal voor milieukundige toepassingen voornamelijk worden toegepast om *Dense Non-Aqueous Phase Liquids* (DNAPL's) op te sporen. DNAPL's zijn stoffen die zwaarder zijn dan water en (vrijwel) niet mengen met water: bijvoorbeeld de gechloreerde koolwaterstoffen Tri en Per. Deze stoffen kunnen diep in de ondergrond wegzinken, waarbij het verspreidingspad door geringe porositeitsverschillen van het sediment wordt bepaald. Het voorkomen van DNAPL's is dan ook erg grillig, waardoor deze moeilijk met conventionele methoden te karakteriseren zijn. *Light Non-Aqueous Phase Liquids* (LNAPL's), zoals olie, zijn lichter dan water en vormen vaak een drijfslag op de grondwaterspiegel, waardoor deze ook te karakteriseren zijn met meer eenvoudige en goedkope methoden dan een PITT.

Een belangrijk selectie criterium voor het succesvol en kosteneffectief uitvoeren van de PITT-pilot is dus dat er belangrijke aanwijzingen zijn voor het voorkomen van DNAPL's in de ondergrond. DNAPL's, zoals de gechloreerde koolwaterstoffen, worden vaak in de ondergrond aangetroffen, maar pesticiden, PCB-mengsels en andere gehalogeneerde verbindingen komen ook voor als DNAPL. Uit concentratiemetingen in het grondwater, die vaak in het kader van een 'Nader Onderzoek' op de locatie zijn verricht, kan een aanwijzing worden gedestilleerd over het voorkomen van DNAPL-bronzones. Pankow en Cherry [1996] hanteren de vuistregel dat een waargenomen concentratie van 1 tot 10 % van de oplosbaarheid van de desbetreffende stof een sterke aanwijzing is voor het voorkomen van DNAPL's in de ondergrond. In het geval van tetrachlooretheen (Per) is een in het grondwater waargenomen concentratie van 1.500 tot 15.000 µg/l al een aanwijzing voor puur product (zie voor andere veel voorkomende stoffen tabel 5).

Of een sterk verhoogde concentratie kan worden waargenomen is afhankelijk van de plaats van het waarnemingsfilter ten opzichte van de bronzone en de filterlengte. Naarmate het filter langer is, zal de kans op verdunning met relatief schoon grondwater toenemen en zullen de concentraties lager zijn. In de praktijk wordt echter vaak gebruik gemaakt van 1 meter filters, hetgeen slechts weinig verdunning tot gevolg heeft. Van belang is ook de diepte van de onderkant van het filter in relatie tot het voorkomen van slecht doorlatende lagen. Deze lagen werken als een geologische *trap* voor DNAPL's. Wanneer de filters met de onderkant op deze slecht doorlatende lagen zijn geplaatst, is de kans groot dat deze in zinklagen van puur product staan.

Tabel 5. Concentratiemetingen als aanwijzing voor puur product.

soort stof	oplosbaarheid (mg/l)	signaal concentratie (µg/l)
tetrachlooretheen (Per)	150	1.500
trichlooretheen (Tri)	1150	10.000
tetrachloormethaan (Tetra)	800 *	8.000

\* Ontleend aan [Davis, 1997].

Een andere sterke aanwijzing voor het voorkomen van puur product is het verloop van een 'pump & treat' sanering: als na jaren onttrekken van grondwater de concentraties van verontreinigingen in het onttrokken grondwater blijven steken op enkele honderden tot duizenden microgrammen per liter, kan dit worden toegeschreven aan de aanwezigheid van puur product.

#### *Diepte en omvang van de vermoedelijke bronzones*

Het toetsen van de praktische bruikbaarheid van de PITT op veldschaal vereist een eenvoudige en kleinschalige bronzone. In het kader van dit project zijn dan ook voorwaarden gesteld aan de diepteligging en de omvang van de DNAPL-bronzone: de bronzone mag niet dieper liggen dan 25 m-mv, het diepte-interval, waar de vermoedelijke bronzone zich bevindt, mag niet groter zijn dan 3 à 5 m en de horizontale verbreiding mag niet groter zijn dan 30 bij 30 m. De voorwaarde

met betrekking tot de diepte van de bronzone is bedoeld om de kosten van het installeren van injectie-, onttrekkings- en monitoringsfilters te beperken. De voorwaarde die is gesteld met betrekking tot de omvang is bedoeld om het aantal analyses en de daarmee gepaard gaande analysekosten beperkt te houden en tegelijkertijd een redelijke mate van resolutie van het resultaat (de DNAPL-verzadigingsgraad) te behouden. Naarmate de opzet van de PITT grootschaliger wordt, zullen meer monitoringspunten nodig zijn om dezelfde resolutie te handhaven.

In het algemeen kan dus worden gesteld, dat de kosten van de PITT zullen toenemen wanneer de test grootschaliger wordt opgezet en de bronzone dieper ligt. Dit geldt echter voor elke karakterisatiemethode.

#### *Geohydrologie en bodemopbouw*

Een factor, die de opzet van de PITT sterk bepaald, is de grootte van de natuurlijke grondwaterstroming. Naarmate de natuurlijke grondwatersnelheid in de watervoerende laag waar de PITT wordt uitgevoerd groter is, zal er minder grondwater rondgepompt moeten worden om een zone met dezelfde horizontale afmetingen te doorstromen. Dit betekent dat minder grondwater wordt onttrokken, dat vervolgens moet worden gezuiverd, waardoor de kosten van de test lager zullen uitvallen.

Een andere factor, die de haalbaarheid van de uitvoering van de PITT op een locatie bepaalt, is de doorlatendheid van de watervoerende laag waar de test op gericht is. Zo bestaat de bovenste 10 à 20 m van de ondergrond in de provincie Noord-Brabant uit een afwisseling van dunne zandige en lemige lagen (zogenaamde Nuenen-groep). Op de bovenste lemlagen heeft de DNAPL zich meestal verzameld. In dat geval moet het tracerhoudend water worden geïnjecteerd en onttrokken aan een enkele meters dikke fijnzandige laag, waarvan de transmissiviteit slechts enkele tientallen vierkante meters per dag bedraagt. Het onttrekken van enkele tientallen kubieke meters grondwater uit zo'n laag is vaak niet mogelijk doordat de onttrekkingsput droogvalt. Injectie kan ook problematisch zijn. Deze problemen kunnen enigszins worden verminderd door de injectie en onttrekking uit te smeren over meerdere punten of door het debiet van de injectie en onttrekking te verlagen. Deze laatste optie heeft als consequentie dat de grondwatersnelheid wordt verlaagd, waardoor de tracers langer onderweg zijn en de test langer duurt.

Resumerend heeft de uitvoering van een PITT in de bovenste 10 à 20 m van de ondergrond van de provincie Noord-Brabant het voordeel dat de horizontale grondwaterstroming slechts enkele meters per jaar bedraagt. Met een gering onttrekkings- en injectiedebiet (20 - 30 m<sup>3</sup>/d) kan een gebied met horizontale afmetingen van enkele tientallen meters bij enkele tientallen meters worden doorstroomd. De reistijd van de conservatieve tracer bedraagt bij deze debieten hooguit enkele weken, waardoor de duur van de test enkele maanden bedraagt.

Bij het selecteren van een locatie in de provincie Noord-Brabant moet wel rekening worden gehouden met de verzadigde dikte van de watervoerende laag waarin de test wordt uitgevoerd. Deze moet enkele meters dik zijn als het een freatische, watervoerende laag betreft. Dieper gelegen lagen, die spanningswater bevatten, mogen minder dik zijn. Om dit te kunnen beoordelen, moet er een sterke aanwijzing zijn dat de DNAPL zich op de desbetreffende laag bevindt: geohydrologie en verontreinigingssituatie moeten beide geschikt zijn.

Als ervoor wordt gekozen om de PITT uit te voeren in het goed doorlatende watervoerende pakket onder de deklaag, moet er rekening worden gehouden met de uitvoering van de PITT op grote diepte (> 25 m-mv).

### *Veen*

De aanwezigheid van hoge gehalten aan organisch materiaal in de ondergrond kan mogelijk een storend effect hebben op de resultaten van de test. Omdat ook in natuurlijke bodems organisch materiaal voorkomt dat apolair is, bestaat de mogelijkheid dat de partitionerende tracer in dit materiaal partitioneert en zodoende tot een verstoring van de test kan leiden: onderscheid tussen DNAPL en organische fracties kan dan niet worden uitgevoerd. Organische fracties tot 2,5 % blijken voor de partitionerende alcoholen geen significante retardatie op te leveren. Veen bevat zeer veel organisch materiaal. De kans dat ongewenste retardatie in veenlagen optreedt is aanzienlijk; hier is echter nog geen onderzoek naar verricht. Om aanvullend onderzoek naar de effecten van hogere fracties aan organische stof in het bodemmateriaal binnen dit onderzoek te voorkomen, is besloten om af te zien van locaties waar zich veen bevindt.

### *Overig*

Naast fysische criteria, zoals de verontreinigingssituatie en de geohydrologie, zijn ook een aantal organisatorische factoren van belang voor het slagen van een PITT. Bij de locatiekeuze moet rekening worden gehouden met de beperkte toegankelijkheid van de ondergrond van de locatie door bebouwing: de PITT-pilot vereist een kleinschalige en relatief dicht netwerk van monitoringsfilters, waarvan de plaats wordt gedicteerd door de vermoedelijk plaats van de bronzone. Bij het ontwerp en het aanleggen van dit netwerk kan slechts weinig rekening worden gehouden met de bestaande bebouwing: indien de bronzone onder bebouwing zit waar geen monitoringsfilters kunnen worden aangelegd, betekent dit dat de PITT op die plek geen *gedetailleerde* informatie oplevert over de residuaire verzadigingsgraad.

Een sterke kant van de PITT is dat de aanwezigheid en de *gemiddelde* verzadigingsgraad van DNAPL's onder bebouwing wél kan worden bepaald. Bij een opstelling, waarbij aan de rand van de bebouwing wordt geïnjecteerd en aan de tegenoverliggende rand wordt onttrokken, doorstromen de tracers de DNAPL. Het verschil in doorbraak aan de rand van de bebouwing levert dan een algemeen beeld op van de DNAPL onder de bebouwing, een gebied dat voor peilbuizen en dergelijke onbereikbaar is.

Zoals eerder genoemd wordt bij de uitvoering van de PITT grondwater onttrokken. Dit grondwater is door een DNAPL-bronzone gestroomd en zal verontreinigd zijn. Uitvoering van een PITT houdt een zuivering van dit grondwater in, waarvoor meestal een tijdelijke zuiveringsinstallatie moet worden opgesteld. Wanneer een zuiveringsinstallatie en onttrekkingsmiddelen aanwezig zijn, omdat op de locatie al een in situ 'pump & treat' sanering loopt, kunnen de kosten van een PITT worden gereduceerd.

### **7.3 Criteria voor de toepassing van de PITT op een locatie in het algemeen**

Voor de toepassing van de PITT op een locatie gelden er veelal ruimere marges dan voor de selectie van een locatie voor een demonstratie-pilot. Hierbij spelen de locatiespecifieke eigenschappen en de wensen van de eigenaar ten aanzien van het te behalen resultaat een aanzienlijk grotere rol.

Een eerste inschatting van de vereisten aan mogelijke locaties, waarop een PITT als karakterisatietechniek toepasbaar kan zijn, is in tabel 6 weergegeven.

Tabel 6. Criteria voor de beoordeling van de uitvoering van een PITT op een verontreinigde locatie.

<i>Primaire criteria:</i>	
De verontreiniging moet bestaan uit (D)NAPL's. Dit zijn bijvoorbeeld: VOCI's of SVOCI's, of andere organische (organohalo-) verbindingen, zoals minerale oliën, creosoten en lichte PAK's.	Toepassing van PITT is alleen zinvol indien het vermoeden bestaat dat DNAPL's in de bodem aanwezig zijn. De partitionerende tracers retarderen alleen in DNAPL's, niet in opgeloste stoffen.
Afwezigheid van veenlagen binnen (of zeer nabij) het doorstroomde bodemvolume, indien geen aanvullend onderzoek wordt gedaan naar de partitionering van de tracers in het veen.	Veen kan (is nog niet onderzocht) een storend effect hebben op de bruikbaarheid van partitionerende tracers voor de detectie van DNAPL's. Het vermoeden bestaat dat de tracers ook in het veen partitioneren, waardoor het resultaat niet interpreteerbaar is.
Beschikbaarheid van de locatie.	De eigenaar van de locatie moet toestemming geven om gedurende de test op de locatie te komen.
Onttrekkingen.	Onttrekkingen in de buurt van de locatie kunnen van grote invloed zijn op de grondwaterstroming op de locatie. Continue onttrekkingen met een bekend debiet zijn geen probleem, omdat hiermee rekening kan worden gehouden. Niet-continue onttrekkingen kunnen de tracers uit het onderzoeksgebied wegtrekken.
<i>Secundaire criteria:</i>	
Diepte vormt geen beperking.	De verontreiniging kan tot op grote diepte met de PITT in kaart worden gebracht. Financieel zijn er wel beperkingen: dieper = duurder.
Omvang van de locatie.	Beperkingen van de omvang voor een te behandelen locatie zijn er niet. De omvang heeft wel invloed op de kosten.
Bekendheid met de geo(hydro)logie van de locatie.	Een goede beschrijving van de bodemopbouw en de grondwaterstroming voorafgaand aan de PITT is essentieel voor het efficiënt dimensioneren van het systeem. Met name het voorkomen en de horizontale en verticale doorlatendheden van verschillende bodemlagen zijn belangrijk. Indien deze afwezig zijn bij de aanvang, zal aanvullend onderzoek moeten worden uitgevoerd.
Goed doorlatende lagen (zand) in het target-gebied.	De tracers moeten zich zonder grote stijghoogteverschillen door doorlatende bodemlagen verspreiden om zo de duur en het aantal injectie-/extractiefilters te beperken. Slechter doorlatende lenzen vormen geen probleem. De mate van doorlatendheid bepaalt mede de duur van de test. Een minder goede doorlatendheid kan bij gelijke inspanningen de duur aanzienlijk vergroten.
Bovengrondse opstellen voor de uitvoering.	Voor het uitvoeren van de PITT zijn bovengrondse constructies en werkzaamheden nodig: het plaatsen van filters, het leggen van leidingen en kabels (liefst bovengronds), het plaatsen van keten en installaties voor influent- en effluentbehandeling. Hiervoor is ruimte nodig. Daarnaast moeten filters op een maximale onderlinge afstand worden geplaatst. Hiervoor moeten op de locatie mogelijkheden worden gezocht (erg site-specifiek).
Bebouwing.	Het toepassen van de PITT onder bebouwing kan extra kosten met zich meebrengen en de resolutie van de verkregen informatie beperken.
Toegankelijkheid van de locatie.	Voor het uitvoeren van de pilot moet de locatie toegankelijk zijn met materiaal en materieel. Liefst goed berijdbaar met vrachtwagens. De locatie moet uit uitvoeringsoverwegingen liefst 24·7 uur toegankelijk zijn.



In deze paragraaf zal de procedure van de locatiekeuze worden geïllustreerd aan de hand van het keuzeproces dat is doorlopen in het kader van dit NOBIS-project. Opmerkingen ten aanzien van verschillende aspecten, die voor de beoordeling van de toepasbaarheid van een PITT op een locatie in het algemeen duidelijk anders zijn ten opzichte van die voor een demonstratiepilot, worden *cursief* en versmald uitgelijnd weergegeven.

De provincie Noord-Brabant is gevraagd uit haar archief een aantal locaties te selecteren die verontreinigd zijn met gechloreerde koolwaterstoffen en die zowel op kosten van de overheid als in eigen beheer gesaneerd (dienen te) worden. Dit heeft een totaal van 32 locaties opgeleverd, hetgeen natuurlijk niet een compleet overzicht is. Daarnaast is door Promeco een particuliere locatie aangedragen.

Vervolgens is op deze 33 locaties een *quick scan* verricht naar geschiktheid voor het uitvoeren van een PITT. Bij deze quick scan zijn een aantal van tevoren vastgestelde selectiecriteria getoetst, waarbij gebruik is gemaakt van dossiers met Nader Onderzoeken, Saneringsonderzoeken en Saneringsplannen.

De selectiecriteria omvatten de verontreinigingssituatie (contaminant, maximale concentratie, omvang en diepte van vermoedelijke bronzone), de geohydrologie (bodempopbouw, doorlatendheid en natuurlijke grondwaterstroming) en organisatorische aspecten (sanering actief, zuivering aanwezig, bebouwing). Verder is gekeken naar de betrouwbaarheid van bovengenoemde informatie (het aantal boringen en concentratiemetingen). Algemene informatie ten aanzien van de ligging van de locatie, de eigenaar/beheerder en gegevens over de omgeving (stedelijk/landelijk/industrie) zijn eveneens meegenomen.

Vijf locaties werden op basis van de quick scan geselecteerd als kansrijke locaties. Een groot aantal van de 32 locaties viel af, omdat uit concentratiemetingen geen duidelijke aanwijzing over het voorkomen van DNAPL's kon worden afgeleid: de maximale concentraties waren eenvoudigweg te laag ( $< 5.000 \mu\text{g Tri per liter}$ ).

*Een lage concentratie aan verontreiniging in het grondwater hoeft bij de beoordeling of een PITT geschikt is als karakterisatietechniek op een locatie niet tot een afwijzing te leiden. Een lage concentratie, maar toch het vermoeden dat DNAPL aanwezig kan zijn (bijvoorbeeld op basis van kennis over processen die in het verleden plaatsvonden), kan leiden tot de vraag óf er DNAPL zit. In dat geval kan een PITT uitsluitel bieden.*

Een aantal andere locaties viel af, omdat er slechts enkele of zelfs geen boringen of sonderingen beschikbaar waren om een uitspraak over de verticale diepteligging van de bronzone te kunnen doen.

*Kennis over de bodempopbouw zal voor een locatie, waar een sanering(-sonderzoek) moet worden uitgevoerd, verkregen moeten worden. Dit zal dan te zijner tijd verkregen moeten worden.*

Andere locaties vielen af, omdat de verontreiniging bestond uit een cocktail van stoffen (niet alleen gechloreerde) die de interpretatie van de testmetingen bemoeilijkten en de kosten van de zuivering hoog opdreven (zware metalen).

*Bij een cocktail aan stoffen, die de interpretatie (kunnen) bemoeilijken, zijn twee opties: óf het uitvoeren van aanvullend onderzoek om na te gaan of er storende effecten zijn óf het niet uitvoeren van een PITT. Indien een PITT niet wordt uitgevoerd, moet worden nagegaan hoe de gevraagde informatie over de DNAPL dan wel kan worden verkregen.*

*De zuiveringskosten van een PITT op een locatie is een integraal onderdeel van de dimensionering en vormt een onderdeel van de kosten-batenbeschouwing van de techniek.*



Daarnaast bleek tijdens de procedure van de locatiekeuze dat een beperkt aantal van de door de provincie aangeleverde locaties niet in aanmerking kwamen: de gegevens waren vertrouwelijk, of de test paste niet in het saneringstraject.

*Vertrouwelijkheid speelt nooit een probleem op een eigen locatie. Inpassing in het saneringstraject vormt wel een aandachtspunt. Een PITT is geen snelle techniek. Hierdoor moet goed worden overwogen of en zo ja wanneer de uitvoering van een PITT kan plaatsvinden. Hierbij moet rekening worden gehouden met mogelijke vergunningen.*

Vier locaties bleven over. De vier locaties (te weten de *Zonnebloemstraat* in Breda, de *Kruisstraat* in Eindhoven, het '*Uden Centrum*'-project te Uden en de *Van Bijlandtstraat* in Tilburg) zijn nader bekeken.

De vermoedelijke bronzone bevindt zich op alle locaties op geringe tot zeer geringe diepte op een slecht doorlatende leemlaag. De laag is goed uit te karteren op basis van de beschikbare gegevens. De horizontale grondwaterstroming in het bovenliggende watervoerende laagje is gering. Het gaat hier om een deklaag, waarin infiltratie een overheersende rol speelt en de stroming hoofdzakelijk verticaal gericht is.

De maximale concentratie tri- en tetrachlooretheen op de locatie *Van Bijlandtstraat* en respectievelijk de *Zonnebloemstraat* zijn groter dan 50.000 µg/l, een duidelijke aanwijzing voor de aanwezigheid van puur product. Bij een gedetailleerdere analyse van de beschikbare gegevens is gebleken, dat het freatische watervoerende laagje boven de leemlaag van de *Zonnebloemstraat* slechts een halve meter dik is. In een droge periode staat de grondwaterspiegel zelfs in de leemlaag en valt de zandige laag droog. Analyse van het sediment heeft uitgewezen dat juist in deze laag zich de bulk aan DNAPL bevindt, hieronder is het alleen in lage opgeloste concentraties aanwezig. De doorlatendheid van de laag, waarin de test moet worden uitgevoerd, is daarmee te gering: de locatie is afgevallen.

De watervoerende laag boven de vermoedelijke bronzone op de locatie *Kruisstraat* is 3 à 4 m dik. Het ligt niet in de lijn der verwachting dat deze laag droogvalt, wanneer de PITT hier wordt uitgevoerd. Op deze locatie is slechts één keer een concentratie van 13.000 µg/l gemeten. De aanwezigheid van puur product is daarmee niet onomstotelijk vastgesteld. Op de locatie is echter in het verleden wel een chemische wasserij gehuisvest geweest.

*Het niet onomstotelijk vaststaan van de aanwezigheid van DNAPL kan juist aanleiding zijn om een PITT uit te voeren op deze locatie om dit aan te tonen.*

De locatie *Van Bijlandtstraat* te Tilburg heeft aan vrijwel alle criteria voldaan. Eén criterium is voor de afwijzing van deze locatie doorslaggevend geweest: de aanwezigheid van veen. Binnen het testgebied op deze locatie (van 8 tot 9 m-mv, midden in de te onderzoeken zone) is veen aanwezig. Hierdoor was het niet zonder aanvullend onderzoek naar de invloed van dit veen op de retardatie van de tracers mogelijk om hier een PITT toe te passen: de locatie is afgevallen.

*Voor deze locatie kan onderzoek naar de invloed van dit veen op de werking van de PITT, voorafgaand aan het besluit over de uitvoering van een PITT, uitkomst bieden.*

Een nader onderzoek naar de inpassing van een PITT op de locatie '*Uden Centrum*' heeft uitgewezen, dat de locatie uit twee bronnen bestaat. Het betreft hier vermoedelijk puur product. De stroomafwaartse bron bevindt zich onder een gebied waar nu woningbouw plaatsvindt. Door de zeer intensieve bouwwerkzaamheden en de krappe planning viel ook hier de PITT niet in te passen. De meest bovenstroomse bron onder de schouwborg kwam ook niet in aanmerking. Hier ligt een infiltratie/drainagesysteem voor de sanering van de pluim. Dit is echter niet te gebruiken

voor het injecteren van de tracers, omdat de drains zeer lang zijn en niet gedeeltelijk aan te sturen zijn. Vanwege de grote hoeveelheden water die worden geïnjecteerd, moet dan zeer veel tracer worden toegevoegd. Daarnaast is er een beperkte mogelijkheid voor het installeren van peilbuizen. Op basis van deze bevindingen is ook deze locatie als optie vervallen.

De particuliere locatie in Mierlo, die door Promeco is aangedragen, voldoet aan alle criteria. De gemeten concentraties geven aan dat er DNAPL is. De bron ligt niet te diep, maar boven de bron is wel voldoende water aanwezig. De laterale omvang van de bronzone (op basis van voldoende metingen tot op heden) is beperkt. Binnen de planning van de werkzaamheden op de locatie kan in het testgebied een PITT-pilot worden uitgevoerd. Derhalve is besloten om op deze locatie de PITT-pilot uit te voeren.

#### 7.4 Faalanalyse

Tijdens het ontwerp en de uitvoering van de PITT zijn een aantal mogelijkheden naar voren gekomen, die ervoor kunnen zorgen dat de PITT niet succesvol is. Deze mogelijkheden worden hieronder besproken.

##### *De tracer stroomt niet langs de DNAPL*

Dit kan optreden indien het grondwater niet door de laag waarin de meeste DNAPL zich bevindt, stroomt maar door een andere beter doorlatende laag. Dit kan gebeuren indien de aquifer, waarin het onderzoek gewenst is, direct in contact staat met een aquifer met een hogere doorlatendheid. De tracer zal in dit geval voornamelijk door het beter doorlatende pakket stromen.

##### *De tracer breekt te snel door*

Indien de tracer al is doorgebroken in peilbuizen voordat er monsters worden genomen, is de proef mislukt. Dit kan echter eenvoudig worden voorkomen door een doorlatendheidstest of tracertest vooraf te houden en hieruit de te verwachten doorbraaktijden te schatten of de monsternamen ruimer te plannen. Bij een ruime monsternamen kan op basis van de analyseresultaten worden besloten om een aantal monsters toch niet te laten analyseren, omdat deze buiten de doorbraakcurven blijken te vallen en zodoende kosten te besparen.

##### *Invloed van de aanwezigheid van veen op de PITT*

Het is nog niet bekend of de aanwezigheid van veen extra vertraging veroorzaakt voor de partitionerende tracers. Dit kan worden onderzocht door middel van kolomexperimenten. Bij de aanwezigheid van veen moet tevens worden gekeken of de grondwaterstroming niet door een beter doorlatend pakket stroomt, dan door het veen (het pakket waarin de DNAPL zich waarschijnlijk bevindt). De aanwezigheid van ongeveer 5 % organisch materiaal blijkt tijdens de kolomexperimenten geen retardatie te veroorzaken.

##### *Afbraak van de tracers*

Indien de tracers onder invloed van biologische processen afbreken, kan dit van invloed zijn op de resultaten van de PITT. Indien de afbraak van de tracers te voorspellen valt (zoals bij eerste-orde afbraak), kan hiervoor bij de interpretatie van de gegevens rekening worden gehouden. De te meten concentraties moeten echter wel boven de detectielimiet blijven om de doorbraken nauwkeurig te kunnen meten.

##### *Hoeveelheid geïnjecteerde tracer is te laag*

Indien de hoeveelheid van de geïnjecteerde tracers te laag is, kan door verdunningsprocessen, dispersie of partitionering, de concentratie in de grondwatermonsters beneden de detectielimiet komen, waardoor de doorbraakcurven niet meer adequaat te bepalen zijn.

### *Vervluchting van de tracers*

Sommige tracers, zoals SF<sub>6</sub>, kunnen vervluchten indien ze in contact komen met de bodemlucht. Deze tracers moeten derhalve niet worden gebruikt in een PITT in een laag die net onder de grondwaterspiegel ligt.

### *Andere oorzaken van retardatie*

Indien er behalve de partitionering aan DNAPL nog een ander mechanisme een rol speelt, dat een verschil in stroomsnelheid veroorzaakt tussen de verschillende tracers, kan de DNAPL-verzadigingsgraad niet eenduidig worden bepaald. Dit kan echter worden getest door vooraf een kolomproef uit te voeren met schone grond van de veldlocatie, die voor alle tracers dezelfde doorbraak moet vertonen.

### *Slechte bereikbaarheid van de DNAPL; de tracers stromen er langs, maar wisselen niet of nauwelijks uit met de DNAPL*

Indien de DNAPL bronzones slecht bereikbaar zijn voor de tracers, zal het grootste gedeelte van de tracers en dus ook de partitionerende tracer al voorbij de bronzone zijn gestroomd, voordat er lokaal een evenwichtssituatie is bereikt. De tracer die wel de DNAPL in is verdwenen, zal er ook weer heel langzaam uitkomen en een lange tail in doorbraakcurven vertonen. Het is de vraag of deze doorbraakcurven wel lang genoeg worden bemonsterd om dit effect te meten. Slechte bereikbaarheid van DNAPL's kan optreden bij een relatief dik watervoerend pakket, waarbij de DNAPL slechts op één locatie aanwezig is, bijvoorbeeld op de leemlaag aan de onderkant van het pakket. Indien dit effect mogelijk een rol speelt, is het aan te bevelen om de test onderin het pakket uit te voeren door onderin het pakket de tracer toe te voegen en te monitoren en bovenin het pakket schoon water te injecteren om zo een horizontale stromingssituatie te creëren. De slechte bereikbaarheid van de DNAPL is vermoedelijk ook de oorzaak dat tijdens de kolomproeven bij een Per-verzadigingsgraad van 12,5 % een lagere retardatie is vastgesteld dan bij een Per-verzadigingsgraad van 10 %.

### *Andere stromingssituatie door gewijzigde hydrologische omstandigheden*

Indien tijdens de uitvoering van de PITT de lokale stromingssituatie drastisch verandert, kan dit gevolgen hebben voor de interpretatie van de uitkomsten. Deze veranderde hydrologische situatie kan het gevolg zijn van menselijke ingrepen, onttrekkingen en/of aanvulling van grondwater of veranderingen in de vaste peilen in de nabije omgeving van de locatie. Tevens kan ook door natuurlijk verloop een probleem ontstaan indien bijvoorbeeld de grondwaterstand onder de te doorstromen laag zakt.

### *Complexe doorbraakcurven, die niet goed modelleerbaar en/of interpreteerbaar zijn*

Het is mogelijk dat de doorbraakcurven zodanig complex zijn dat de interpretatie van de data niet eenduidig te doen valt. Dit kan gebeuren indien de doorbraak niet vaak genoeg bemonsterd wordt en het een zeer complexe doorbraakcurve is, zodat het verloop niet duidelijk interpolateerbaar is. Het kan ook zijn dat de peilbuizen die verwacht zijn stroomafwaarts van elkaar te liggen dat in werkelijkheid niet blijken te doen. Interpretatie van de methode met behulp van een momentenmethode is dan onmogelijk, terwijl de interpretatie van het model met behulp van een invers model een lastig probleem geeft.

## **7.5 PITT als kosteneffectieve karakterisatie voor een saneringsontwerp**

### **7.5.1 Inleiding**

De pilot met de PITT heeft uitgewezen dat de techniek toepasbaar is op praktijkschaal in Nederland. Uit deze test is gebleken dat de PITT een duidelijk antwoord geeft op de vraag of er pure DNAPL in de bodem aanwezig is en waar DNAPL aanwezig is. De nauwkeurigheid, waarmee de exacte locatie van de DNAPL-bronzones kan worden vastgesteld, is sterk afhankelijk

van de intensiteit van het gebruikte meetnet en de toegepaste monitoringsstrategie. De vraag hoeveel DNAPL er in de ondergrond als puur product aanwezig is, kan ook met een PITT worden beantwoord. De nauwkeurigheid, waarmee de hoeveelheid kan worden bepaald, is wederom afhankelijk van de toegepaste monitoringsstrategie. Algemeen kan worden gesteld dat meer meten meer weten is. Uiteraard heeft het meer willen weten een prijs.

Resumerend kan worden gesteld dat de PITT flexibel uitvoerbaar is: zowel goedkope, grofstoffelijke karakterisatie is mogelijk als ook zeer geavanceerde, duurdere karakterisatie. De opzet van de PITT moet dan ook worden afgestemd op de informatievraag vanuit de voorgestelde saneringsaanpak. Alleen zo kan een kosteneffectieve uitvoering van de PITT worden gegarandeerd.

Hieronder wordt voor een aantal saneringsstrategieën aangegeven welk niveau van DNAPL-karakterisatie noodzakelijk is, met welke testopzet moet worden gewerkt, hoe duur die specifieke testopzet is en of er goedkopere alternatieven voorhanden zijn. Bij dit overzicht wordt ervan uitgegaan dat vaststaat dat er DNAPL aanwezig is op de locatie. Indien dit niet het geval is, is uitvoering van een PITT een mogelijkheid om dit snel en goedkoop vast te stellen.

### 7.5.2 *Ontgraven*

Bij het ontgraven van met DNAPL verontreinigde grond is het vooral van belang te weten waar de DNAPL zit, zodat de hoeveelheid te verwijderen grond kan worden geminimaliseerd en tevens op de juiste locatie wordt gesaneerd. De verzadigingsgraad van de DNAPL is uitsluitend van belang indien dit effect heeft op de kosten van de verdere verwerking van de te ontgraven bodem. DNAPL's zijn alleen kosteneffectief te ontgraven, indien de verontreiniging ondiep zit en er geen gebouwen op de verontreinigde locatie staan. In deze situatie zijn overige karakterisatie-technieken, zoals het nemen en analyseren van bodemonsters, ook relatief snel en goedkoop uit te voeren. PITT als karakterisatiemethode voor het ontgraven van ondiepe DNAPL-verontreinigingen is dan ook niet kosteneffectief.

### 7.5.3 *Pump & treat*

Bij de beheersing van een DNAPL-verontreiniging door middel van pump & treat lost de DNAPL langzaam op in het grondwater en wordt deze vervolgens opgepompt en gezuiverd. Indien de locaties van de DNAPL-bronzones bekend zijn, kunnen deze gegevens worden gebruikt om de hoeveelheid op te pompen water te minimaliseren, door de pump & treat strategie te optimaliseren [Hetterschijt en Te Stroet, 1998]. De reductie van het op te pompen en te zuiveren grondwater kan 20 tot 50 % bedragen, hetgeen sterk doorwerkt in de zuiveringskosten.

Een PITT kan zo worden opgezet, dat binnen het intrekgebied van bestaande onttrekkingsmiddelen aparte DNAPL-bronzones kunnen worden onderscheiden. Deze manier van karakteriseren kan ook plaatsvinden door Dynamische Monitoring (DM). Daartoe moet dan wel de stromingsrichting van het grondwater enkele keren worden veranderd. Het uitvoeren van DM vergt in vergelijking met een PITT dan ook veel tijd. Daarnaast kan de verontreiniging door het veranderen van de onttrekking tijdelijk niet worden beheerst en wordt deze over een groter gebied verspreid. Deze nadelen spelen niet bij het uitvoeren van een PITT. Daar komt nog bij dat de kosten voor DM en een PITT niet wezenlijk verschillen. Voor beide methoden is het onttrekken en zuiveren van grondwater en het monitoren van concentratieveranderingen noodzakelijk. Grote voordelen van een PITT ten opzichte van DM zijn:

1. bij hoge natuurlijke grondwaterstroming is onttrekking en zuivering van grondwater voor een PITT niet noodzakelijk;
2. PITT is een minder indirecte methode en biedt daardoor meer zekerheid over het resultaat;
3. het gebied waarover de resultaten iets zeggen, is beter af te bakenen.

Voor het nader karakteriseren van een 'verdachte' DNAPL-locatie van 100 bij 100 m ten behoeve van het extensiveren van de onttrekking is een meetnet van 15 à 25 peilbuizen veelal afdoende voor een PITT-karakterisatie. Stel dat een PITT in 2 à 3 gridblokken van 20 × 20 m DNAPL aantoon, dan kan afhankelijk van de stromingsrichting van het grondwater (overwegend verticaal of horizontaal) de grootte van het beheersgebied met een factor 3 tot 10 worden teruggeschroefd. Bij een hogere resolutie bij de uitvoering van een PITT wordt het beeld van de DNAPL-verontreiniging wel gedetailleerder, maar de extra monitoringsinspanning weegt wellicht niet op tegen de nog te boeken winst aan onttrekkingsdebiet en de reductie in zuiveringskosten. Dit is echter sterk afhankelijk van de verontreinigingssituatie en kan op voorhand niet worden ingeschat.

Bij het bovenstaande moet nog worden opgemerkt dat het aantal van 25 peilbuizen gebaseerd is op een tweedimensionale karakterisering (horizontaal). Indien op basis van a-priori (geologische en historische) kennis kan worden aangenomen dat er meerdere discrete diepte-intervallen zijn waar de DNAPL zich geconcentreerd heeft, is een semi-driedimensionale karakterisering noodzakelijk. Per te installeren peilbuis zijn dan meerdere filters noodzakelijk. De kosten van een PITT zullen dan toenemen als gevolg van de toename van het aantal benodigde analyses. Als vuistregel kan worden gesteld dat de analysekosten lineair afhankelijk zijn van het aantal te karakteriseren verticale niveaus. De overige kosten van een PITT zullen slechts marginaal toenemen met het aantal te karakteriseren verticale niveaus.

Hiertegenover staat dat bij veel saneringen kan worden achterhaald uit historisch onderzoek en uit de ligging van de pluim op welke plaatsen de DNAPL-bronzones zich ongeveer kunnen bevinden. Hiermee kan bij het ontwerp van de PITT rekening worden gehouden, zodat een kleiner gebied kan worden onderzocht. Bovendien kan op een grote locatie de PITT trapsgewijs worden uitgevoerd. Bij de eerste PITT wordt alleen op een grove schaal bepaald waar de DNAPL-bronzones zich bevinden. Tijdens de tweede PITT kan dan op de locaties die na de eerste PITT verdacht zijn verder worden ingezoomd. Ook valt te denken aan het uitvoeren van één PITT waarbij de analyses van de grondwatermonsters gefaseerd worden uitgevoerd. Tijdens de eerste fase van de analyse worden eerst de monsters uit de peilbuizen van een grof grid geanalyseerd. Daarna kunnen alleen de monsters worden geanalyseerd die uit de peilbuizen komen die op nog verdachte locaties staan.

Als indicatie voor de uitvoeringskosten van deze PITT-opzet wordt hier een bedrag van kf 40 - 250 genoemd. De kosten van kf 40 hebben betrekking op een kleine locatie (20 bij 20 m), waarbij vrijwel geen ruimtelijk detail over de DNAPL-bronzone gewenst is. De kosten van kf 250 hebben betrekking op locaties van 20 bij 20 m tot 100 bij 100 m, waarbij een 25-tal doorbraakcurven worden gemeten. Deze investering moet worden afgezet tegen de kosten van pump & treat als beheersing over tientallen jaren en de mogelijk reductie van deze kosten als gevolg van extensivering. De kosten van pump & treat systemen bedragen gekapitaliseerd over 30 jaar al gauw enkele tot vele miljoenen gulden, waarbij de hoofdmoot van deze kosten het instandhouden van de zuiveringsinstallatie is. Indien deze post door extensivering met 50 % kan worden gereduceerd, lijkt deze opzet van de PITT kosteneffectief.

#### 7.5.4 *Reactieve schermen*

Een effectieve manier van isoleren van de DNAPL-bronzones is het plaatsen van reactieve schermen juist stroomafwaarts van de DNAPL-bronzone. Hierbij kan worden gedacht aan biologische of chemische schermen.

Om dit optimaal te kunnen doen, moet de scheiding tussen de DNAPL-bronzone en de pluimzone bekend zijn. Uit concentratiemetingen kan de vorm van de pluimzone worden afgeleid. Hieruit volgt in combinatie met informatie over het historische gebruik de vermoedelijke ligging

van het grensvlak. Alleen met een directe karakterisatiemethode, zoals de PITT, kan de ligging van dit grensvlak met zekerheid worden vastgesteld. De benodigde opzet is relatief eenvoudig: stroomopwaarts van dit grensvlak in de DNAPL-bronzone worden tracers geïnjecteerd. De verplaatsing van de tracers wordt in ieder geval tot in de pluimzone gevolgd. Dit kan met een beperkt aantal peilbuizen (10 - 12) in een paar raaien evenwijdig aan de natuurlijke grondwaterstromingsrichting. Omdat bij deze opzet geen (verontreinigd) grondwater wordt onttrokken is een zuiveringsinstallatie niet nodig.

Als indicatie voor de kosten van deze opzet voor de PITT wordt hier een bedrag genoemd van *kf* 40 tot *kf* 200. De kosteneffectiviteit van de PITT voor deze toepassing laat zich lastig bepalen. De consequenties van het niet volledig invangen van de DNAPL door een reactief scherm, laat deze manier van saneren/beheersen falen. De kans dat dit falen in een vroegtijdig stadium wordt opgemerkt is gering, aangezien het niet loskoppelen van de pluim zich pas in enkele jaren zal openbaren. Dan is echter duidelijk vast te stellen waar de reactieve wand moet worden uitgebreid.

Het falen van de beheersing van een bronzone met reactieve wanden heeft grotere consequenties, wanneer dit inhoudt dat er zich nog DNAPL stroomafwaarts van de wand bevindt. De wand is dan te ver stroomopwaarts geplaatst, waardoor de investering teniet wordt gedaan, er moet immers een nieuwe wand worden aangelegd. Dit risico kan alleen door uitvoeren van een PITT worden vermeden. Op basis van concentratiemetingen alleen zijn de bron en de pluimzone niet eenduidig te scheiden.

#### 7.5.5 *Directe verwijderingstechnieken voor DNAPL-bronzones*

De DNAPL-bronzones kunnen ook actief worden verwijderd, door bijvoorbeeld de stof mobiel te maken door middel van stoominjectie of surfactants en deze weg te vangen of door de bronzone direct te vernietigen door chemische oxidatie [Pankow en Cherry, 1996]. Hierbij is het van groot belang om gedetailleerd te weten waar de DNAPL's zich bevinden.

De genoemde technieken worden gekenmerkt door hun intensieve karakter. Veelal wordt veel energie en grondstoffen gebruikt om de DNAPL te mobiliseren of te vernietigen. Deze technieken zijn dan ook gebaat bij een zo exact mogelijke vaststelling van het te behandelen bodemvolume en oppervlak. Bij stoominjectie is dit relevant, omdat het te behandelen bodemvolume sterk de prijs bepaalt van het verwarmen van de bodem. Bij chemische oxidatie is dit van belang, omdat de hoeveelheid benodigde reactanten niet alleen door de massa DNAPL wordt bepaald, maar ook door het volume te oxideren bodem. Bij mobilisatie van DNAPL's door toediening van surfactants is het gedetailleerd vaststellen van het te behandelen bodemvolume iets minder belangrijk. In de praktijk komt dit erop neer dat het voorkomen van de DNAPL op een schaal van enkele meters bekend zou moeten zijn. De PITT moet dan ook met hoge resolutie worden uitgevoerd (10 × 10 m). Als indicatie voor de kosten wordt hier dan ook een bedrag genoemd van *kf* 100 - 250. Door tijdens de PITT en de sanering gebruik te maken van dezelfde in situ filters kunnen kosten worden bespaard tijdens de saneringsfase.

De bepaling van de *hoeveelheid* DNAPL is niet altijd noodzakelijk, omdat technieken als stoominjectie enigszins worden overgedimensioneerd. Dit is nodig omdat er onzekerheid bestaat in welke concentratie de stoom of de oxidator daadwerkelijk bij de DNAPL-bronzone aankomt en daar ook lang genoeg aanwezig is om de gehele DNAPL te verwijderen.

Een schatting van de orde van grootte van de hoeveelheid DNAPL is echter wel van belang voor een inschatting van de totale hoeveelheid benodigde reactanten en de daarmee samenhangende kosten.

### 7.5.6 Samenvatting

Uit de voorgaande paragrafen is gebleken dat de uitvoeringskosten van een PITT afhankelijk zijn van de omvang van de bronzone, het aantal verticale niveaus dat in kaart moet worden gebracht, de resolutie en de configuratie van de test. Deze vier factoren bepalen het aantal bemonsteringsplekken en daarmee de kosten van een PITT (analysekosten). Met name de laatste drie factoren worden bepaald door de saneringsaanpak. De uitvoeringskosten van een PITT zijn daarmee afhankelijk van de gekozen saneringsaanpak en de omvang van de verontreiniging. In tabel 7 is dit verband weergegeven.

Tabel 7. Aantal benodigde monsterpunten en kosten in relatie tot saneringsaanpak en testopzet.

resolutie/bronzone	100 × 100	50 × 50	20 × 20
pump & treat: - grof 20 × 20 - fijn 5 × 5	25 - 250 kf -		2 - 40 kf 25 - 250 kf
reactive wall: - grof 20 × 20 - fijn 5 × 5	15 - 200 kf -		2 - 40 kf 15 - 200 kf
stoominjectie enz.: - middelfijn 10 × 10		25 - 250 kf	

Bij tabel 7 moet worden opgemerkt dat deze is gebaseerd op de karakterisatie van één niveau in verticale zin. Deze aanpak is vaak gerechtvaardigd gezien het verspreidingspad van de DNAPL's; deze accumuleren op slechter doorlatende lagen, waardoor in de verticaal vaak één discrete zone is aan te wijzen, waar zich de DNAPL bevindt. Daarbij zijn de genoemde saneringstechnieken, zoals pump & treat, reactive walls en stoominjectie, technieken waarbij horizontale verplaatsing van water/stoom/DNAPL plaatsvindt.

Indien in tabel 7 een '-' is weergegeven, wordt hiermee bedoeld dat een PITT voor deze toepassing niet kosteneffectief is in te zetten. In de praktijk betekent dit, dat kleine bronzones met een hoge resolutie in kaart kunnen worden gebracht en grote bronzones (100 × 100 m) met een lage resolutie. Eventueel kan een PITT gefaseerd plaatsvinden, waarbij eerst grofstoffelijk de DNAPL-gebieden worden geïnventariseerd en vervolgens op de deelgebieden wordt ingezoomd.

Vanwege de specifieke testopzet bij de saneringsaanpak 'reactive walls' (enkele raaien evenwijdig aan de stromingsrichting van 3 monsterpunten in plaats van een rechthoekig, vlakdekkend monsterpunt grid) zijn bij een PITT voor deze saneringsaanpak slechts 15 punten nodig in plaats van 25, zoals bij pump & treat of stoominjectie. Dat maakt deze toepassing van een PITT goedkoper dan voor pump & treat of stoominjectie.

### 7.6 Toepassing van een PITT bij stagnerende grondwatersaneringen

In de praktijk blijkt dat veel grondwatersaneringen stagneren. Eén van de mogelijke oorzaken hiervan is de aanwezigheid van puur product van de verontreiniging. Dit puur product lost langzaam op in het grondwater en zorgt voor een vrijwel continue aanlevering van de verontreiniging naar de saneringsputten.

Een PITT kan gemakkelijk worden toegepast bij deze stagnerende grondwatersaneringen. Doordat vrijwel alle infrastructuur (zuiveringsinstallatie, peilbuizen) al aanwezig is, kan een PITT hier goedkoop worden uitgevoerd.

### CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

#### 8.1 Conclusies

De PITT is een geschikte methode om DNAPL-bronzones te lokaliseren, die ook in Nederland met succes is toegepast. Bij de uitvoering van de test in Mierlo is duidelijk waargenomen dat in sommige peilbuizen de partitionerende tracers later doorbreken dan de conservatieve tracer, hetgeen duidt op de aanwezigheid van DNAPL-bronzones.

De dichtheid van het meetnet van monitoringspeilbuizen bepaalt de resolutie waarmee de DNAPL-bronzones kunnen worden gekarakteriseerd. Op de locatie in Mierlo zijn de monitoringspeilbuizen op 1,5 m van elkaar geplaatst. De schatting van de Per-verzadingsgraad geeft ongeveer dezelfde resolutie.

De hoeveelheid DNAPL die aanwezig is moet in principe ook kunnen worden bepaald, maar de doorbraakcurven op de locatie in Mierlo geven een zodanig grillig verloop dat slechts de orde van grootte valt vast te stellen. Met behulp van het inverse model is het mogelijk gebleken om de doorbraakcurven die gemeten zijn op de locatie in Mierlo ook daadwerkelijk te fitten. De bepaling van de hoeveelheid DNAPL kan slechts met de nauwkeurigheid van een factor 2 à 3 worden bepaald. De analyse van de data van de twee partitionerende tracers, 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol, geeft schattingen van de hoeveelheid DNAPL waar een factor 2,5 tussen ligt en waarvoor geen duidelijke verklaring bestaat.

De heterogeniteit van de locatie in Mierlo zorgt ervoor dat de doorbraakcurven van de tracers in sommige peilbuizen zeer grillig verloopt. Bovendien blijkt uit de data ook dat sommige peilbuizen in een raai niet langs dezelfde stroombaan liggen. Dit heeft tot gevolg dat de interpretatie van de data veel lastiger is dan de voorbeelden die in de literatuur worden gegeven. Bovendien moeten voor grillige doorbraakcurven veel meer punten op de doorbraakcurve worden bemeaten om het verloop ervan goed te kunnen bepalen.

Al met al is de PITT een veelbelovende karakterisatiemethode voor de DNAPL-bronzones. In tegenstelling tot de huidige karakterisatiemethode, die slechts puntmetingen geven, geeft de PITT informatie over de DNAPL-bronzones met een grotere supportschaal, namelijk de afstand tussen de peilbuizen.

De uitvoering van de PITT kan worden afgestemd op de mate van detail die nodig is voor de uiteindelijke sanering van de bronzones. De PITT kan worden toegepast in combinatie met vrijwel alle saneringstechnieken, waarbij de kosteneffectiviteit afhangt van de specifieke omstandigheden.

De PITT is zeer aantrekkelijk bij stagnerende pump & treat saneringen, omdat vrijwel alle benodigde infrastructuur daar al aanwezig is.

#### 8.2 Aanbevelingen

Om een PITT succesvol te kunnen uitvoeren, moet de uitvoering van de test nauwkeurig worden afgestemd op het doel om de PITT uit te voeren. Hierbij valt te denken of er pure DNAPL in de bodem aanwezig is, waar deze DNAPL zich bevindt, met welke resolutie dat moet worden vastgesteld en tenslotte hoeveel DNAPL er aanwezig is.



Bij een sterk gelaagde bodem is het aan te bevelen om meerdere concentratiemetingen in de diepte uit te voeren. Voor de locatie in Mierlo bestaat sterk het vermoeden dat de meervoudige doorbraken die in sommige peilbuizen optreden het gevolg is van stroming door meerdere laagjes. Doordat het filter in meerdere laagjes staat, wordt de gemeten doorbraakcurve een combinatie van de doorbraken in alle laagjes.

Verder verdient het aanbeveling om te onderzoeken waardoor de analyse van de data van 1-hexanol een grotere Per-verzadigingsgraad geeft dan de analyse van de data van 2,4-dimethyl-3-pentanol. Zo lang niet bekend is welk mechanisme dit verschil veroorzaakt, kan de hoeveelheid DNAPL in de bodem alleen met een nauwkeurigheid van een factor 2 à 3 worden bepaald.

Om de hoeveelheid DNAPL nauwkeuriger te kunnen bepalen, moet de relatie tussen de DNAPL-verzadigingsgraad en de retardatiefactor van de tracer nauwkeuriger worden bepaald. Dit kan worden gedaan door middel van kolomexperimenten.

Verder is het van belang om te onderzoeken of de partitionerende tracers ook retarderen aan veen om te bepalen of een PITT ook kan worden toegepast op een locatie waar veen aanwezig is.

## LITERATUUR

- Annable, M.D., J.W. Jawitz, P.S.C. Rao, , D.P. Dai, H. Kim en A.L. Wood, 1998.  
Field evaluation of interfacial and partitioning tracers for characterization of effective DNAPL-water contact areas.  
Groundwater, vol. 36, no. 3, pp. 495-502.
- Bennett, A.F., 1992.  
Inverse methods in physical oceanography.  
Cambridge University Press.
- Bierkens, M.F.P., 1994.  
Complex confining layers: A stochastic analysis of hydraulic properties at various scales.  
Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Brooks, A.N. en T.J.R. Hughes, 1982.  
Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations.  
Computational methods in applied mechanics and engineering, 32, pp. 199-259.
- Davis, E.L., 1997.  
How can heat enhance in-situ soil and aquifer remediation: important chemical properties and guidance on choosing the appropriate technique.  
EPA Ground Water Issue, EPA/540/S-97/502.
- Geer, F.C. van, 1987.  
Applications of Kalman filtering in the analysis and design of groundwater monitoring networks.  
Proefschrift TU Delft.
- Hetterschijt, R.A.A. en C.B.M. te Stroet, 1998.  
Restrisk; Verspreiding en restrisiko's van restconcentraties in bodem en grondwater - Fase 2: Deelresultaat 1: Slimmer saneren met pump & treat; onzekerheden en pompstrategieën.  
CUR/NOBIS-rapport 95-2-11, CUR/NOBIS, Gouda.
- James, A., W. Graham, K. Hatfield, P.S.C. Rao en M.D. Annable, 1997.  
Optimal estimation of residual non-aqueous phase liquid saturations using partitioning tracer concentration data.  
Water Resources Research, pp. 2621-2636.
- Jin, M., M. Delshad, V. Dwarakanath, D. McKinney, G.A. Pope, K. Sepehrnoori, C. Tilburg en R. Jackson, 1995.  
Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface non-aqueous phase liquids.  
Water Resources Research, pp. 1201-1211.
- Marshall, T.J. en J.W. Holmes, 1979.  
Soil physics.  
Cambridge University Press.

- Nelson, N. en M. Brusseau, 1996.  
Field study of the partitioning tracer test method for detection of dense non-aqueous phase liquid in a trichloroethene-contaminated aquifer.  
Environmental Science & Technology, pp. 2859-2863.
- Pankow, J. en J. Cherry, 1996.  
Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater.  
Waterloo Press
- Promeco, 1997.  
Inventarisatie bodemonderzoek, Brabantex BV te Mierlo.  
Wmo/HK/AvH/JHi/V-1861.
- Rao, P.S.C., M.D. Annable, H. Kim en K. Saripalli, 1998.  
Tracer techniques for site characterization and remediation technology performance assessment: recent developments and applications.  
IAHS Publicatie No. 250, pp. 353-360.
- Schweppe, F.C., 1973.  
Uncertain system dynamics.  
Prentice Hall, 1973.
- Stroet, C.B.M. te, 1995.  
Calibration of stochastic groundwater flow models; estimation of noise statistics and model parameters.  
Proefschrift TU Delft.
- Valstar, J.R., 1997.  
Efficient inverse modeling: a representer approach.  
In: V. Pawlowsky-Glahn (ed.), Congresverlag IAMG 1997, Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, pp. 67-71.
- Valstar, J.R., 2000.  
Inverse modeling of groundwater flow and transport.  
Proefschrift TU Delft (in voorbereiding).
- Weytingh, K.R., A.H. van de Velde, M. van Zutphen en L. Vasak, 2000.  
Karakterisatie van DNAPL-locaties (DNAPL-KAR) - Eindrapportage.  
CUR/NOBIS-rapport 95-2-10, CUR/NOBIS, Gouda.
- Wilson, R. en D. Mackay, 1995.  
Direct detection of residual non-aqueous phase liquid in the saturated zone using SF<sub>6</sub> as a partitioning tracer.  
Environmental Science & Technology, pp. 1255-1258.
- Wise, W.R., D.P. Dai, E.A. Fitzpatrick, L.W. Evans, P.S.C. Rao en M.D. Annable, 1999.  
Non-aqueous phase liquid characterization via partitioning tracer tests: a modified Langmuir relation to describe partitioning non-linearities.  
Journal of Cont. Hydrology, vol. 36, pp. 153-165, Elsevier.

Young, C.M., R.E. Jackson, M. Jin, J.T. Londergan, P.E. Mariner, G.A. Pope, F.J. Anderson en T. Houk, 1999.  
Characterization of a TCE DNAPL zone in alluvium by partitioning tracers.  
GWMR, 85, pp. 84-94.



## BIJLAGE A

### OPZET, RESULTATEN EN UITWERKING VAN KOLOMEXPERIMENTEN

#### Opzet

##### *Apparatuur*

Voor het uitvoeren van de kolomexperimenten is gekozen voor een verticale doorstroming van het sediment. Om de relatie met de resultaten in het veldexperiment zo veel mogelijk overeen te laten komen, is gebruik gemaakt van het sediment en de DNAPL van de locatie. De verhouding van de verschillende tracers is gelijk aan de verhouding die gebruikt is in de veldtest. Het schema van het systeem is weergegeven in figuur A1. Al het leidingwerk is 1/16" Stainless Steel 316. Alle connecties zijn Swagelok®. De gebruikte pompen zijn Watson & Marlow 519 slangenpompen. De gebruikte tubing is Watson & Marlow 1/16" silicone slang. De glazen kolomen zijn met PTFE-gecoate inlays afgesloten. De proef is uitgevoerd bij kamertemperatuur.

Fig. A1. Overzicht van de opstelling voor de kolomexperimenten.

##### *De kolom*

In de kolom aan de onderzijde en bovenzijde van het sediment zijn glaskorrels, inert keramisch materiaal en glaswol aangebracht om uitspoeling van het fijne sediment te voorkomen. Tijdens het pakken van de kolom is het fijne zand van de locatie na elke circa 7 ml zorgvuldig met de onderliggende laag gemengd en gecompacteerd. Hierdoor is een hecht gepakte kolom ontstaan. Na het vullen en natrillen van de kolom op een shaker, is de kolom gedurende enkele uren tot dagen doorspoeld met CO<sub>2</sub>. Een zeer grote overmaat aan CO<sub>2</sub> is toegepast om ervoor zorg te dragen dat alle lucht in de kolom is vervangen door CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> lost op in water, waardoor eventuele gasinsluitingen na het doorspoelen met water automatisch verdwijnen doordat CO<sub>2</sub> oplost in water. Nadien is door middel van een klein verhang (maximaal 10 cm waterkolom) de kolom met N<sub>2</sub>-geflushed water verzadigd. De op deze wijze verzadigde kolom is na één of meerdere dagen stabilisatie doorspoeld met N<sub>2</sub>-geflushed water.

### *Toediening van Per*

Een afgewogen hoeveelheid Per is met een luchtdichte glazen injectiespuit (Hamilton) toegevoegd via het septum aan de bovenzijde van de kolom. Tijdens het toevoegen was aan de onderzijde van de kolom de 'drain-kraan' open om vloeistofstroming mogelijk te maken. Na enkele uren van stabilisatie is onder natuurlijk verval (circa 90 cm) ten minste 10 porievolumes aan water neerwaarts (conform de verspreidingsrichting van de DNAPL) door de kolom gestroomd. De massa van de eventueel aan de onderzijde doorbrekende Per is bepaald en in mindering gebracht op de hoeveelheid Per in de kolom.

### *Monstername*

De *headspace-analyses*, die worden gebruikt voor de bepaling van de concentraties, vereisen een minimum hoeveelheid aan vloeistof van ten minste 10 ml. Voor de bromideanalyses is eveneens een volume van circa 10 ml nodig (o.a. voor filtratie enz.). Het geringe debiet maakt het noodzakelijk om het effluent te verzamelen en periodiek te monstern. Om vervluchtiging van de alcoholen tussen twee monsternamen zo veel mogelijk te voorkomen, is een collectievat geplaatst. In het SS 316 collectievat (50 ml) komt het effluent binnen aan de zijkant. Aan de bovenzijde stroomt de gasfase en mogelijk wat effluent tijdens het vullen via de 1/16" SS-leiding weg. Door de geringe diameter van deze leiding is de vervluchtiging van de alcoholen mede door diffusie met de omgeving geminimaliseerd. Het monster wordt genomen door een kraan aan de onderzijde van het vat te openen en onder natuurlijk verval in een 50 ml Erlemeier te laten stromen. Hierbij is de vervluchtiging geminimaliseerd. Tien milliliter van het opgevangen monster wordt direct in een *crimp-cap-vial* gepipetteerd. De *crimp-cap-vial* is vooraf voorzien van 4,00 gram NaCl. Hierna wordt het monster voor de bromideanalyses genomen. De monsters zijn met een vast tijdsinterval (10 min.) genomen.

### *Analyses*

Headspace-analyses zijn uitgevoerd voor de bepaling van de concentraties van de drie alcoholen. Voor deze analyses is gebruik gemaakt van een HP6890 GC met een 50 m J&W Scientific DB-1 kolom voorzien van een 5 µm film. De GC is voorzien van een Autosampler. De doorlooptijd van elk monster is circa 15 minuten. Voor de bromideanalyses is gebruik gemaakt van de Dionex-DX-120 ion chromatograaf.

### *Toevoeging van de tracers en chaser*

Na stabilisatie van het water in de kolom is de kolom met een constant debiet opwaarts doorspoeld met de chaser. Dit debiet bedroeg 5 ml/min. Op  $t = 0$  is de pomp van de chaser uitgezet en die van de tracers aangezet. De injectie met tracers is gedurende de tijd dat een porievolume door de kolom stroomt aangeweest. Direct daarop is wederom de chaser door de kolom gestuurd. De duur van het experiment is afhankelijk gesteld van de doorbraak van de meest retarderende alcohol: 2,4-dimethyl-3-pentanol. Na circa zesmaal het porievolume te hebben doorspoeld is de proef beëindigd.

## **Resultaten**

De doorbraakcurven van de tracers bij een Per-verzadigingsgraad van 7,5 %, 10 % en 12,5 % worden weergegeven in de figuren A2, A3 en A4.

### PITT kolomproef met Per (7,5 %)

1.2

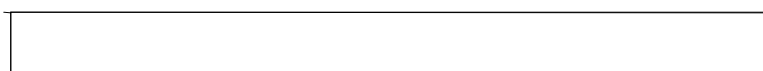




Fig. A2. Doorbraakcurven van de kolomexperimenten bij een Per-verzadigingsgraad van 7,5 %.

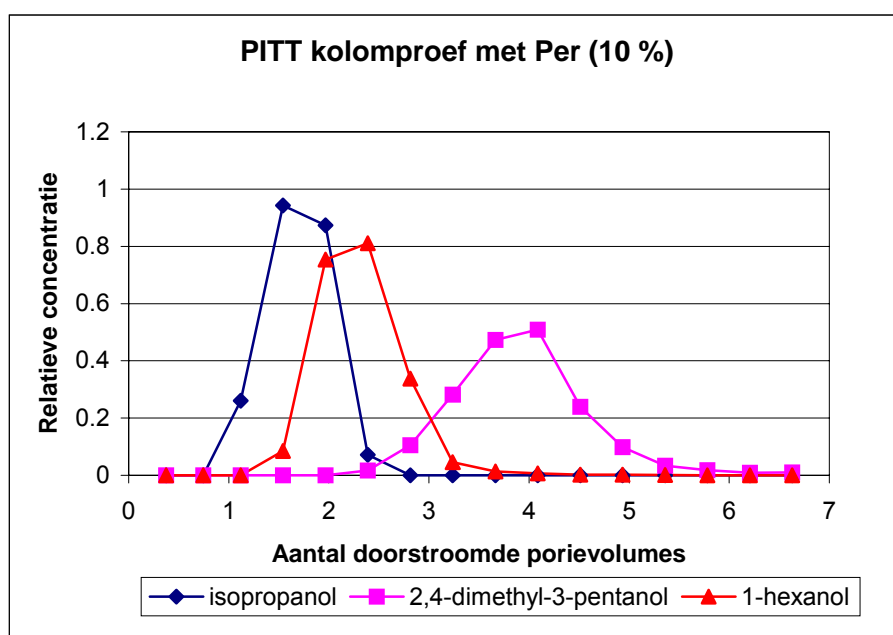


Fig. A3. Doorbraakcurven van de kolomexperimenten bij een Per-verzadigingsgraad van 10 %.

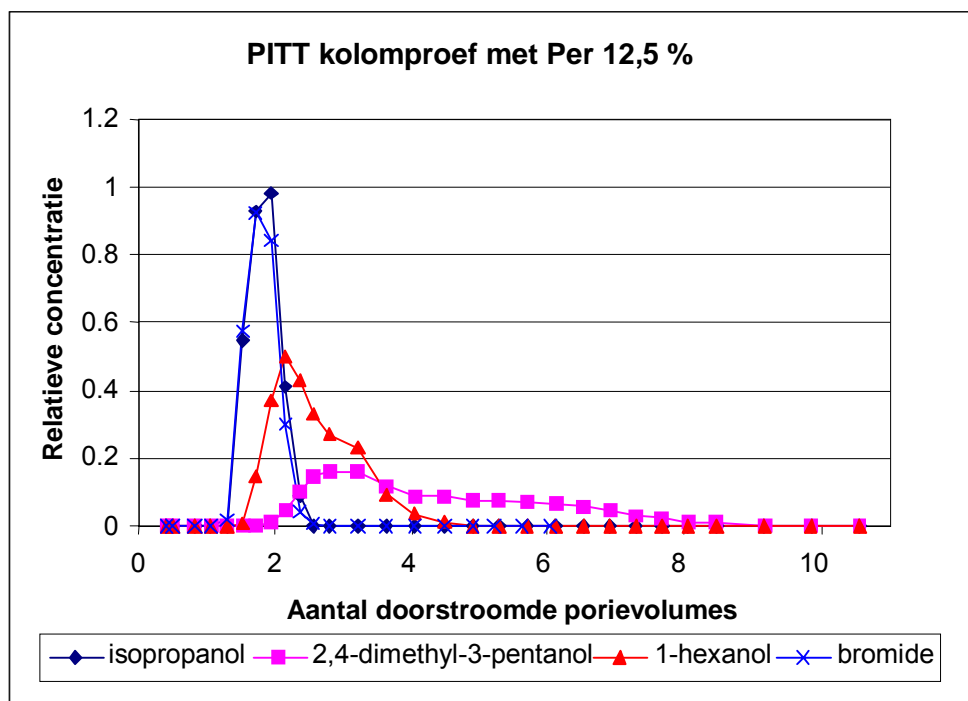


Fig. A4. Doorbraakcurven van de kolomexperimenten bij een Per-verzadigingsgraad van 12,5 %.

Tevens is er ook een kolomproef uitgevoerd zonder Per. De doorbraakcurven van dit blanco experiment worden weergegeven in figuur A5.

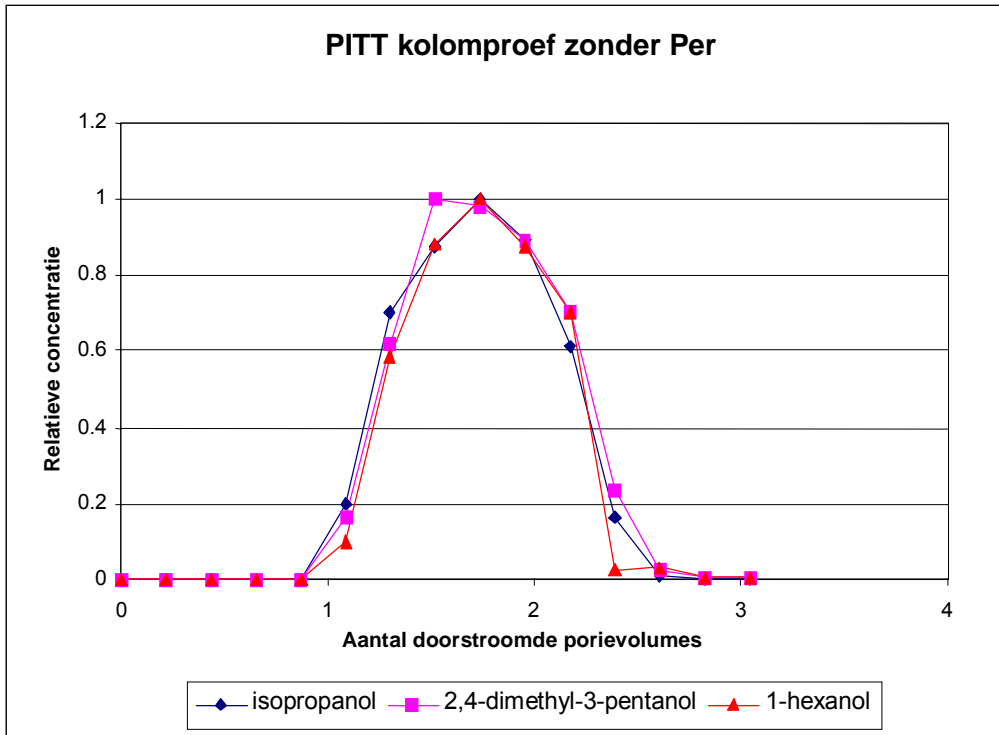


Fig. A5. Doorbraakcurven van de kolomexperimenten zonder Per.

## Interpretatie

Om de gemeten doorbraakcurven te kunnen vertalen naar de retardatie van de desbetreffende tracer wordt eerst de gemiddelde doorbraaktijd uitgerekend. Dit gebeurt met behulp van de momentenmethode [Jin et al., 1995]. Hiertoe wordt eerst het nulde en eerste moment van de doorbraakcurve berekend met behulp van de volgende formules:

$$M_0 = \int_0^{\infty} c(t) dt \quad (A1)$$

$$M_1 = \int_0^{\infty} t \cdot c(t) dt \quad (A2)$$

waarin:

- $M_0$  is het nulde moment;
- $M_1$  is het eerste moment;
- $c(t)$  is de concentratie op de uitstroomlocatie van de kolom;
- $t$  is de tijd.

De gemiddelde doorbraaktijd ( $T$ ) wordt bepaald door het eerste moment te delen door het nulde moment. Door nu de doorbraaktijd van de partitionerende tracers te delen door die van de conservatieve tracer kan de retardatiefactor ( $R$ ) van de partitionerende tracer worden bepaald. De partiticoëfficiënt ( $K_d$ ) van de partitionerende tracer is de retardatiecoëfficiënt minus één. Deze partiticoëfficiënt is de verhouding tussen de tracer die zich in de DNAPL bevindt en de tracer die zich in het grondwater bevindt.

Bovengenoemde berekeningen zijn uitgevoerd met de doorbraakcurven van de kolomproeven. Hierbij is isopropanol als conservatieve tracer gesteld aangezien de bromidedata niet voor alle kolomproeven zijn geanalyseerd. Uit de kolomproeven waarin de bromidedata wel zijn geanalyseerd en ook uit de veldmetingen blijkt dat isopropanol niet retardeert. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel A1.

Tabel A1. Berekening van de data van kolomexperimenten.

tracer	Per-verzadigingsgraad 5 %					Per-verzadigingsgraad 10 %				
	$M_0$	$M_1$	$T$	$R$	$K_d$	$M_0$	$M_1$	$T$	$R$	$K_d$
isopropanol	6,18	10,1	1,63	1	0	2,14	3,63	1,69	1	0
1-hexanol	4,73	9,00	1,90	1,17	0,17	2,06	4,76	2,31	1,37	0,37
2,4-dimethyl-3-pentanol	3,11	7,68	2,47	1,51	0,51	1,79	7,03	3,92	2,32	1,32
tracer	Per-verzadigingsgraad 7,5 %					Per-verzadigingsgraad 12,5 %				
	$M_0$	$M_1$	$T$	$R$	$K_d$	$M_0$	$M_1$	$T$	$R$	$K_d$
isopropanol	1,13	2,02	1,79	1	0	2,96	5,42	1,83	1	0
1-hexanol	1,03	2,26	2,21	1,23	0,23	2,42	5,93	2,45	1,34	0,34
2,4-dimethyl-3-pentanol	0,83	2,48	3,00	1,68	0,68	1,39	5,76	4,13	2,25	1,25

De resultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 2 (zie hoofdstuk 3).

BIJLAGE B  
**BOORSTATEN**

BIJLAGE C

**ANALYSES VAN BODEMMONSTERS**

De analyseresultaten van de bodemonsters zijn weergegeven in tabel C1.

Tabel C1. Analyseresultaten van bodemonsters.

boorpunt	diepte (m-mv)	Per (mg/kg ds)	droge stof (%)
11	2,6 - 2,9	0,1	88,8
12	2,5 - 3,0	< 0,1	86,6
13	2,0 - 2,5	< 0,1	87,3
13	2,7 - 2,9	< 0,1	90,5
14	2,6 - 2,9	2,1	85,3
21	2,0 - 2,4	0,2	88,7
21	2,6 - 3,0	< 0,1	92,4
22	2,5 - 3,0	0,6	86,9
23	1,5 - 2,0	< 0,1	89,9
23	2,5 - 3,0	0,8	87,3
31	2,0 - 2,5	< 0,1	87,3
32	1,5 - 2,0	0,2	89,5
32	2,0 - 2,5	64	87,3
32	2,5 - 3,0	900	86,8
33	2,0 - 2,3	< 0,1	87,4
33	2,6 - 3,0	1,9	87,6
34	2,0 - 2,5	0,6	87,3
41	2,5 - 3,0	< 0,1	90,4
42	2,0 - 2,5	1300	88,4
42	2,5 - 2,9	210	87,4
43	1,1 - 1,6	< 0,1	90,8
43	2,0 - 2,7	19	87,6
45	2,5 - 3,0	1,2	87,6
51	1,5 - 2,0	1,6	89,5
51	2,4 - 2,8	48	85,6
51	2,8 - 3,0	19	86,7
52	1,8 - 2,5	36	87,1
52	2,5 - 3,0	3,5	86,4
53	1,0 - 1,5	< 0,1	92,4
53	2,0 - 2,2	4,1	87,2
53	2,4 - 2,6	1700	87,0
53	2,8 - 3,0	2800	88,0
61	1,5 - 2,0	320	86,8
61	2,0 - 2,3	10000	87,4
62	1,1 - 1,5	< 0,1	88,6
62	2,0 - 2,4	5100	88,0
62	2,4 - 2,8	48	84,6
63	1,5 - 2,0	< 0,1	89,2
63	2,0 - 2,5	22	84,3
63	2,5 - 3,0	10	88,6
63	1,5 - 2,0	3,1	88,0
64	2,0 - 2,4	9800	87,9
64	2,4 - 3,0	6,0	87,5

BIJLAGE D

DOORBRAAKCURVEN VAN DE PITT

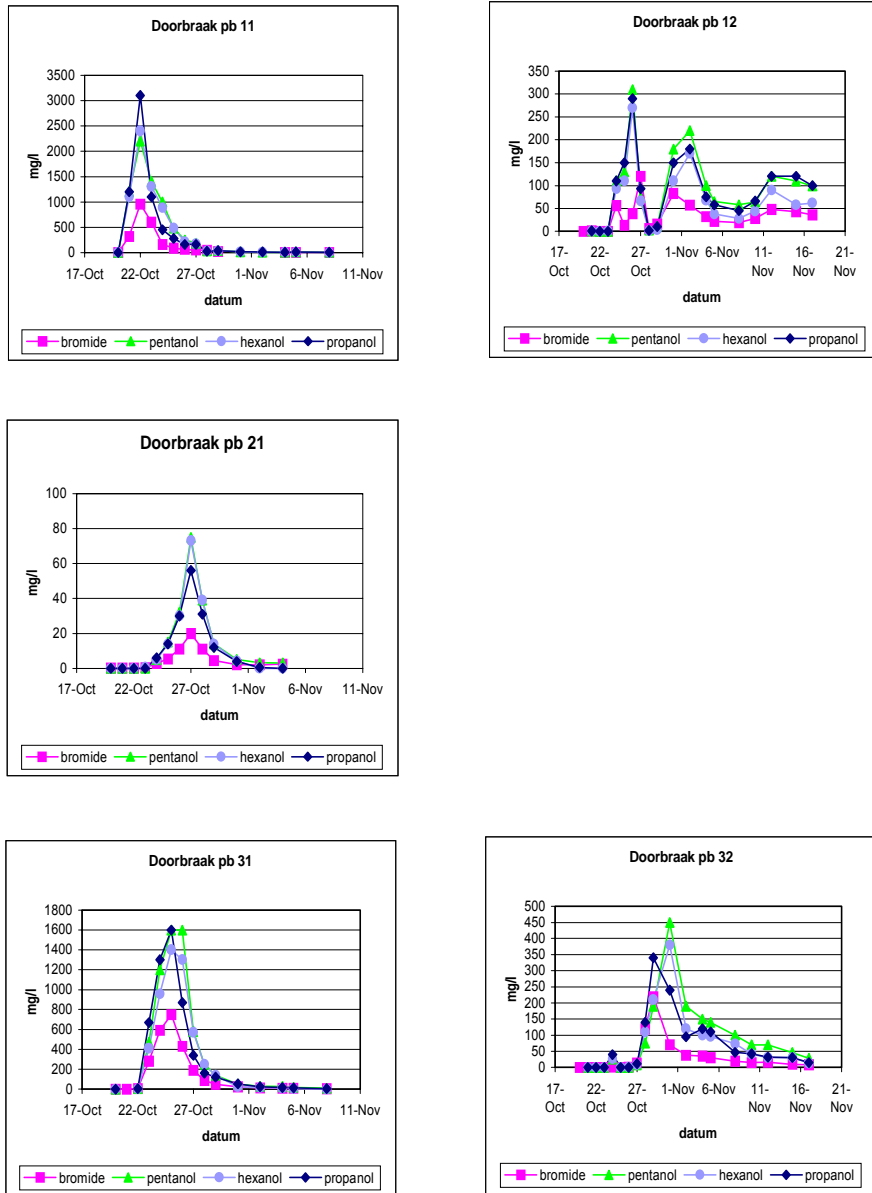


Fig. D1. Doorbraakcurven van de tracers op de locatie te Mierlo.

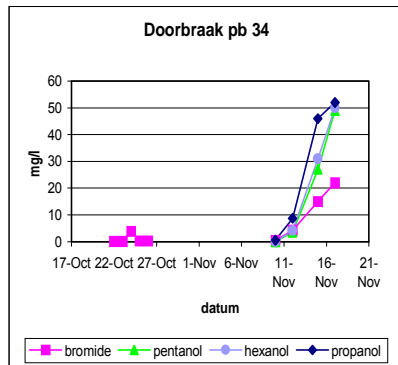
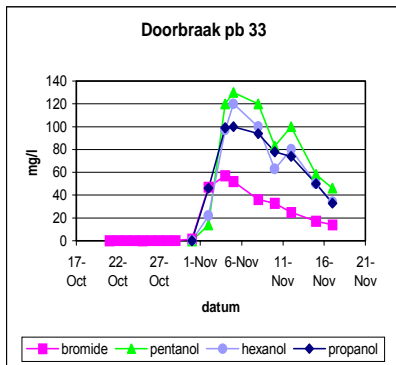
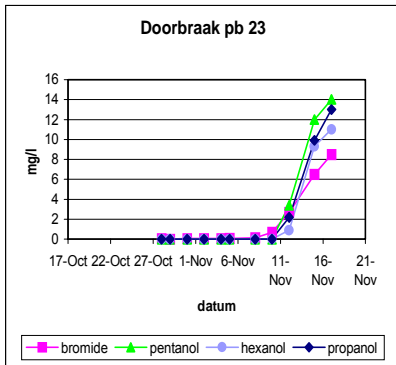
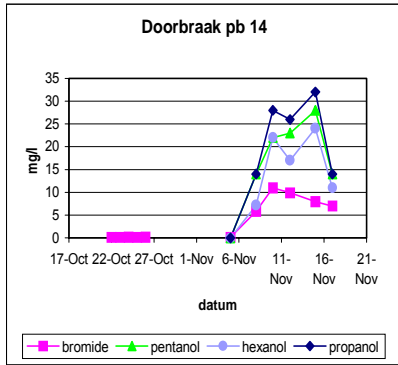
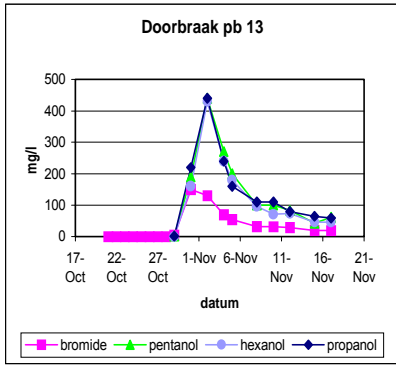


Fig. D1. Doorbraakcurven van de tracers op de locatie te Mierlo (vervolg).

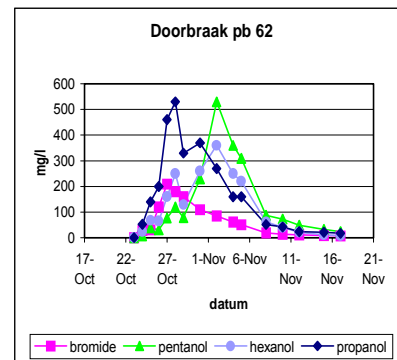
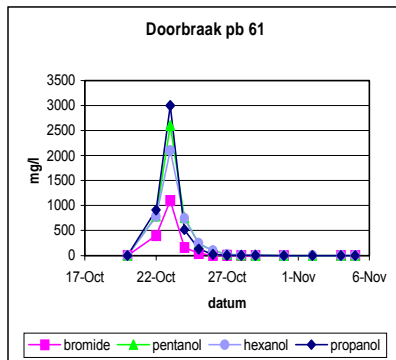
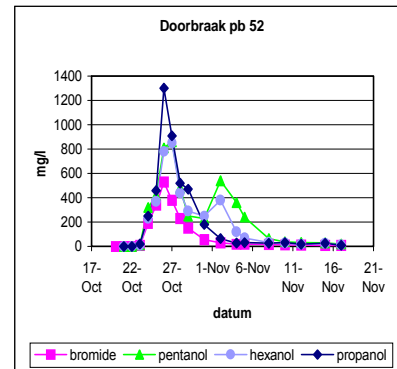
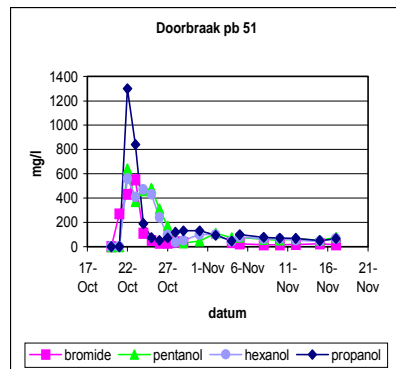
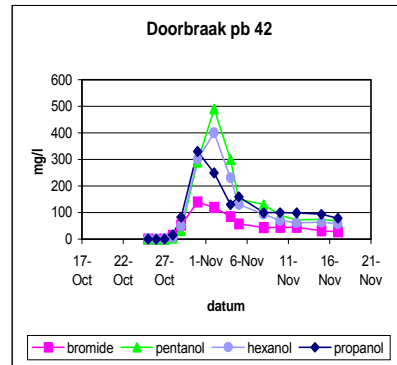
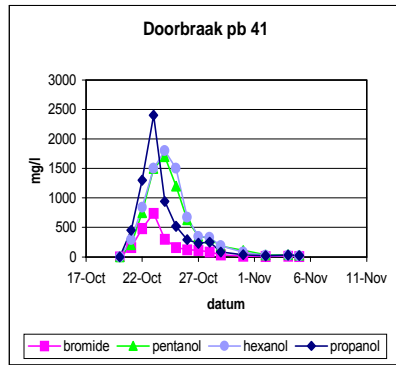


Fig. D1. Doorbraakcurven van de tracers op de locatie te Mierlo (vervolg).



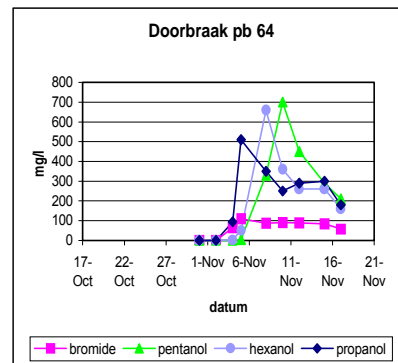
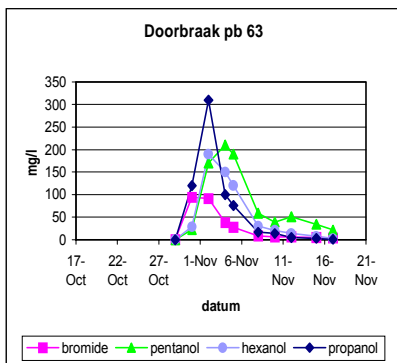
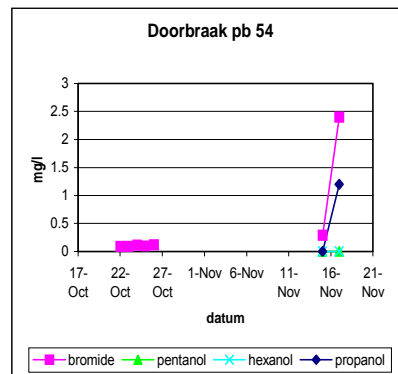
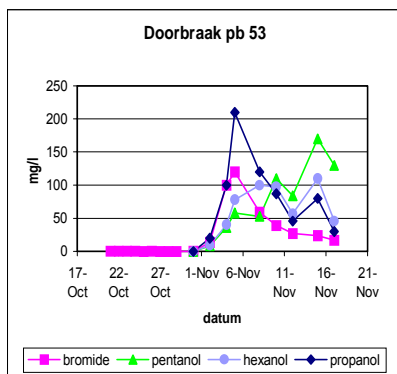
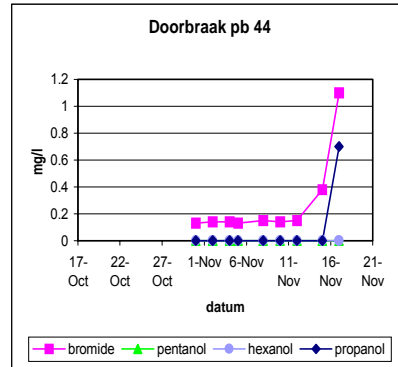


Fig. D1. Doorbraakcurven van de tracers op de locatie te Mierlo (vervolg).

## BIJLAGE E

### BESCHRIJVING VAN HET INVERSE MODEL

#### Beschrijving van het voorwaartse model

Het model voor de modellering van de verspreiding van de tracers bestaat uit een tweedimensionaal grondwaterstromingsmodel en een transportmodel.

##### *Grondwaterstromingsmodel*

In het grondwaterstromingsmodel worden de stijghoogten uitgerekend. Dit gebeurt voor tweedimensionale stationaire stroming door middel van de volgende differentiaalvergelijking:

$$\nabla(k\nabla h) = q \quad (E1)$$

en de volgende randvoorwaarden:

$$h(x) = h_b(x), \text{ indien } x \text{ op de modelrand ligt}$$

waarin:

- $k$  is de doorlatendheid;
- $h$  is de stijghoogte;
- $h_b$  is de stijghoogte op de modelrand.

Deze differentiaalvergelijking is gediscretiseerd door middel van een eindig-elementenmodel, waarbij de stijghoogten op een aantal knooppunten van het model worden uitgerekend.

##### *Transportmodel*

In het transportmodel worden de concentraties als verloop van tijd en ruimte uitgerekend met behulp van de volgende gekoppelde differentiaalvergelijking:

$$\frac{dc(t)}{dt} = -\nabla(u \cdot c(t)) + \nabla(D\nabla c(t)) - \frac{f}{\Theta} (c(t) - s(t)) + \frac{q}{\Theta} \cdot c_q(t) + w_c(t) \quad (E2)$$

$$\frac{ds(t)}{dt} = \frac{f}{\Theta_s} (c(t) - s(t)) + w_s(t) \quad (E3)$$

waarin:

- $\Theta$  is de porositeit van de mobiele zone;
- $c(t)$  is de concentratie in de mobiele zone;
- $u = -\frac{k}{\Theta} \nabla h$  is de snelheid van het grondwater;
- $D$  is de dispersiecoëfficiënt;
- $f$  is de uitwisselingscoëfficiënt;
- $s(t)$  is de concentratie in de immobiele zone;
- $R$  is de retardatiefactor;
- $\Theta_s$  is de immobiele porositeit;
- $c_q$  is de concentratie van het injectiedebiet;
- $w_c(t)$  is de systeemruis voor de mobiele concentraties;
- $w_s(t)$  is systeemruis voor de immobiele concentraties.

De processen, die in dit model worden meegenomen, zijn: advectie, dispersie, niet-evenwichtsadsorptie, retardatie door de aanwezigheid van DNAPL's en systeemruis.

De retardatie door de aanwezigheid van DNAPL's geldt alleen voor de reactieve tracers. Verder wordt een gedeelte van de onzekerheid in het model vertaald uit de systeemruis. Deze term is een vergaarbak voor alle fouten van het model die niet kunnen worden verklaard door de modelparameters te verbeteren. Het is echter de bedoeling dat deze term zo klein mogelijk blijft en het gedrag van de stoffen grotendeels wordt bepaald door de fysische processen die in het model aanwezig zijn. De bijdrage van de systeemruis aan het verloop van de concentratie mag niet al te groot zijn en dit zal na afloop van het inverse model dan ook moeten worden gecontroleerd en eventueel moet voor dit effect een correctie worden toegepast.

Deze vergelijking wordt gediscetiseerd met een Petrov-Galerkin eindig-elementenmodel [Brooks en Hughes, 1982].

### **Invers model**

Het inverse model verbetert de schatting van de modelparameters door gebruik te maken van de informatie van toestandsvariabelen. Het inverse model is gedefinieerd door het opstellen van een doelfunctie:

$$J = (z - M(c))^T C_z^{-1} (z - M(c)) + (\alpha - \bar{\alpha})^T C_\alpha^{-1} (\alpha - \bar{\alpha}) \quad (E4)$$

Deze doelfunctie bestaat uit twee termen. De eerste is term is de meetterm en deze term wordt groter naarmate de modelvoorspellingen verder van de metingen af liggen. De tweede term is de parameterterm en deze wordt groter naarmate de schatting van de modelparameters verder van hun a-priori gemiddelde af komen te liggen. De optimale oplossing van het inverse probleem is de set modelparameters waarbij de waarde van de doelfunctie minimaal is. De oplossingsmethode, die wordt gebruikt om de doelfunctie te minimaliseren, wordt beschreven in Valstar [2000] en Valstar [1997].

## BIJLAGE F

### RESULTATEN VAN INVERSE MODELLERING

Fig. F1. Geschatte verdeling van de mobiele porositeit maal de dikte van het doorstroomde pakket in (m).

Fig. F2. Geschatte verdeling van de uitwisselingscoëfficiënt tussen de mobiele en immobiele zone in  $(1/d)$ .

Fig. F3. Doorbraakcurven van bromide; modelvoorspelling met een modelparameter die geüpdatet is, maar zonder systeemruis.

Fig. F4. Berekende en gemeten doorbraakcurven van 2,4-dimethyl-3-pentanol.

Fig. F5. Berekende en gemeten doorbraakcurven van 1-hexanol; berekende doorbraakcurve zonder systeemruis.



Fig. F6. Berekende en gemeten doorbraakcurven van 2,4-dimethyl-3-pentanol; berekende doorbraakcurve zonder systeemruis.

Fig. F7. Berekende retardatiefactoren voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.

Fig. F8. Retardatiefactor voor 2,4-dimethyl-3-pentanol, na correctie voor de invloed van de systeemruis.

## BIJLAGE G

### VERTALING VAN DE INVLOED VAN SYSTEEMRUIS NAAR AANGEPASTE RETARDATIEFACTOREN

#### Methode

De methode waarmee de invloed van de systeemruis op de doorbraakcurven wordt vertaald naar een aangepaste retardatiecoëfficiënt wordt hieronder uitgewerkt. Bij deze methode zijn twee aannamen gebruikt. Allereerst wordt aangenomen, dat de verschillen in doorbraakcurven tussen de verschillende tracers uitsluitend kan worden veroorzaakt door partitionering aan de DNAPL. Ten tweede wordt aangenomen dat de peilbuizen in iedere raai langs dezelfde stroombanen liggen. Hierdoor wordt een extra vertraging in een buis stroomafwaarts van een andere buis vertaald naar een partitionering aan de DNAPL in het gebied dat tussen deze 2 peilbuizen ligt.

Allereerst wordt uit de berekende doorbraakcurven de gemiddelde doorbraaktijd voor alle tracers in alle peilbuizen uitgerekend met behulp van de momentenmethode. Vervolgens wordt het verschil in de doorbraaktijd tussen de conservatieve tracer en de partitionerende tracer ( $\Delta T$ ) bepaald. Daarna worden tussen 2 stroombanen die na elkaar op dezelfde raai liggen het verschil in de vertraging bepaald, zodat per traject tussen twee peilbuizen bekend is wat de gemiddelde doorstroomtijd is:

$$\Delta T_{i,i-1} = \Delta T_i - \Delta T_{i-1} \quad (G1)$$

Door per doorstroomd traject de verschillen in doorstroomsnelheid van de partitionerende tracers te delen door de doorstroomsnelheid van bromide wordt een effectieve retardatiecoëfficiënt voor dit doorstroomd traject verkregen:

$$R_{\text{alcohol}}^{12} = \frac{T_{\text{alcohol}}^{12}}{T_{\text{bromide}}^{12}} \quad (G2)$$

Indien uit de berekening volgt dat de retardatiefactor kleiner is dan 1 wordt hiervoor de waarde 1 aangehouden. Vervolgens wordt de effectieve retardatiefactor vergeleken met de effectieve retardatiefactor, die met het inverse model is berekend (het rekenkundig gemiddelde in het betreffende traject; zie fig. 12 in hoofdstuk 5 voor 1-hexanol en fig. F8 in bijlage F voor 2,4-dimethyl-3-pentanol) en wordt de ruimtelijke verdeling gecorrigeerd om dezelfde effectieve retardatiecoëfficiënt te krijgen.

#### Invloed van de systeemruis op de doorbraakcurven

De berekende gemiddelde doorbraaktijden voor de modelruns met en zonder systeemruis zijn weergegeven in de tabellen G1, G2 en G3 voor bromide, 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol.

Tabel G1. Gemiddelde doorbraaktijd van bromide voor modelruns met en zonder systeemruis.

peilbuis	gemiddelde doorbraaktijd met systeemruis in dagen	gemiddelde doorbraaktijd zonder systeemruis in dagen
11	3,96	3,79
12	8,47	8,30
13	16,18	16,26
14	23,93	24,15
21	3,62	3,53
22	8,47	8,41
23	15,96	15,91
24	23,91	23,88
31	6,67	6,48
32	12,92	12,61
33	20,08	19,50
34	26,52	26,67
41	5,65	5,15
42	16,61	16,38
43	24,16	24,04
44	25,21	25,59
51	6,01	4,64
52	9,10	8,75
53	19,18	19,91
54	26,87	27,07
61	3,13	3,04
62	12,28	11,85
63	16,08	16,37
64	21,29	21,27

Tabel G2. Gemiddelde doorbraaktijd van 1-hexanol voor modelruns met en zonder systeemruis.

peilbuis	gemiddelde doorbraaktijd met systeemruis in dagen	gemiddelde doorbraaktijd zonder systeemruis in dagen
11	4,22	4,07
12	9,38	9,35
13	16,82	16,99
14	24,22	24,60
21	4,67	4,60
22	10,58	10,61
23	18,87	18,91
24	25,79	25,81
31	6,24	6,54
32	14,09	13,83
33	20,24	20,95
34	26,81	26,88
41	6,14	5,47
42	16,62	17,00
43	25,19	25,40
44	23,50	22,64
51	9,02	6,84
52	10,77	9,79
53	21,52	22,02
54	22,01	22,54
61	3,30	3,30
62	13,88	12,85
63	16,22	17,11
64	22,80	22,93

Tabel G3. Gemiddelde doorbraaktijd van 2,4-dimethyl-3-pentanol voor modelruns met en zonder systeemruis.

peilbuis	gemiddelde doorbraaktijd met systeemruis in dagen	gemiddelde doorbraaktijd zonder systeemruis in dagen
11	4,19	4,05
12	9,48	9,47
13	16,83	16,96
14	24,10	24,46
21	4,42	4,38
22	10,42	10,43
23	18,75	18,74
24	25,73	25,73
31	6,77	6,82
32	14,83	14,40
33	20,98	21,52
34	26,99	27,09
41	6,08	5,66
42	16,98	17,31
43	25,35	25,49
44	23,94	22,91
51	7,71	7,33
52	10,52	9,94
53	23,10	22,77
54	22,00	22,93
61	3,46	3,21
62	14,86	13,27
63	18,04	19,47
64	23,87	24,09

Met behulp van deze gemiddelde doorbraaktijden is een schatting voor de effectieve retardatiefactor gemaakt. Deze berekening wordt weergegeven in tabel G4 voor 1-hexanol en in tabel G5 voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.

Tabel G4. Effectieve retardatiefactoren voor 1-hexanol.

peilbuis	$T_{\text{bromide}}$ (in dagen)	$T_{\text{hexanol}}$ (in dagen)	$\Delta T$ (in dagen)	$T_i - T_{i-1}$ (in dagen)	$R_{\text{effectief}}$
11	3,86	4,22	0,36	0,36	1,14
12	8,89	9,37	0,48	0,12	1,02
13	15,44	16,76	1,32	0,84	1,13
21	4,25	4,67	0,42	0,42	1,14
22	9,75	10,57	0,82	0,40	1,07
23	17,42	18,84	1,42	0,60	1,08
31	6,77	6,24	-0,53	-0,53	0,90
32	14,07	14,05	-0,02	0,51	1,07
33	20,78	20,17	-0,61	-0,59	0,91
41	5,98	6,12	0,14	0,14	1,03
42	17,19	16,55	-0,64	-0,78	0,93
43	24,97	25,05	0,08	0,72	1,09
51	6,84	8,96	2,12	2,12	1,38
52	9,57	10,72	1,15	-0,97	0,64
53	19,45	21,43	1,98	0,83	1,08
61	3,11	3,30	0,19	0,19	1,10
62	12,28	13,86	1,58	1,39	1,15
63	14,54	16,20	1,66	0,08	1,04

Tabel G5. Effectieve retardatiefactoren voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.

peilbuis	$T_{\text{bromide}}$ (in dagen)	$T_{\text{pentanol}}$ (in dagen)	$\Delta T$ (in dagen)	$T_i - T_{i-1}$ (in dagen)	$R_{\text{effectief}}$
11	3,86	4,19	0,33	0,33	1,13
12	8,89	9,46	0,57	0,24	1,05
13	15,44	16,77	1,33	0,76	1,12
21	4,25	4,42	0,17	0,17	1,06
22	9,75	10,41	0,66	0,49	1,09
23	17,42	18,72	1,30	0,64	1,08
31	6,77	6,76	-0,01	-0,01	1,00
32	14,07	14,79	0,72	0,73	1,10
33	20,78	20,91	0,13	-0,59	0,91
41	5,98	6,07	0,09	0,09	1,02
42	17,19	16,92	-0,27	-0,36	0,97
43	24,97	25,20	0,23	0,50	1,06
51	6,84	7,67	0,83	0,83	1,15
52	9,57	10,49	0,92	0,09	1,03
53	19,45	22,97	3,52	2,60	1,26
61	3,11	3,46	0,35	0,35	1,19
62	12,28	14,84	2,56	2,21	1,24
63	14,54	17,99	3,45	0,89	1,39

## BIJLAGE H

### MOMENTENANALYSE

In deze bijlage wordt de momentenmethode toegepast op de gemeten doorbraakcurven van 1-hexanol en 2,4-dimethyl-3-pentanol. Deze berekening is uitgevoerd in tabel H1 voor 1-hexanol en in tabel H2 voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.

In tabel H1 en H2 wordt per peilbuis in de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kolom de gemiddelde doorbraaktijd uitgerekend. In de 4<sup>e</sup> kolom wordt het verschil in doorbraaktijden tussen bromide en 1-hexanol gegeven, waarbij deze op 0 is gezet indien bromide later doorbreekt dan 1-hexanol. Vervolgens wordt in de 5<sup>e</sup> kolom de vertraging van de partitionerende tracer tussen twee opeenvolgende peilbuizen in dezelfde raai uitgerekend. Vervolgens wordt dit verschil in kolom 6 gedeeld door de tijd die nodig is om van de ene naar de volgende peilbuis te stromen en uiteindelijk wordt in kolom 7 de Per-verzadigingsgraad uitgerekend met behulp van de in de kolomexperimenten bepaalde relatie. Indien bij de berekening de retardatiefactor kleiner is dan 1 is in deze berekening een retardatiefactor van 1 aangehouden. Dit toont meteen één van de nadelen van deze methode, omdat in werkelijkheid de retardatiefactor nooit kleiner dan 1 kan zijn. Het feit dat dit toch optreedt, kan worden veroorzaakt door het geringe aantal metingen op de doorbraakcurve en de vereiste aanname dat de peilbuizen in dezelfde raai langs één stroombaan liggen.

Met behulp van deze Per-verzadigingsgraden wordt nu ook een schatting berekend voor de totale hoeveelheid Per binnen de eerste drie ringen. Dit gebeurt door de Per-verzadigingsgraad te vermenigvuldigen met het bijbehorende volume, waarbij voor de dikte maal de porositeit 0,075 m is aangehouden. De totale hoeveelheid Per in de eerste drie ringen geschat uit de data van 1-hexanol is 158 kg en geschat uit de data van 2,4-dimethyl-3-pentanol is het 66 kg. Deze getallen zijn sterk afhankelijk van de geschatte dikte maal de porositeit van het pakket. Deze is hier globaal uit de doorbraaksnelheid van bromide bepaald.

Tabel H1. Momentenanalyse voor 1-hexanol.

peilbuis	T <sub>bromide</sub> (in dagen)	T <sub>hexanol</sub> (in dagen)	ΔT (in dagen)	T <sub>i</sub> -T <sub>i-1</sub> (in dagen)	R	S (in %)
11	3,83	3,75	0,00	0,00	1,00	0,00
12	15,31	14,44	0,00	0,00	1,00	0,00
13	15,93	16,53	0,60	0,60	1,05	1,64
21	8,29	8,01	0,00	0,00	1,00	0,00
23	25,13	26,48	1,35	1,35	1,08	2,62
31	6,17	6,35	0,18	0,18	1,04	1,21
32	13,12	14,18	1,06	0,88	1,13	4,08
33	18,75	20,14	1,39	0,33	1,06	1,93
41	4,62	5,36	0,74	0,74	1,22	6,86
42	16,34	15,94	0,00	-0,74	0,94	0,00
51	6,77	9,27	2,50	2,50	1,45	13,19
52	8,67	10,20	1,53	-0,97	0,49	0,00
53	19,01	21,57	2,56	1,03	1,10	3,23
61	3,19	3,44	0,25	0,25	1,13	4,15
62	11,66	13,64	1,98	1,73	1,20	6,41
63	14,61	16,11	1,50	-0,48	0,84	0,00



Tabel H2. Momentenanalyse voor 2,4-dimethyl-3-pentanol.

peilbuis	T <sub>bromide</sub> (in dagen)	T <sub>pentanol</sub> (in dagen)	$\Delta T$ (in dagen)	T <sub>i</sub> -T <sub>i-1</sub> (in dagen)	R	S (in %)
11	3,83	3,81	0,00	0,00	1,00	0,00
12	15,31	15,20	0,00	0,00	1,00	0,00
13	15,93	16,56	0,63	0,63	1,05	0,59
21	8,29	8,21	0,00	0,00	1,00	0,00
23	25,13	26,10	0,97	0,97	1,06	0,65
31	6,17	6,42	0,25	0,25	1,05	0,57
32	13,12	15,07	1,95	1,70	1,24	2,70
33	18,75	20,32	1,57	-0,38	0,93	0,00
41	4,62	5,49	0,87	0,87	1,26	2,85
42	16,34	16,22	0,00	-0,87	0,93	0,00
51	6,77	9,19	2,42	2,42	1,44	4,75
52	8,67	11,21	2,54	0,12	1,06	0,71
53	19,01	22,74	3,73	1,19	1,12	1,29
61	3,19	3,44	0,25	0,25	1,13	1,44
62	11,66	15,13	3,47	3,22	1,38	4,14
63	14,61	17,53	2,92	-0,55	0,81	0,00