

NOBIS 95-1-16  
IN SITU SANERING VAN GELAAGDE EN  
SLECHT DOORLATENDE GRONDEN

ing. A.H. Bonneur (Tauf bv)  
mw. drs. F.A. Hanneman MTD (Tauf bv)  
mw. ing. A.T. Haselhoff (Tauf bv)  
drs. T. van Hille (Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam)  
ir. M. Keizer (Landbouwniversiteit Wageningen)  
ir. A.M. Otten (Tauf bv)  
mw. ir. L. Schelwald van der Kley (Gemeentewerken Rotterdam)  
ir. W. Standhardt ((Kuwait Petroleum Europoort B.V.)  
ir. P.I.M. Vis (Ecotechniek Bodem bv)  
ir. Y.M.M. Veenis (Groundwater Technology B.V.)

november 1998

Gouda, CUR/NOBIS

### **Auteursrechten**

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"In situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende gronden", november 1998, CUR/NOBIS, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

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

### **Copyrights**

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"In situ remediation of layered and poorly permeable soils", November 1998, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

### **Liability**

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

**Titel rapport**

In situ sanering van gelaagde  
en slecht doorlatende gronden

**CUR/NOBIS rapportnummer**

95-1-16

**Project rapportnummer**

95-1-16

---

**Auteur(s)**

ing. A.H. Bonneur  
mw. drs. F.A. Hanneman MTD  
mw. ing. A.T. Haselhoff  
drs. T. van Hille  
ir. M. Keizer  
ir. A.M. Otten  
mw. ir. L. Schelwald van der Kley  
ir. W. Standhardt  
ir. P.I.M. Vis  
ir. Y.M.M. Veenis

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 52  
**Bijlagen:** 145

---

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

Tauw bv (ing. A.H. Bonneur, 0570-699723)  
Ecotechniek Bodem bv (ir. P.I.M. Vis, 0346-557700)  
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (drs. T. van Hille, 010-4896194)  
Gemeentewerken Rotterdam (mw. ir. L. Schelwald van der Kley, 0320-218900)  
Groundwater Technology B.V. (ir. Y.M.M. Veenis, 015-2516372)  
Kuwait Petroleum Europoort B.V. (ir. W. Standhardt, 0181-251303)  
Landbouwniversiteit Wageningen (ir. M. Keizer, 0317-483302)

---

**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Samenvatting**

De bodem in het westelijk deel van Nederland wordt op de meeste plaatsen gekenmerkt door de aanwezigheid van een Holocene deklaag met een dikte van 10 tot 25 m. Dit betekent dat het bovenste deel van de bodem is opgebouwd uit een afwisseling van laagjes klei, veen en fijn tot matig fijn zand. De bodem wordt daardoor gekenschetst als gelaagd en slecht doorlatend.

Een deel van het terrein van het bedrijfsterrein van Kuwait Petroleum Europoort (KPE) in het Rotterdamse havengebied is ernstig verontreinigd met mono-aromatische verontreinigingen. Deze verontreinigingen verspreiden zich in de bodemlaag op een diepte van 6 tot 15 m-mv naar het oppervlaktewater van het Caland kanaal. Deze verspreiding vormt voor KPE de aanleiding om te onderzoeken op welke wijze saneringsmaatregelen kunnen worden getroffen waarmee de verspreiding kan worden tegengegaan.

De belangrijkste onderzoeksvraag van het project is de vraag of het mogelijk is om in een gelaagde en slecht doorlatende bodem met behulp van luchtinjectie een biologisch scherm te creëren waarmee verspreiding van mono-aromatische verontreinigingen kan worden tegengegaan. De basis van het onderzoek wordt gevormd door de uitvoering van een pilotproef op veldschaal.

Tijdens de gehele pilotproef zijn de volgende metingen uitgevoerd in het grondwater in de monitoringsfilters:

- opgelost zuurstof;
- aromaten;
- temperatuur.

Tijdens de pilotproef zijn de volgende tests uitgevoerd:

- een inundatieproef waarbij de gehele proeflocatie tijdens de luchtinjectie onder water met schuim is gezet, met als doel het uitreden van gas aan het maaiveld zichtbaar te maken;
- een tracertest waarbij het gas SF<sub>6</sub> is geïnjecteerd via de injectielucht en vervolgens is gemeten in het grondwater in de peilbuizen;
- een respiratieproef waarbij de zuurstofconcentraties frequent zijn gemeten nadat het systeem is stopgezet.

Uit de verschillende proeven is gebleken dat er geen sprake is van vorming van sterke voorkeurskanalen en dat de bodem volledig wordt geaëreerd. Aan het eind van de duurproef is gebleken dat de gehalten aan verontreinigingen significant zijn afgenomen. Door middel van modelmatige extrapolatie blijkt dat ter plaatse van het scherm alle aanwezige verontreinigingen na circa anderhalf jaar zijn verwijderd. Pas na anderhalf jaar kan het scherm dus goed werken.

De algemene conclusie is dat het mogelijk is om in een gelaagde en slecht doorlatende bodem een biologisch scherm te creëren met behulp van luchtinjectie. De aanwezigheid van veel verschillende laagjes blijkt geen belemmering te vormen voor een volledige aëratie van de bodem.

---

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

aëroob, biologische afbraak, gelaagdheid, in situ

**Vrije trefwoorden:**

modellen, pilotproef, persluchtinjectie

---

**Titel project**

In situ sanering van gelaagde  
en slecht doorlatende gronden

**Projectleiding**

Tauw bv  
(ing. A.H. Bonneur, 0570-699723)

---

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

**Report title**

In situ remediation of layered  
and poorly permeable soils

**CUR/NOBIS report number**

95-1-16

**Project report number**

95-1-16

---

**Author(s)**

A.H. Bonneur B.Sc.  
Ms. F.A. Hanneman M.Sc.  
Ms. A.T. Haselhoff B.Sc.  
T. van Hille M.Sc.  
M. Keizer M.Sc.  
A.M. Otten M.Sc.  
Ms. ir. L. Schelwald van der Kley M.Sc.  
W. Standhardt M.Sc.  
P.I.M. Vis M.Sc.  
Y.M.M. Veenis M.Sc.

**Number of pages**

**Report:** 52

**Appendices:** 145

---

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

Tauw bv (A.H. Bonneur B.Sc., 0570-699723)  
Ecotechniek Bodem bv (P.I.M. Vis M.Sc., 0346-557700)  
Public Works of Rotterdam (T. van Hille M.Sc., 010-4896194)  
Port of Rotterdam (Ms. L. Schelwald van der Kley M.Sc., 0320-218900)  
Groundwater Technology B.V. (Y.M.M. Veenis M.Sc., 015-2516372)  
Kuwait Petroleum Europoort B.V. (W. Standhardt M.Sc., 0181-251303)  
Wageningen Agricultural University (M. Keizer M.Sc., 0317-483302)

---

**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Abstract**

It is characteristic of the soil structure in most of the western part of the Netherlands that there is a Holocene covering layer down to depth of 10 to 25 m below ground level (-gl). This means that the uppermost part of the soil consists of alternately thin layers of clay, peat, and fine to moderately fine sand. On account of this composition, the soil may be characterized as layered and poorly permeable.

One particular section of the Kuwait Petroleum Europoort (KPE) site in the harbour area of Rotterdam is heavily contaminated by mono-aromatic components. These contaminants are spreading, within the soil layer in place from 6 to 15 m-gl, towards the surface water of the Caland canal. In view of the contaminant migration, KPE has decided to perform an investigation into remedial measures that may serve to prevent further contaminant spreading.

The key question to be investigated is whether or not it is possible to create a biological screen, using air injection, to prevent the further spreading of mono-aromatic contaminants in a layered soil of poor permeability.

The investigation will be based on the results of a pilot test performed in the field. Throughout the pilot testing, measurements were made of the following parameters in the groundwater monitoring filter:

- dissolved oxygen;
- aromatics;
- temperature.

While the pilot plant was in operation, the following tests were made:

- a flooding test. The entire testing area was first flooded and then submersed in foam. In this way, the gas exiting at the surface level became clearly visible;
- a tracer test. There was SF<sub>6</sub>-gas added to the injected air, following which measurements were made of the groundwater and in the observation wells;
- a respiration test. This consisted of frequent measurements of the oxygen concentration following the shut-down of the system.

It has appeared from the various test that the water did not show a clear tendency towards the formation of preferential flowpaths. By the end of the long-term test, the contaminant concentrations were found to have decreased significantly. According to model calculations, it will take approximately 1,5 years to remove the contamination present on the site.

The overall conclusion is that it is possible to create a biological screen, using air injection, in a layered and poorly permeable soil. The presence of many different thin layers was not found to be an obstacle to a full aeration of the soil.

---

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

aerobic, biological degradation, in situ, stratified

**Uncontrolled terms:**

air sparging, models, pilot plant

---

**Project title**

In situ remediation of layered  
and poorly permeable soils

**Projectmanagement**

Tauw bv (Mr. A.H. Bonneur B.Sc.  
+31-570-699723)

---

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

## VOORWOORD

De bodem in het westelijk deel van Nederland wordt op de meeste plaatsen gekenmerkt door de aanwezigheid van een Holocene deklaag met een dikte van 10 tot 25 m. Dit betekent dat het bovenste deel van de bodem is opgebouwd uit een afwisseling van laagjes klei, veen en fijn tot matig fijn zand. De bodem wordt daardoor gekenmerkt als gelaagd en slecht doorlatend.

In het westelijk deel van Nederland bevinden zich een aantal gebieden met intensieve industriële activiteit. Deze activiteit heeft op een groot aantal locaties geleid tot bodemverontreiniging. Vanwege het waarborgen van de continuïteit van bedrijfsactiviteiten op deze locaties dienen noodzakelijke saneringsmaatregelen meestal in situ te worden uitgevoerd. De specifieke eigenschappen van de bodem worden echter vaak als belemmering ervaren voor het toepassen van in situ saneringstechnieken. Er is daarom nog nauwelijks ervaring opgedaan met in situ sanering in bodems die zijn opgebouwd uit Holocene afzettingen.

In 1995 is een consortium gevormd uit partijen die samen wilden werken aan de ontwikkeling en de toepassing van saneringsmethoden voor gelaagde en slecht doorlatende bodems. Het consortium bestaat uit Tauw bv (penvoerder), Ecotechniek Bodem bv, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, Gemeentewerken Rotterdam, Groundwater Technology B.V., Kuwait Petroleum Europoort B.V. en Landbouwuniversiteit Wageningen. Eind 1995 is dit consortium begonnen met de uitvoering van het door de stichting NOBIS gesubsidieerde project.

november 1998

# INHOUD

		SAMENVATTING	ix
		SUMMARY	xii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Introductie en aanleiding	1
	1.2	Probleemdefinitie en doelstelling	1
	1.3	Beschrijving van de locatie	2
	1.4	Probleemaanpak	5
Hoofdstuk	2	FORMULERING EN SPECIFICATIE VAN DE ONDERZOEKS- VRAGEN	7
	2.1	Formulering van de onderzoeksvragen	7
	2.2	Vraag 1: Processen in de bodem	7
	2.3	Vraag 2: Opheffen van de zuurstoflimitatie	8
	2.4	Vraag 3: Afbraak van de aangevoerde verontreinigingen	9
	2.5	Vraag 4: Invloedsstraal van het injectiefilter	10
	2.6	Hoofdvraag: Kan een biologisch scherm worden gerealiseerd?	10
Hoofdstuk	3	ONTWERPASPECTEN VAN DE PILOTPLANT	11
	3.1	Algemeen	11
	3.2	Bodemopbouw	11
	3.3	Bodemprocessen	11
	3.4	Meetparameters	12
	3.5	Eisen aan de monitoringsfilters	12
	3.6	Configuratie van de meetpunten	13
	3.7	Veiligheid en technische uitvoerbaarheid	14
	3.8	Financiën	15
	3.9	Samenvatting van de ontwerpaspecten van de pilotplant	15
Hoofdstuk	4	UITVOERING VAN DE PILOTPROEF OP VELDSCHAAL	17
	4.1	Inleiding	17
	4.2	Verantwoording van de resultaten	17
	4.3	Vorbereidend onderzoek	17
	4.3.1	Doelstelling voorbereidend onderzoek	17
	4.3.2	Uitgevoerde werkzaamheden voorbereidend onderzoek	18
	4.3.3	Resultaten voorbereidend onderzoek	18
	4.3.4	Evaluatie van de uitgevoerde werkzaamheden voorbe- reidend onderzoek	19
	4.4	Detailontwerp en installatie van de pilotplant	20
	4.4.1	Doelstelling pilotplant	20
	4.4.2	Uitgevoerde werkzaamheden detailontwerp en installatie pilotplant	20
	4.4.3	Evaluatie van de uitgevoerde werkzaamheden	21
	4.5	Uitvoering van de veldproeven	21
	4.5.1	Algemeen	21
	4.5.2	Nulmeting	22
	4.5.3	Intensieve meetronde (2 weken)	24



	4.5.4	SF <sub>6</sub> -tracertest	27
	4.5.5	Lange experimenteerfase	29
	4.5.6	Duurproef	31
	4.5.7	Inundatieproef	34
	4.5.8	Respiratieproef	35
	4.5.9	Samenvatting veldproeven pilotplant	35
	4.6	Conclusies van de pilotproef	36
	4.6.1	Invloedsstraal	36
	4.6.2	Vorbereidend onderzoek	36
	4.6.3	Installeren pilotplant	37
	4.6.4	Nulmeting	37
	4.6.5	Uitvoering pilotplant	38
Hoofdstuk	5	MODELMATIGE BESCHRIJVING VAN DE PILOTPLANT	39
	5.1	Inleiding	39
	5.2	Doelstelling	39
	5.3	Aanpak	39
	5.4	Resultaten	40
Hoofdstuk	6	METHODIEK VOOR HET ONTWERPEN VAN EEN BIOLOGISCH SCHERM OP BASIS VAN LUCHTINJECTIE	43
	6.1	Inleiding	43
	6.2	Stap 1: Vertaling van doelstelling naar ontwerpcriteria	43
	6.3	Stap 2: Maken van voorlopig ontwerp van het systeem	43
	6.4	Stap 3: Keus of er onderzoek wordt uitgevoerd	44
	6.5	Stap 4: Vorbereidend onderzoek	45
	6.6	Stap 5: Installeren van de pilotplant	45
	6.7	Stap 6: Uitvoeren van de pilotplant	47
	6.8	Stap 7: Ontwerp van het full-scale systeem	48
Hoofdstuk	7	EINDCONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	51
Bijlage	A	SITUERING VAN DE LOCATIE BINNEN HET BOTLEKGEBIED	
Bijlage	B	SITUERING VAN DE MONITORINGSFILTERS	
Bijlage	C	OVERZICHT VAN DE VERONTREINIGINGSSITUATIE VAN DE CONCENTRATIE AROMATEN IN HET GRONDWATER IN L3 TEGEN DE TIJD	
Bijlage	D	VOORBEREIDEND ONDERZOEK	
Bijlage	E	TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN DE PILOTPLANT	
	E1	Indeling van de persluchtinjectiecontainer en flowschema	
	E2	As built tekening van de oude situatie	
	E3	Boorstaten van de nieuwe filters	
	E4	Schematische situatietekening	
	E5	As built tekeningen van de nieuwe situatie	
Bijlage	F	OVERZICHT VAN DE WERKWIJZEN BIJ MONSTERNAME	
Bijlage	G	NULONDERZOEK	

Bijlage	H	INTENSIEVE MEETRONDE
Bijlage	I	SF <sub>6</sub> -PROEVEN
Bijlage	J	DUURPROEF
Bijlage	K	INUNDATIEPROEF
Bijlage	L	RESPIRATIEPROEF
Bijlage	M	MODELLERINGSRAPPORT
Bijlage	N	STATISTISCHE ONDERBOUWING VAN DE METINGEN TEN BEHOEVE VAN DE KANAALSTROMING

## SAMENVATTING

### **In situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende gronden**

#### *Achtergrond en doelstelling*

De bodem in het westelijk deel van Nederland wordt op de meeste plaatsen gekenmerkt door de aanwezigheid van een Holocene deklaag met een dikte van 10 tot 25 m. Dit betekent dat het bovenste deel van de bodem is opgebouwd uit een afwisseling van laagjes klei, veen en fijn tot matig fijn zand. De bodem wordt daardoor gekenschetst als gelaagd en slecht doorlatend.

In het westelijk deel van Nederland zijn er diverse regio's met intensieve industriële activiteit. Deze activiteit heeft op een groot aantal locaties geleid tot bodemverontreiniging. Vanwege het waarborgen van de continuïteit van de bedrijfsactiviteiten op deze locaties dienen noodzakelijke saneringsmaatregelen meestal in situ te worden uitgevoerd. De specifieke eigenschappen van de bodem worden echter als belemmering ervaren voor het toepassen van in situ saneringstechnieken. Er is daarom nog nauwelijks ervaring opgedaan met in situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende bodems.

Een deel van het terrein van het bedrijfsterrein van Kuwait Petroleum Europoort (KPE) in het Rotterdamse havengebied is ernstig verontreinigd met mono-aromatische verontreinigingen. Deze verontreinigingen verspreiden zich in de bodemlaag op een diepte van 6 tot 15 m-mv naar het oppervlaktewater van het Caland kanaal. Deze verspreiding vormt voor KPE de aanleiding om te onderzoeken op welke wijze saneringsmaatregelen kunnen worden getroffen waarmee de verspreiding kan worden tegengegaan.

Een geschikte saneringsaanpak voor deze locatie bestaat uit het creëren van een biologisch scherm aan de rand van het terrein waarmee afstroming van verontreinigingen naar het Caland kanaal wordt voorkomen. Er is gekozen voor luchtinjectie als saneringstechniek om het biologisch scherm mee te realiseren.

Het hoofddoel van dit project is daarom het implementeren van luchtinjectie als in situ saneringstechniek op een industrieterrein in het Rotterdamse havengebied, waar de bodem is opgebouwd uit een afwisseling van zand- en kleilaagjes met verschillende doorlatendheden.

#### *Onderzoeksvragen*

De belangrijkste onderzoeksvraag van het project is de vraag of het mogelijk is om in een gelaagde en slecht doorlatende bodem met behulp van luchtinjectie een biologisch scherm te creëren waarmee verspreiding van mono-aromatische verontreinigingen kan worden tegengegaan.

Deze onderzoeksvraag is door middel van 4 vragen gespecificeerd:

- Welke processen treden op in deze bodem als gevolg van luchtinjectie en op welke wijze leidt luchtinjectie tot verhoogde zuurstofconcentraties in het grondwater?
- Is het mogelijk om in deze bodem de zuurstoflimitatie voor aërobe afbraak van mono-aromatische verontreinigingen op te heffen met behulp van luchtinjectie?
- Is de biologische afbraak als gevolg van luchtinjectie voldoende om alle verontreinigingen die met het grondwater worden aangevoerd af te breken, zodat een biologisch scherm kan worden gecreëerd?
- Hoe groot is de straal rondom een luchtinjectiefilter waarbinnen de luchtinjectie leidt tot voldoende biologische afbraak?

### *Uitvoering van het onderzoek*

De basis van het onderzoek wordt gevormd door de uitvoering van een pilotproef op veldschaal. Ten behoeve van deze pilotproef is het volgende systeem geïnstalleerd:

- 3 luchtinjectiefilters op verschillende diepten tussen 6 en 15 m-mv;
- een luchtinjectiesysteem bestaande uit een compressor en een drukvat;
- 30 monitoringsfilters die in 2 fasen zijn geplaatst.

Zowel de luchtinjectiefilters als de monitoringsfilters zijn zodanig geplaatst dat de kans op voorkeursstroming is geminimaliseerd. Dit betekent dat zowel de filters als de boorgaten luchtdicht zijn afgesloten.

De pilotproef is in 3 fasen uitgevoerd:

- een intensieve beginperiode om het technisch functioneren van het systeem te onderzoeken;
- een lange experimenteerfase om bij verschillende injectiedebieten vast te stellen waar luchtinjectie een meetbaar effect heeft. Dit wordt de technische invloedsstraal genoemd;
- een duurproef om bij een bepaald debiet vast te stellen binnen welke straal luchtinjectie leidt tot biologische afbraak van verontreinigingen. Dit wordt de effectieve invloedsstraal genoemd.

Tijdens de gehele pilotproef zijn de onderstaande metingen uitgevoerd in het grondwater in de monitoringsfilters:

- opgelost zuurstof;
- aromaten;
- temperatuur.

Tijdens de pilotproef zijn de volgende tests uitgevoerd:

- een inundatieproef waarbij de gehele proeflocatie tijdens de luchtinjectie onder water met schuim is gezet. Het uittreden van gas aan het maaiveld is op deze wijze duidelijk zichtbaar gemaakt;
- een tracetest waarbij het gas SF<sub>6</sub> is geïnjecteerd via de injectielucht en vervolgens is gemeten in het grondwater in de peilbuizen;
- een respiratieproef waarbij de zuurstofconcentraties frequent zijn gemeten nadat het systeem is stopgezet.

### *Resultaten van de pilotproef*

Tijdens de proef is gebleken dat er bij een debiet van meer dan 7,5 l/s lucht uittreedt in het Caland kanaal. Aangezien dit als ongewenst wordt beschouwd, is 7,5 l/s het maximumdebiet.

Uit de verschillende proeven is gebleken dat er geen sprake is van vorming van sterke voorkeurskanalen. De lucht verspreidt zich door de bodem in een dicht netwerk van fijne kanaaltjes. Er wordt daarom geconcludeerd dat de bodem voor een groot deel wordt geaëreerd.

Monitoringsfilters binnen een straal van 1 à 2 m van de injectiefilters gaven binnen enkele dagen na de start van de luchtinjectie een stijging van de zuurstofconcentraties te zien. In een groot deel van de monitoringsfilters op grotere afstand van de injectiefilters begonnen de zuurstofconcentraties tijdens de duurproef te stijgen. Van monitoringsfilters met zuurstofconcentraties aan het eind van de duurproef groter dan 2 mg/l wordt gesteld dat zij binnen de effectieve invloedsstraal vallen.

Aan het eind van de duurproef is gebleken dat de gehalten aan verontreinigingen significant zijn afgenomen. De duurproef heeft 5 maanden geduurd en dat is te kort om alle aanwezige veront-

reinigingen te verwijderen. Door middel van modelmatige extrapolatie blijkt dat ter plaatse van het scherm alle aanwezige verontreinigingen na circa anderhalf jaar zijn verwijderd. Pas na anderhalf jaar kan het scherm dus goed werken.

Er is geconcludeerd dat luchtinjectie het meest effectief wordt toegepast als uitsluitend in het onderste deel van de verontreinigde laag wordt geïnjecteerd. Aanvullende injectie in het midden en aan de bovenkant van de verontreinigde laag leidt niet tot betere aëratie of grotere invloedsstralen. Bij deze diepe injectie zijn effectieve invloedsstralen gevonden die variëren tussen 3 en 6 m aan de onderkant van de verontreinigde laag en 6 tot 20 m in het bovenste deel van de verontreinigde laag.

### *Conclusie*

De algemene conclusie is dat het mogelijk is om in een gelaagde en slecht doorlatende bodem een biologisch scherm te creëren met behulp van luchtinjectie. De aanwezigheid van veel verschillende laagjes blijkt geen belemmering te vormen voor een volledige aëratie van de bodem.

## SUMMARY

### **In situ remediation of layered and poorly permeable soils**

#### *Background and objectives*

It is characteristic of the soil structure in most of the western part of the Netherlands that there is a Holocene covering layer down to a depth of 10 to 25 m below ground level (-gl). This means that the uppermost part of the soil consists of alternately thin layers of clay, peat and fine to moderately fine sand. On account of this composition, the soil may be characterized as layered and poorly permeable.

The western part of the Netherlands counts various regions that are intensively used for industrial purposes. As a result of this industrial use, very many of these sites have had their soil contaminated over the years. To safeguard the continuity of business operations, the remedial measures required on such sites mostly need to be taken in situ. An effective use of in situ techniques, however, is often believed to be hampered by the nature of the soil in place. For this reason there has hardly any experience been gathered so far with the use of such methods in layered and poorly permeable soil.

One particular section of the Kuwait Petroleum Europoort (KPE) site in the harbour area of Rotterdam is heavily contaminated by mono-aromatic components. These contaminants are spreading, within the soil layer in place from 6 to 15 m-gl, towards the surface water of the Caland canal. In view of the contaminant migration, KPE has decided to perform an investigation into remedial measures that may serve to prevent further contaminant spreading.

It may be an adequate remedial approach for this site to create a biological screen at the site border. Such a screen prevents the influx of contaminants into the Caland canal. It was decided to use air injection to implement the biological screen.

Accordingly, the primary objective of this project is to implement air injection as an in situ remediation technique on an industrial site in the harbour area of Rotterdam, the soil of which consists of alternate sand and clay layers of a varying permeability.

#### *Matters under investigation*

The key question to be investigated is whether or not it is possible to create a biological screen, using air injection, to prevent the further spreading of mono-aromatic contaminants in a layered soil of poor permeability.

More specifically, the questions to be answered are the following:

- Which processes occur in this type of soil as a result of the injection of air, and how exactly does the injection of air lead to elevated oxygen concentrations in the groundwater?
- Is the use of air injection in this type of soil an adequate means of eliminating the restraining effect of the oxygen on the aerobic degradation of mono-aromatic contaminants?
- Is the biological degradation resulting from the injection of air sufficient to remove the entire groundwater-borne contaminant influx and to create an effective biological screen?
- Within what radius of the air injection filters is the degree of biological degradation attained sufficient?

### *Performance of the investigation*

The investigation will be based on the results of a pilot test performed in the field. The system installed for the purpose of this testing consists of:

- 3 air injection filters installed in a depth range from 6 and 15 m-gl;
- 1 air injection system consisting of 1 compressor and 1 pressure vessel;
- 30 monitoring filters placed in 2 phases.

Both the air injection filters and the monitoring filters were installed in such a way as to minimize the risk of the air forming preferential flowpaths along the filters. To prevent this, both the filters and the drilling holes were hermetically sealed.

The pilot test has been performed in three phases:

- an intensive start-up period in which the system's technical functioning was investigated;
- a long experimental phase in which the occurrence of measurable effects of the air injection was investigated at differing injection flow rates. The area in which such effects occur is referred to as technical radius of influence;
- a long-term test aimed at determining the radius in which the air injection, at a certain flow rate, actually results in the biological degradation of contaminants. This area is referred to as effective radius of influence.

Throughout the pilot testing, measurements were made of the following parameters in the groundwater monitoring filters:

- dissolved oxygen;
- aromatics;
- temperature.

While the pilot plant was in operation, the following tests were made:

- A flooding test. The entire testing area was first flooded and then submersed in foam. In this way, the gas exiting at the surface level became clearly visible.
- A tracing test. There was SF<sub>6</sub>-gas added to the injected air, following which measurements were made of the groundwater and in the observation wells.
- A respiration test. This consisted of frequent measurements of the oxygen concentration following the shut-down of the system.

### *Pilot test results*

The pilot test has shown that flow rates exceeding 7.5 l/s result in the exit of air in the Caland canal. Given the fact that this is not desirable, 7.5 l/s must be regarded as maximum flow rate.

It has appeared from the various tests that the water did not show a clear tendency towards the formation of preferred flows. The air dispersed through a dense network of small minuscule canals. It may therefore be concluded that large parts of the soil were aerated.

Within a few days after the start-up of the air injection, the monitoring filters within a radius of 1 to 2 m from the injection filters showed an increase in oxygen concentrations. In a large part of the monitoring filters at greater distances from the injection filters, the oxygen concentrations were found to increase during the long-lasting test. It is assumed that monitoring filters with an oxygen concentration of > 2 mg/l are within the effective radius of influence.

By the end of the long-term test, the contaminant concentrations were found to have decreased significantly. The long-term test went on for 5 months, which is too short a period to eliminate all the

contaminants. A model was used to extrapolate the data obtained from pilot testing. According to these calculations, it will take approximately 1,5 years to remove the contamination present on site.

It has been concluded that injection into the lowermost part of the contaminated layer is most effective. The radius of influence of this type of deep injection was found to vary from 3 to 6 m at the lower end of the contaminated layer, and from 6 to 20 m in the upper part of the contaminated layer.

#### *Conclusion*

The overall conclusion is that it is possible to create a biological screen, using air injection, in a layered and poorly permeable soil. The presence of many different thin layers was not found to be an obstacle to a full aeration of the soil.



## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Introductie en aanleiding

Dit is het eindrapport van het NOBIS-project 'In situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende bodems'. Het hoofddoel van dit project is het implementeren van luchtinjectie als in situ saneringstechniek op een industrieterrein in het Rotterdamse havengebied, waar de bodem is opgebouwd uit een afwisseling van zand- en kleilaagjes met verschillende doorlatendheden.

Een deel van het terrein van het bedrijfsterrein van Kuwait Petroleum Europoort (KPE) is ernstig verontreinigd met mono-aromatische verontreinigingen. Deze verontreinigingen verspreiden zich naar het oppervlaktewater van het Caland kanaal. Deze verspreiding vormt voor KPE de aanleiding om te onderzoeken op welke wijze saneringsmaatregelen kunnen worden getroffen waarmee de verspreiding kan worden tegengegaan.

Een geschikte saneringsaanpak voor deze locatie bestaat uit het creëren van een biologisch scherm aan de rand van het terrein waarmee afstroming van verontreinigingen naar het Caland kanaal wordt voorkomen. Er is gekozen voor het injecteren van lucht als saneringstechniek om het biologisch scherm mee te realiseren. Het project heeft zich dus voornamelijk gericht op het in de praktijk toepassen en testen van luchtinjectie.

In dit rapport komen achtereenvolgens de volgende zaken aan de orde:

- een algemene introductie in de probleemstelling en de onderzoekslocatie;
- een verslag van de proeven die zijn uitgevoerd om de gekozen saneringsaanpak te testen;
- een interpretatie en evaluatie van de resultaten van de proeven;
- een vertaling van resultaten van de proeven naar een werkwijze die op andere locaties kan worden toegepast.

#### 1.2 Probleemdefinitie en doelstelling

De bodem van veel bedrijfsterreinen in het westelijk deel van Nederland is opgebouwd uit een (oorspronkelijke) deklaag met daarop een aangebrachte ophooglaag. De deklaag is sterk gelaagd en bestaat uit klei, veen en zand in laagjes met dikten variërend van centimeters tot enkele decimeters of meters.

De sterke gelaagdheid van afwisselend goed, matig en slecht doorlatende grondsoorten geeft bij bodemsanering een aantal complicaties. Het grondwater doorstroomt met name de goed doorlatende zandlaagjes. Verspreiding van verontreinigingen treedt daarom met name op in deze laagjes. Vanwege de grotere doorlatendheid zijn de zandlaagjes relatief eenvoudig te saneren. Een deel van de verontreiniging bevindt zich echter in de minder goed doorlatende lagen. Nalevering uit deze klei en veenlagen vindt dan ook langdurig plaats. Dit leidt continu tot herverontreiniging en verspreiding van verontreiniging via de zandlaagjes. Sanering van de minder goed doorlatende laagjes levert zowel technisch als financieel de grootste problemen op.

De oplossing, die in de huidige praktijk vaak wordt voorgesteld, is het uitvoeren van een grondwateronttrekking waarmee uitsluitend verspreiding van verontreinigingen via de beter doorlatende laagjes wordt voorkomen. Bedrijven komen echter slechts zelden tot uitvoering van deze maatregelen.

Als belangrijkste reden hiervoor wordt vaak aangevoerd dat een grondwateronttrekking bij deze bodemopbouw leidt tot een onacceptabele zetting van de ondergrond. Daarnaast brengen het installeren en het instandhouden van een grondwateronttrekking en bijbehorende waterzuivering vaak te hoge kosten met zich mee zonder dat het probleem werkelijk wordt verminderd. Bedrijven zijn daarom op zoek naar alternatieve oplossingen.

Kuwait Petroleum Europoort heeft een deel van haar bedrijfsterrein ter beschikking gesteld waar een kansrijke saneringsmethode op praktijkschaal kon worden getest.

Er is gekozen voor de toepassing van luchtinjectie als saneringstechniek om een biologisch scherm te creëren waarmee verspreiding van verontreinigingen kan worden voorkomen. Het project heeft zich daarom toegespitst op de toepassing van persluchtinjectie in slecht doorlatende en gelaagde bodems.

De hoofddoelstelling van het project is daarom het toepassen van luchtinjectie in een sterk gelaagde bodem. Dit betreft zowel technische, veiligheids-, als milieuhygiënische aspecten.

De belangrijkste onderzoeksvragen voor het project zijn:

- Welke processen treden op in deze bodem als gevolg van luchtinjectie en op welke wijze leidt luchtinjectie tot verhoogde zuurstofconcentraties in het grondwater?
- Is het mogelijk om in deze bodem de zuurstoflimitatie voor aërobe afbraak van mono-aromatische verontreinigingen op te heffen met behulp van luchtinjectie?
- Is de biologische afbraak als gevolg van luchtinjectie voldoende om alle verontreinigingen die met het grondwater worden aangevoerd af te breken, zodat een biologisch scherm kan worden gecreëerd?
- Hoe groot is de straal rondom een luchtinjectiefilter waarbinnen de luchtinjectie leidt tot voldoende biologische afbraak?

### 1.3 Beschrijving van de locatie

#### *Ligging van de locatie*

In bijlage A is de locatie binnen het Botlekgebied nader gesitueerd. Een overzicht van de onderzoekslocatie is tevens weergegeven in bijlage A. De locatie wordt aan de noordzijde begrensd door het Caland kanaal.

#### *Bodemopbouw*

Op het KPE-terrein is sprake van een bodemopbouw waarbij de Holocene deklaag, bestaande uit klei, veen en gelaagde wadzandafzettingen, wordt afgedekt door een (antropogene) ophooglaag. Deze bodemopbouw is karakteristiek voor grote delen van west Nederland: een sterk gelaagde bodem met grote verschillen in samenstelling en doorlatendheid. In figuur 1 is ter illustratie van de bodemopbouw op de locatie een foto van de bodemopbouw van -4 tot -14 m+NAP weergegeven. Op basis van deze foto, grondboringen die over het gehele oppervlakte van het terrein zijn genomen, sonderingen, 4 Ackermann-boringen en RGD-gegevens is een schematische laagindeling van de bodem gemaakt. Deze is weergegeven in figuur 2. De bodemlagen zijn genummerd van L1 t/m L6. Binnen de te onderscheiden bodemlagen wordt nog een interne gelaagdheid aangetroffen.

De foto in figuur 1 geeft een beeld van de bodem tussen -4 m+NAP en -13 m+NAP. De continu aanwezige scheidende laag L4 is te zien op een diepte van circa -12 m+NAP. Het traject tussen -4 en -11m+NAP vormt een groot deel van laag L3.

Fig. 1. Bodemopbouw van -4 tot -14 m+NAP.

### *Geohydrologie*

De lagen L1, L3, L5 en L7 worden aangemerkt als watervoerende lagen, de overige lagen als scheidende lagen.

In de ophooglaag (laag L1) is de grondwaterstand sterk afhankelijk van het neerslagoverschot. De freatische grondwaterstand nabij het Caland kanaal is gemiddeld 2,5 m+NAP (2 m-mv). In het algemeen stroomt freatisch grondwater af richting het oppervlaktewater.

In het Wadzandpakket (laag L3) bedraagt de stijghoogte gemiddeld 0,5 à 1,0 m+NAP. In laag L3 is de horizontale grondwaterstroming grotendeels noordoostelijk gericht, richting het Caland kanaal. De snelheid van de horizontale grondwaterstroming wordt geschat tussen 0,1 en 10 m/jaar.

De verticale grondwaterstroming toont infiltratie vanuit ondiepe lagen naar de diepere.

Vanwege de ligging van de locatie ten opzichte van de zee is er in het oppervlaktewater ter hoogte van de onderzoekslocatie sprake van getijde-invloeden. De stijghoogten van het grondwater in alle lagen, behalve laag L1, vertonen dezelfde fluctuatie als het getij.

### *Verontreinigingssituatie*

Zowel de grond als het grondwater zijn verontreinigd met mono-aromatische koolwaterstoffen. Het betreft met name benzeen, toluen, ethylbenzeen en styreen. Benzeen en ethylbenzeen zijn in veel hogere concentraties aanwezig dan toluen en styreen. Van de aangetroffen stoffen is bekend dat ze zich over de bodem verdelen in de waterfase, gasfase, vaste fase en organische vloeistoffase. Daarnaast is bekend dat ze redelijk oplosbaar, zeer vluchtig en toxisch zijn. In het grondwater ter plaatse van de proeflocatie zijn deze stoffen aanwezig in opgeloste vorm en als organische vloeistof.

De ophooglaag bevat weinig tot geen verontreinigingen.

Het merendeel van de verontreiniging bevindt zich in laag L3. In laag L3 is puur product in de vorm van een drijfslag aangetroffen. Deze laag drukt tegen de onderkant van laag L2 aan en heeft zich verspreid over een afstand van 300 m tot aan het Caland kanaal. Het is niet duidelijk of de drijfslag zich heeft verplaatst onder invloed van de grondwaterstroming of dat de verspreiding het gevolg is geweest van het wegdrukken van product onder invloed van de zwaartekracht.

De omvang van de totale verontreinigingsvlek in laag L3 is globaal bekend. Vanwege het grofmazige meetnet kunnen lokaal afwijkingen van het algemene beeld voorkomen. Hetzelfde geldt voor de omvang van de aangetroffen drijfslagen. Ter plaatse van de pilotplant blijkt de drijfslag overal aanwezig te zijn.

Laag L3 is in 3 sublagen onderverdeeld:

- L3 boven of ondiep (-1 tot -4 m+NAP, 6 tot 9 m-mv);
- L3 midden of middeldiep (-4 tot -7,5 m+NAP, 9 tot 12,5 m-mv);
- L3 onder of diep (-7,5 tot -11 m+NAP, 12,5 tot 16 m-mv).

Voor de indeling in sublagen zijn twee criteria gebruikt:

- de dikte van een sublaag mag niet kleiner zijn dan 2 m in verband met de lengte van de filters die worden gebruikt voor luchtinjectie en monitoring;
- de sublagen worden van elkaar gescheiden door een weerstandbiedende laag.

De concentraties aan verontreinigingen liggen in laag L3 boven tussen 300.000 en 100.000 µg/l. In laag L3 midden en laag L3 onder liggen de concentraties tussen 100.000 en 10.000 µg/l. De totale vracht aan verontreinigingen die aanwezig is, wordt bepaald door:

- verontreinigingen die zijn opgelost in het grondwater;
- verontreinigingen die zijn geabsorbeerd aan de grond;
- verontreinigingen die voorkomen in pure vorm.

De dikte van de drijflaag is onbekend. Gezien het feit dat de drijflaag zich in de verzadigde zone bevindt, is er niets bekend over de relatie tussen de dikte van de drijflaag in de peilbuis en de werkelijke dikte van de drijflaag in de bodem. Er is dus niet bekend wat de hoeveelheid puur product is. Aangezien dit een groot deel vormt van de totale vracht aan verontreinigingen, is deze ook niet bekend.

Een schematisch overzicht van de verontreinigingssituatie in het grondwater is weergegeven in figuur 2. In bijlage C zijn de concentraties in het grondwater bij aanvang van de pilotplant gegeven.

Fig. 2. Schematisering bodemopbouw en verontreinigingssituatie aromaten.

#### 1.4 **Probleemaanpak**

Centraal in het onderzoek staat de uitvoering van een pilotplant waarin luchtinjectie op praktijk-schaal wordt toegepast.

Het project is gefaseerd uitgevoerd. De volgende fasen kunnen worden onderscheiden:

- Bepaling van de opzet voor de pilotproef.
- Voorbereidend onderzoek voor de pilotproef.
- Uitvoering van de pilotproef.
- Modelmatige beschrijving van de pilotproef.
- Beschrijving en interpretatie van de resultaten van de pilotproef.
- Vertaling van de resultaten naar algemeen toepasbare kennis.

## FORMULERING EN SPECIFICATIE VAN DE ONDERZOEKSVRAGEN

### 2.1 Formulering van de onderzoeksvragen

De belangrijkste onderzoeksvraag van het project is de volgende:

- Kan luchtinjectie worden toegepast in een slecht doorlatende en gelaagde bodem om een biologisch scherm te creëren waarmee verspreiding van verontreinigingen kan worden voorkomen?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, is de vraag opgedeeld in de onderstaande afzonderlijke onderzoeksvragen:

1. Welke processen treden op in zo'n bodem als gevolg van luchtinjectie en op welke wijze leidt luchtinjectie tot verhoogde zuurstofconcentraties in het grondwater?
2. Is het mogelijk om in deze bodem de zuurstoflimitatie voor aërobe afbraak van mono-aromatische verontreinigingen op te heffen met behulp van luchtinjectie?
3. Is de biologische afbraak als gevolg van luchtinjectie voldoende om alle verontreinigingen die aanwezig zijn en de verontreinigingen die met het grondwater worden aangevoerd af te breken, zodat een biologisch scherm kan worden gecreëerd?
4. Hoe groot is de invloedsstraal rondom een luchtinjectiefilter waarbinnen de luchtinjectie leidt tot biologische afbraak?

Als de invloedsstraal rondom een filter bekend is, kan een full-scale biologisch scherm worden ontworpen.

In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op de afzonderlijke onderzoeksvragen.

### 2.2 Vraag 1: Processen in de bodem

De effectiviteit van luchtinjectie als saneringsmaatregel wordt bepaald door de volgende processen:

- P1 Op welke plaatsen stroomt de geïnjecteerde lucht door de grond?
- P2 Hoe verloopt de overdracht van zuurstof vanuit de voorkeursstroombanen naar het grondwater in de bodem?
- P3 Hoe verloopt het transport en de verspreiding van opgeloste zuurstof door de bodem?
- P4 Hoe verloopt het transport van verontreinigingen in het grondwater naar de aërobe zone?
- P5 Welk deel van de verontreinigingen wordt verwijderd door middel van strippen?

Over het algemeen wordt het optreden van voorkeursstroombanen (P1) als grootste knelpunt ervaren bij de toepassing van luchtinjectie. Indien er tijdens de luchtinjectie een gering aantal voorkeursstroombanen ontstaat, wordt slechts een klein deel van de bodem geaëreerd. Luchtinjectie is dan geen effectieve saneringstechniek. De angst voor het optreden van voorkeursstroombanen is één van de belangrijkste redenen voor het feit dat luchtinjectie tot op heden in Nederland nog niet of nauwelijks is toegepast in gelaagde en slecht doorlatende gronden.

De overdracht van zuurstof vanuit de lucht naar het grondwater wordt bepaald door uitwisselingsprocessen tussen de gasfase en de opgeloste fase en transportprocessen vanaf de gas-water interface. Over deze processen is genoeg kennis beschikbaar, maar voor de praktische toepasbaarheid ontbreken gegevens betreffende de grootte van het contactoppervlak. Er

wordt echter van uitgegaan dat dit proces niet beperkend zal zijn bij het verhogen van de zuurstofconcentraties in het grondwater. Bovendien is dit proces fysisch bepaald en niet te beïnvloeden. Er worden daarom in dit project geen specifieke metingen naar gedaan.

Zowel het transport van zuurstof als het transport van verontreinigingen (P3 en P4) hangen af van de grondwaterstroming en zijn dus locatie-specifiek. De snelheid van de grondwaterstroming varieert sterk per bodemlaag en bedraagt maximaal 10 m/jaar. De tijdsduur van de langste proefperiode is 5 maanden en dat wordt niet voldoende geacht om tijdens de pilotproef metingen te doen naar het effect van de grondwaterstroming. In het kader van dit project wordt het effect van de verspreiding via de grondwaterstroming meegenomen door middel van de modellering.

In dit geval is rekening gehouden met de nalevering van verontreinigingen die lokaal aanwezig zijn binnen het bodemsysteem.

Als persluchtinjectie wordt toegepast, worden vluchtige verontreinigingen gestript. Hierbij wordt vaak een significant deel van de verontreiniging gestript. In dit geval is puur product aanwezig. Het is dus waarschijnlijk dat de geïnjecteerde lucht die de bodem verlaat hoge concentraties verontreinigingen bevat. Om hier een indruk van te krijgen zijn tijdens de injectieproef metingen gedaan van de bodemlucht in de onverzadigde zone.

Samengevat kan het optreden van voorkeursstroombanen als belangrijkste onzekerheid bij het toepassen van luchtinjectie in de onderhavige situatie worden genoemd. De werkelijkheid zal zich bevinden tussen de volgende twee uitersten:

- er ontstaat een beperkt aantal voorkeurskanalen waardoor het grootste deel van de geïnjecteerde lucht ontsnapt. Hierdoor zal de zuurstof slechts een beperkt deel van de bodem bereiken;
- er ontstaat een dicht netwerk van fijne kanaaltjes waardoor de lucht zich een weg naar boven zoekt. Hierdoor zal een groot deel van de bodem van zuurstof worden voorzien.

In bijlage N wordt nader ingegaan op het ontstaan van voorkeurskanalen en de wijze waarop daarmee wordt omgegaan tijdens de pilotproef.

In figuur 3 zijn 4 processen geïllustreerd.

### 2.3 **Vraag 2: Opheffen van de zuurstoflimitatie**

Om de mono-aromatische verontreinigingen af te breken dient er een minimale hoeveelheid zuurstof in het grondwater aanwezig te zijn. In het CUR/NOBIS-rapport 95-1-13 'Biosparging and Bioventing, Expert Support System' (verschenen in oktober 1996) staat aangegeven dat aërobe biologische afbraak begint bij zuurstofconcentraties die hoger zijn dan 2 à 3 mg/l. Dus boven deze concentratie is de zuurstoflimitatie opgeheven.

Als er in het grondwater lagere zuurstofconcentraties worden gemeten wil dat *niet* zeggen dat er geen biologische afbraak optreedt. Het kan goed zijn dat alle beschikbare zuurstof direct wordt verbruikt. Zuurstof is in dat geval wel beperkend.



Fig. 3. Processen in de bodem.

#### 2.4 **Vraag 3: Afbraak van de aangevoerde verontreinigingen**

De hoeveelheid verontreinigingen, die in het biologisch scherm moet worden afgebroken, wordt bepaald door de snelheid van de grondwaterstroming en de vracht aan verontreinigingen die met het grondwater wordt meegevoerd. Of de aangevoerde verontreinigingen in het biologisch scherm kunnen worden afgebroken hangt af van de daarvoor benodigde hoeveelheid beschikbare zuurstof.

Deze vraag wordt beantwoord op basis van de gemeten zuurstofconcentraties en een berekening van de aangevoerde vracht aan verontreinigingen.

Tijdens de beginfase van het biologisch scherm dient rekening te worden gehouden met de verontreinigingen die al aanwezig zijn in de bodem ter plaatse van het biologisch scherm. Pas als deze verontreinigingen geheel zijn verwijderd, kan er sprake zijn van een scherm waarin alleen de aangevoerde verontreinigingen worden afgebroken.

## 2.5 **Vraag 4: Invloedsstraal van het injectiefilter**

Om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn twee definities opgesteld:

1. *De Technische Invloedsstraal* (Technical Radius of Influence TROI) is het gebied waarbinnen enig effect meetbaar is dat veroorzaakt wordt door het in bedrijf hebben van het saneringssysteem. Dit kan in het kader van dit project worden gedefinieerd als het gebied waar de stoffen terechtkomen die via de geïnjecteerde lucht in de bodem worden gebracht.
2. *De Effectieve Invloedsstraal* (Effective Radius of Influence EROI) is het gebied waarbinnen het op een bepaalde wijze in bedrijf hebben van het saneringssysteem een gewenst saneringseffect binnen een bepaalde tijdsduur bewerkstelligt. Dit kan ook worden gedefinieerd als het gebied waarbinnen de luchtinjectie leidt tot zodanig hoge zuurstofconcentraties in het grondwater dat er biologische afbraak optreedt binnen de gewenste termijn.

Bij luchtinjectie wordt het verschil tussen de TROI en EROI veroorzaakt door het verbruik van zuurstof voor afbraak van verontreinigingen. Hierdoor kan de EROI aanzienlijk kleiner zijn dan de TROI.

De 'TROI' kan in kortdurende veldproeven worden gemeten en wordt grotendeels bepaald door bodemtechnische eigenschappen.

De 'EROI' wordt bepaald door de verontreinigingssituatie en de termijn waarop wordt gekeken. De 'EROI' kan niet zonder meer worden gemeten in kortdurende veldproeven. Deze wordt op basis van modelberekeningen en ervaringsgegevens geschat, dan wel in een langdurend proefproject vastgesteld.

Voor een gelaagde en slecht doorlatende bodem ontbreken momenteel de grondslagen om de gemeten TROI modelmatig om te zetten in een EROI. In dit project is daarom gekozen voor het vaststellen van de TROI op basis van kortdurende metingen gevolgd door een langdurige proefperiode. Het was op voorhand niet vast te stellen of de duur van de lange proefperiode toereikend zou zijn om de EROI vast te stellen. Tegelijkertijd is onderzocht in hoeverre bestaande modellen een bijdrage kunnen leveren in het vaststellen van de EROI op basis van de TROI en de gegevens betreffende de verontreinigingssituatie.

## 2.6 **Hoofdvraag: Kan een biologisch scherm worden gerealiseerd?**

Als de effectieve invloedsstraal rondom een filter bekend is, kan een full-scale biologisch scherm worden ontworpen. In principe worden de filters van het full-scale systeem zodanig geplaatst dat de maximale onderlinge afstand tussen de filters gelijk is aan *twee keer de invloedsstraal*. In de praktijk zal echter vaak een kleinere onderlinge afstand worden gehanteerd. In verband met de bedrijfszekerheid kan het bijvoorbeeld wenselijk zijn om een overlap tussen de invloedsstralen van verschillende filters te realiseren.

De invloedsstraal is afhankelijk van de diepte. Bij toenemende diepte neemt de invloedsstraal in eerste instantie toe, blijft dan over een traject constant en neemt vervolgens weer af (zie CUR/NOBIS-rapport 95-1-13 'Biosparing and Bioventing, Expert Support System', verschenen in oktober 1996). Hier dient dus zowel tijdens het onderzoek als bij het ontwerp van het full-scale systeem rekening mee te worden gehouden.

## HOOFDSTUK 3

### ONTWERPASPECTEN VAN DE PILOTPLANT

#### 3.1 Algemeen

In het ontwerp van de pilotproef dienen de volgende zaken zeker te worden vastgesteld:

- omvang van de proeflocatie;
- diepte en plaats van de injectiefilters;
- opbouw en materiaal van het injectiefilter;
- aantal, plaats en diepte van de monitoringsfilters.

Het ontwerp van de pilot wordt bepaald door de volgende aspecten:

1. bodemopbouw;
2. schaal van de bodemprocessen die optreden als gevolg van luchtinjectie en de schaal waarop de bodemprocessen in de praktijk kunnen worden beïnvloed;
3. parameters die worden gemeten om de bodemprocessen in beeld te brengen;
4. eisen die worden gesteld aan de monitoringsfilters;
5. eisen die worden gesteld aan de configuratie van meetpunten;
6. veiligheid en technische uitvoerbaarheid;
7. financiën.

#### 3.2 Bodemopbouw

In een gelaagde bodem verspreiden lucht, zuurstof en verontreinigingen zich met name via de goed doorlatende lagen. In dit project is ervoor gekozen om zowel injectiefilters als monitoringsfilters te plaatsen in de goed doorlatende lagen. Dit houdt in dat binnen laag L3 onderscheid wordt gemaakt in goed en slecht doorlatende lagen. De dikte van deze lagen wordt niet alleen bepaald door samenstelling van de bodem, maar ook door de praktische mogelijkheden om in verschillende lagen te meten of lucht te injecteren. In de praktijk is het niet gebruikelijk om lagen die dunner zijn dan 1 à 2 m te onderscheiden. Dit heeft te maken met het feit dat de monitorings- en injectiefilters die in de praktijk worden gebruikt een minimale lengte hebben van 1 m. In 4.3.2 is dit nader uitgewerkt.

#### 3.3 Bodemprocessen

Voor de in 2.2 (zie fig. 3) beschreven processen kunnen schattingen worden gegeven voor de schaal waarop de processen plaatsvinden:

1. Een vuistregel die vaak wordt toegepast voor het schatten van de invloedsstraal van een luchtinjectie is dat de invloedsstraal overeenkomt met de diepte van de injectie ten opzichte van de grondwaterstand. Er wordt verwacht dat een horizontale gelaagdheid leidt tot vergroting van de invloedsstraal.  
In dit geval bedraagt de stijghoogte in laag L3 circa 0 m+NAP. De maximale diepte van de luchtinjectie bedraagt circa -10 m+NAP. Gezien de gelaagdheid van de bodem wordt daarom een invloedsstraal van 10 à 20 m vanuit het luchtfilter verwacht. Binnen deze invloedsstraal zullen zich **luchtkanalen** vormen.
2. De **overdracht van zuurstof** van lucht naar het grondwater is diffusie-gestuurd en zal zich daarom binnen de tijdsduur van de sanering beperken tot de directe omgeving (1 m) van een luchtbaan.
3. De **verspreiding van opgelost zuurstof** vindt plaats via de grondwaterstroming, gecombineerd met diffusie en dispersie. De snelheid van de grondwaterstroming varieert van

0,1 m/jaar in de slechtdoorlatende lagen tot maximaal 10 m/jaar in de goed doorlatende lagen. Diffusie en dispersie leiden tot een transversale verspreiding die maximaal overeenkomt met de longitudinale verspreiding, dus maximaal 10 m/jaar.

4. De **verspreiding van verontreinigingen** wordt, net zoals de verspreiding van zuurstof, bepaald door de snelheid van de grondwaterstroming. Bij verontreinigingen speelt de horizontale verspreiding loodrecht op de grondwaterstroming geen significante rol, omdat er in die richting geen concentratiegradiënt bestaat.

Op grond van het voorgaande is ervoor gekozen dat de omvang van de pilotplant  $20 \times 20 \text{ m}^2$  bedraagt.

### 3.4 Meetparameters

Biologische omzetting van verontreinigingen vindt plaats via opgelost zuurstof in de waterfase. Monitoring tijdens de pilotplant is daarom vooral gericht op het grondwater en vindt plaats met behulp van peilbuizen. Voor een goede interpretatie van de resultaten van de pilotplant is het van belang dat de meetparameters gericht zijn op de kwantificering van de biodegradatie. Er is daarom gekozen voor de volgende parameters:

- concentraties aan verontreinigingen in de tijd;
- opgelost zuurstof in het grondwater;
- gasmetingen in de peilbuizen;
- temperatuur van het grondwater.

Voor een uitgebreide beschrijving van monitoring van in situ biorestauratie wordt verwezen naar een artikel dat in het kader van NOBIS is geschreven door Keuning en Van der Waarde (verschenen in 1996 in 'Bodem').

### 3.5 Eisen aan de monitoringsfilters

Er is voor gekozen om de monitoring uit te voeren met permanente peilbuizen. De belangrijkste reden daarvoor is dat de *reproduceerbaarheid* van de metingen van groot belang is in een situatie waarin zowel de bodem als de verontreinigingssituatie heterogeen van aard is.

Het grote nadeel van het gebruik van peilbuizen bij luchtinjectie is dat de peilbuizen fungeren als kortsluitstroombaan. Dit betekent dat de geïnjecteerde lucht direct naar de peilbuis stroomt en dat de gemeten concentraties in de peilbuis niet representatief zijn voor het grondwater rondom de peilbuis. Om de negatieve effecten van peilbuizen tegen te gaan zijn de volgende maatregelen getroffen:

- de peilbuizen zijn aangebracht door drukken. Hierdoor wordt de lekstroom langs het filter tot een minimum beperkt;
- alle peilbuizen worden aan de bovenkant luchtdicht afgesloten;
- de bemonstering van de peilbuizen vindt plaats met behulp van een slang die ter hoogte van de bovenkant van het filter wordt gehangen en waarmee een klein debiet wordt onttrokken. De peilbuis wordt minimaal 1 keer doorspoeld voordat de concentraties worden gemeten.

Vanwege deze maatregelen wordt het risico op het ontstaan van voorkeursstroombanen geminimaliseerd. Daarom kunnen de metingen in de peilbuizen representatief worden geacht voor het grondwater rondom de peilbuis.

### 3.6 Configuratie van de meetpunten

De hoeveelheid informatie die wordt verkregen via de uitvoering van een pilotplant is afhankelijk van het aantal en de locaties van de monitoringsfilters. In het onderstaande is aangegeven op grond waarvan de huidige configuratie aan filters is gekozen.

#### *Locatie*

De locaties van monitoringsfilters worden zodanig gekozen dat de kans zo groot mogelijk wordt geacht dat relevante kennis wordt vergaard betreffende de processen die zich tijdens de uitvoering van de pilotplant in de bodem afspelen. Hierin staat met name het ontstaan van luchtkanalen centraal. Aangezien het doel van de pilotplant is om deze processen te onderzoeken, is het niet mogelijk om op voorhand de juiste locaties van de monitoringsfilters vast te stellen.

Er is voor gekozen om in eerste instantie 60 % van de beschikbare monitoringsfilters te plaatsen. De overige 40 % is geplaatst op basis van de voorlopige proefresultaten.

De locatie van de monitoringsfilters wordt bepaald door twee variabelen:

- de ruimtelijke variabiliteit van de bodem en de luchtstroming;
- de geschatte invloedsstraal.

Vanwege de heterogeniteit van de bodem is een belangrijke eis die aan de locatie van de monitoringsfilters wordt gesteld dat de filters alzijdig rondom het injectiefilter staan. In het geval dat de filters in één of enkele rijen vanaf het injectiepunt worden geplaatst, brengt dat als risico met zich mee dat de lucht net een andere kant opstroomt en dus niet wordt gedetecteerd.

Omdat een belangrijke onderzoeksvraag is gericht op het vaststellen van de invloedsstraal is het van belang om filters op verschillende afstanden van het injectiefilter te plaatsen.

Gezien het feit dat de grondwaterstroming een belangrijke rol speelt in het verspreiden van opgeloste zuurstof zal een aërobe zone naar verwachting ontstaan in stroomafwaartse richting van het luchtfilter. Er is daarom voor gekozen om meer filters stroomafwaarts dan stroomopwaarts van het injectiefilter te plaatsen.

#### *Aantal filters*

Het benodigde aantal filters wordt bepaald door de mate van detail waarmee de heterogeniteit van de bodem en daarin plaatsvindende processen moeten worden beschreven. Het is duidelijk dat de er zowel op micro(millimeter)-, meso(decimeter)- als macro(meter)-niveau sprake is van heterogeniteit. Zowel het meten als het beïnvloeden van saneringsprocessen vindt echter zonder uitzondering plaats op macroniveau en worden ook op dat niveau gestuurd. Om financiële en technische redenen is het niet mogelijk om saneringsmaatregelen af te stemmen op micro- of mesoniveau. Processen die plaatsvinden op alle drie niveaus moeten daarom op macroniveau worden gemeten en beschreven.

In 2.2 zijn twee uitersten beschreven ten aanzien van het ontstaan van voorkeurskanalen:

- er ontstaan enkele grote kanalen;
- er ontstaat een dicht netwerk aan fijn kanalen.

In het eerste geval kan worden geconcludeerd dat luchtinjectie niet succesvol kan worden toegepast. Het ontstaan van enkele voorkeurskanalen wordt aangetoond als er in geen of slechts in een beperkt deel van de monitoringsfilters effecten worden waargenomen. De eis die daarom wordt gesteld aan het **minimum aantal** monitoringsfilters is dat er niet 'toevallig' geen effecten

worden gemeten, terwijl het grootste deel van het invloedsgebied wel wordt beïnvloed. In bijlage N is beschreven op welke wijze het mogelijk is om dit met behulp van geostatistische methoden verder te onderbouwen. Hieruit komt naar voren dat het aantal monitoringsfilters dat nodig is om een bepaalde hypothese te testen sterk afhankelijk is van de hoedanigheid van de hypothese. In het kader van dit project is in eerste instantie besloten om een aantal monitoringsfilters te installeren dat gevoelsmatig in ieder geval niet te klein is. Op basis van de resultaten is achteraf geconcludeerd dat het aantal monitoringsfilters voldoende was om eenduidige conclusies te trekken.

Er wordt vaak gesteld dat het **maximum aantal** monitoringsfilters in theorie onbeperkt is, maar in de praktijk wordt bepaald door het beschikbare budget. Dit is meestal niet waar. Het is beter om te stellen dat het maximale aantal filters wordt bepaald door de onderzoeksvraag. Er dient te worden gestreefd naar het minimale aantal filters waarmee de onderzoeksvraag kan worden beantwoord. In dit project is de onderzoeksvraag gericht op het aantonen van de werking van een biologisch scherm. Dat houdt in dat er geen behoefte is aan kennis van de optredende processen op elke plaats en op elk schaalniveau. Bovendien leidt de plaatsing van monitoringsfilters tot verstoring van de bodem, zodat het aantal filters ook om die reden zo klein mogelijk zou moeten zijn.

In dit geval dient het aantal monitoringsfilters zodanig te zijn dat er redelijkerwijs kan worden aangetoond dat er in een lijn loodrecht op de stromingsrichting van het grondwater biologische activiteit ontstaat. Dit houdt in dat de dichtheid aan peilbuizen zodanig moet zijn dat geen grote 'gaten' vallen in de lijn loodrecht op de stromingsrichting. Er kunnen geen richtlijnen worden gegeven voor de maximale grootte van een 'gat' in het monitoringsnetwerk.

#### *Samenvatting configuratie monitoringsfilters*

De configuratie aan monitoringsfilters wordt bepaald door het volgende:

- vanwege de verwachte ruimtelijke variabiliteit dienen filters rondom het injectiepunt te worden geplaatst;
- vanwege het onderzoek naar de invloedsstraal dienen filters op verschillende afstanden vanaf het injectiepunt te worden geplaatst;
- vanwege de grondwaterstroming en de aanwezigheid van open water worden meer filters stroomafwaarts van het injectiepunt geplaatst;
- in een lijn loodrecht op de grondwaterstroming mogen geen grote gaten aanwezig zijn in het netwerk aan monitoringsfilters;
- plaatsing in twee stappen.

### 3.7 Veiligheid en technische uitvoerbaarheid

#### *Veiligheid*

Het uitgangspunt van de pilotplant is dat er op verschillende diepten lucht wordt geïnjecteerd met als doel om zuurstof in de bodem te brengen.

Hierbij doen zich twee **technologische** problemen voor die voor veiligheidsrisico's kunnen zorgen:

- Wat gebeurt er met de geïnjecteerde lucht onder de kleilaag? Een ongecontroleerde verspreiding van deze lucht brengt mogelijk risico's met zich mee voor zettingen en verspreiding van verontreinigingen. Er zullen daarom voorzieningen moeten worden getroffen om geïnjecteerde lucht op gecontroleerde wijze op te vangen.
- Mogelijkerwijs bevat de opgevangen lucht zeer hoge concentraties aan aromaten hetgeen veiligheidsrisico's met zich mee kan brengen.

Het was in het begin van de proef onzeker of er een onacceptabele ophoping van lucht onder de kleilaag zou plaatsvinden. Vooral nog werd er van uitgegaan dat maatregelen *niet* nodig zouden zijn. Omdat niet kan worden uitgesloten dat er toch opgehoopte lucht moet worden afgevoerd, werd een bodemluchtexttractiesysteem als optie voorzien.

#### *Uitvoeringsaspecten*

Voorafgaand aan en tijdens de uitvoering van de pilotplant dient rekening te worden gehouden met de volgende vragen:

- Met welk debiet kan worden geïnjecteerd? Dit hangt af van de diepte van injectie, de doorlatendheid van de bodem en de maximale druk om het filter waarbij nog geen verstoring van de bodemstructuur plaatsvindt.
- Hoe kan worden voorkomen dat langs het persluchtinjectiefilter kortsluitstroming ontstaat?
- Hoe kan worden voorkomen dat de filters volstromen met slib?

Bij het ontwerp van het injectiesysteem dient met de volgende aandachtspunten rekening te worden gehouden:

- Terugstroom van verontreinigde lucht met water (misschien ook product) naar de apparatuurcontainer dient (uit veiligheidsoogpunt) voorkomen te worden. Aanbevolen wordt de nodige terugslagkleppen op te nemen.
- Het aflaten van de terugstromende lucht kan de sanering bevorderen. Er dienen echter wel maatregelen genomen te worden om dit veilig uit te voeren vanwege de hoge concentraties in de terugstromende lucht.
- Eventueel kan de terugstroom van geïnjecteerde lucht worden bevorderd door een vacuümpomp op de injectieput te zetten.
- Het gehele luchtinjectiesysteem dient per computer continu gemonitord en bestuurd te kunnen worden.
- Filtermateriaal: de bodem bevat (in iedere laag) relatief veel fijn materiaal dat door het pulseerende karakter van luchtinjectie door de filtergrindomstorting (en kous) heen in het filter kan komen en dit dan kan verstoppen. Het is daarom van belang om een spleetdiameter te kiezen die klein genoeg is om de instroom van gronddelen te voorkomen.

### 3.8 Financiën

Vanuit financieel oogpunt is het noodzakelijk om van te voren het aantal monitoringsfilters vast te stellen. Er is daarom voor gekozen om het aantal filters van te voren vast te stellen en de filters tijdens de uitvoering van de pilotplant gefaseerd te plaatsen. De eerste serie monitoringsfilters (60 %) voor de aanvang van de pilotproef en de overige (40 %) in de loop van het project. Zodoende kan worden geanticipeerd op het verloop van de pilotplant.

### 3.9 Samenvatting van de ontwerpaspecten van de pilotplant

In het onderstaande is samengevat wat de belangrijkste argumenten zijn die van belang zijn voor het ontwerp van de pilotplant.

De **omvang van de pilotplant** wordt vastgesteld op basis van de verwachte invloedsstraal van de luchtinjectie.

De **diepte van de injectiefilters en de monitoringsfilters** wordt bepaald op basis van een gedetailleerde omschrijving van de bodemopbouw.

De **wijze van plaatsing en het gebruikte materiaal** voor de injectiefilters wordt bepaald door het minimaliseren van de risico's voor dichtslibben en het ontstaan van kortsluitstroming langs het filter.

De **dichtheid aan monitoringsfilters en het aantal monitoringsfilters** wordt bepaald door:

- de ruimtelijke variabiliteit qua bodem en luchtstroming;
- het gegeven dat het onderzoek is gericht op de invloedsstraal vanaf het injectiefilter;
- de grondwaterstroming en de aanwezigheid van open water;
- het gegeven dat het onderzoek gericht is op het aantonen van de werking van een biologisch scherm loodrecht op de grondwaterstroming.



## HOOFDSTUK 4

### UITVOERING VAN DE PILOTPROEF OP VELDSCHAAL

#### 4.1 Inleiding

De uitvoering van de pilotproef is onderverdeeld in de volgende 5 subfasen:

- Subfase 1: Voorbereidend onderzoek.
- Subfase 2: Detailontwerp van de pilotplant.
- Subfase 3: Installatie van de pilotplant.
- Subfase 4: Uitvoering van de veldproeven.
- Subfase 5: Interpretatie en evaluatie.

In de volgende paragrafen wordt per subfase ingegaan op:

- het doel van de subfase;
- de uitgevoerde werkzaamheden;
- de resultaten van de metingen;
- de interpretatie en de conclusie van de metingen;
- de evaluatie van de uitgevoerde werkzaamheden.

Allereerst wordt in 4.2 een verantwoording gegeven voor de wijze waarop de resultaten worden geïnterpreteerd en weergegeven.

#### 4.2 Verantwoording van de resultaten

Een groot deel van de resultaten bestaat uit metingen die zijn uitgevoerd in peilbuizen. In 3.5 is beschreven waarom gekozen is voor peilbuizen en wat voor maatregelen zijn getroffen om kortsluitstroming te voorkomen. Er wordt daarom van uitgegaan dat de bubbels die worden waargenomen in de peilbuizen geen invloed hebben op de concentraties die in de peilbuizen worden gemeten. De metingen in de peilbuizen worden daarom *representatief* geacht voor het grondwater in de omgeving van de peilbuis.

De resultaten kunnen op twee manieren in tekeningen worden weergegeven:

- als puntmetingen;
- als contouren.

Een contour is een interpretatie van puntmetingen en daarom per definitie bestrijdbaar. Het voordeel van contouren is dat een duidelijker beeld wordt gegeven. Voor een groot aantal metingen is daarom besloten om de meest relevante resultaten op beide manieren weer te geven.

#### 4.3 Voorbereidend onderzoek

##### 4.3.1 Doelstelling voorbereidend onderzoek

De doelstelling van het voorbereidend onderzoek is:

1. karakterisatie van de bodemopbouw, geohydrologie en gedrag van verontreinigingen;
2. het vastleggen van de verontreinigingssituatie bij aanvang van de veldproef;
3. het bepalen van de exacte diepte van de luchtinjectiefilters en de monitoringsfilters.

#### 4.3.2 *Uitgevoerde werkzaamheden voorbereidend onderzoek*

De bodemopbouw is gekarakteriseerd door middel van Ackermann-boringen, sonderingen en geotechnische analyses. Met behulp van de monsters uit de Ackermann-boring is een dwarsprofiel van de bodem gemaakt waarvan een foto is gemaakt. De foto van de bodem tussen -4 en -14 m+NAP is weergegeven in figuur 1.

Er zijn monitoringsfilters geplaatst in de vorm van zogenoemde holosondes. Dit zijn roestvrij-stalen 2" filters met 0,3 mm horizontale filterspleten die in de grond worden gedrukt. De locatie van de monitoringsfilters is ingetekend op een situatietekening die is opgenomen in bijlage B.

De geohydrologie is bepaald met beschrijvingen van de bodem, continue stijghoogtemetingen en falling headtests in de peilbuizen.

De verontreinigingssituatie en het gedrag van de verontreinigingen is bepaald door middel van chemische analyses en kolomproeven in het laboratorium.

Een gedetailleerde beschrijving van het uitgevoerde veld- en laboratoriumwerk is weergegeven in bijlage D.

#### 4.3.3 *Resultaten voorbereidend onderzoek*

De resultaten van het voorbereidend onderzoek zijn als volgt samengevat:

##### *Bodemopbouw*

- De bodem heeft, zowel op meter-, decimeter- als centimeterschaal een gelaagde structuur. De laagopbouw van figuur 1 is ter plaatse van de pilotplant teruggevonden.
- De bodem bestaat uit een aantal zandlagen met bijmenging van dunne klei/siltlaagjes, afgewisseld met kleilagen.
- Uit de gemeten conusweerstand, waterdruk en wrijvingsgetal is geconcludeerd dat er relatief goed doorlatende lagen voorkomen op de volgende diepten:
  - -1 tot -5 m+NAP;
  - -6 tot -7,5 m+NAP;
  - -9 tot -11 m+NAP.

Deze relatief goed doorlatende lagen worden onderling gescheiden door slecht doorlatende lagen.

##### *Geohydrologie*

- De waterdoorlatendheid in de zandlagen op basis van falling headtests en korrelgrootte-analyses is geschat op 0,1 tot 1 m/dag.
- De doorlatendheid berekend met behulp van de getijmetingen is een factor 10 hoger dan de doorlatendheid op basis van fallinghead tests. Deze meetmethode wordt minder betrouwbaar geacht dan de falling headtests.

##### *Verontreinigingssituatie*

- De verontreiniging met vluchtige aromatische koolwaterstoffen bevindt zich zowel in laag L3 als in laag L5. In laag L3 zijn in de gehele laag concentraties benzeen en ethylbenzeen hoger dan 30.000 µg/l aangetroffen. In de drijf laag bovenin laag L3 bevinden zich ook toluen en styreen in concentraties hoger dan 30.000 µg/l. Middenin en onderin zijn deze stoffen echter niet aangetroffen.
- De analyseresultaten in 1997 zijn vergelijkbaar met die uit 1994. De concentraties benzeen en ethylbenzeen lijken iets te zijn toegenomen, de concentraties styreen lijken te zijn afgenomen. De verschillen zijn niet zodanig groot dat er wezenlijke verklaringen voor kunnen worden gegeven.

Een overzicht van de verontreinigingssituatie is weergegeven in bijlage C en figuur 2.

#### *Gedrag van de verontreinigingen*

- Op basis van de kolomproef en de schudtest kan worden geconcludeerd dat benzeen en toluen goed uitlogen en goed beschikbaar zijn voor biologische afbraak.
- Ethylbenzeen en styreen logen minder goed uit en zijn derhalve minder goed beschikbaar voor biologische afbraak.

#### 4.3.4 *Evaluatie van de uitgevoerde werkzaamheden voorbereidend onderzoek*

In tabel 1 is een overzicht gegeven van de uitgevoerde onderzoeksmethoden met daaraan gekoppeld een waardering voor de verkregen informatie.

Tabel 1. Overzicht van de uitgevoerde werkzaamheden tijdens het voorbereidende onderzoek en waardering van de verkregen informatie

activiteit	waardering <sup>1</sup>	opmerkingen
Ackermann-boring met foto	3	geeft optimaal inzicht in de bodemopbouw; een dergelijke foto heeft met name grote waarde ten behoeve van de beeldvorming ten aanzien van deze bodem
sonderingen	4	kunnen goed worden geïnterpreteerd met behulp van foto en geven goed beeld van ruimtelijke heterogeniteit; met name het continu voorkomen van bepaalde lagen is van belang
peilbuizen	4	grondwateranalyses vormen de basis van de monitoring; grondwaterstanden geven essentiële informatie over de grondwaterstroming.
falling headtests	2	goede methode om de doorlatendheid en de spreiding daarin te bepalen; gezien de heterogeniteit van de bodem is het aantal metingen altijd te weinig om een exact beeld van de doorlatendheid te krijgen voor de modellering zijn gegevens betreffende de doorlatendheid onontbeerlijk
zeefkrommen	2	goede methode voor bepaling van doorlatendheid en bodemsamenstelling; interpretatie is problematisch gezien de heterogeniteit van de bodem
chemische analyses verontreinigingen	4	belangrijkste parameter voor het beoordelen van het resultaat van een in situ sanering
chemische analyses macroparameters	3	geven inzicht in redoxtoestand
Ackermann-boring voor nemen van ongeroerde monsters	3	noodzakelijk voor het uitvoeren van kolomtests
kolomproeven en schudtests	3	met name in geval van puur product of onbekende stoffen geven kolomtests inzicht in de beschikbaarheid van verontreinigingen voor biologische afbraak
continuumetingen stijghoogten	3	het is belangrijk om te weten wat het effect van het getijde is op de grondwaterstijghoogte het berekenen van de doorlatendheid op basis van de getijdebeweging is minder nauwkeurig

<sup>1</sup> 4 = essentiële informatie

3 = belangrijke en relevante informatie

2 = minder zinvol, maar wel inzicht verhogend

1 = niet zinvol

Op basis van tabel 1 blijkt dat het volgende onderzoek in een sterk gelaagde bodem van essentieel belang is:

- sonderingen voor de ruimtelijke variabiliteit;
- peilbuizen voor bemonstering en grondwaterstanden;
- chemische analyses verontreinigingen.

De volgende onderzoeken geven nuttige en belangrijke informatie geven, maar zijn niet van essentieel belang:

- falling headtests en zeefkrommen voor het bepalen van doorlatendheden;
- chemische analyses macroparameters voor de redoxtoestand;
- Ackermann-boring met foto voor de bodemopbouw;
- Ackermann-boring voor het nemen van ongeroerde monsters;
- kolomproeven en schudtests voor de biologische beschikbaarheid van verontreinigingen;
- continuumetingen van stijghoogten voor wisselende grondwaterstanden.

#### 4.4 Detailontwerp en installatie van de pilotplant

##### 4.4.1 Doelstelling pilotplant

In hoofdstuk 3 is beschreven welke beweegredenen hebben geleid tot het gekozen ontwerp van de pilotplant.

##### 4.4.2 Uitgevoerde werkzaamheden detailontwerp en installatie pilotplant

In bijlage E is een nadere beschrijving gegeven van het persluchtsysteem. De nadere beschrijving bestaat uit het flowschema en de indeling van de persluchtinjectiecontainer (zie bijlage E1), de opbouw van de 1e persluchtfilters (zie bijlage E2), de boorstaten en de schematische situering van de persluchtfilters (zie bijlage E3 en E4) en de opbouw van de herplaatste persluchtfilters (zie bijlage E5).

Het persluchtinjectiesysteem bevat drie luchtinjectiefilters op de volgende diepten:

- 9 tot 10 m-mv ;
- 10,5 tot 11,5 m-mv;
- 14 tot 15 m-mv.

De exacte diepte van de filters is bepaald op basis van de bodemopbouw die is gekarakteriseerd met behulp van sonderingen en de Ackermann-boring. Voor het bepalen van de diepte van de injectiefilters zijn twee uitgangspunten gehanteerd:

- de filters worden geplaatst in een goed doorlatende laag;
- de filters worden gescheiden door een continu aanwezige slecht doorlatende laag.

Bestudering van de beschikbare sonderingen ter plaatse van de pilotplant heeft geleid tot de gekozen diepte.

In eerste instantie is gekozen om de injectiefilters zo dicht mogelijk bij elkaar te plaatsen. In de praktijk is een onderlinge afstand van een 0,5 m haalbaar. De reden voor het zo dicht mogelijk bij elkaar plaatsen is dat het interpreteren van de meetresultaten eenduidiger is als er op één punt wordt geïnjecteerd.

Tijdens de eerste maand van de proefperiode werden twee problemen geconstateerd:

- de injectiefilters stroomden langzaam vol met slib;
- er ontstond een steeds sterkere kortsluitstroming tussen de verschillende persluchtfilters.

Beide problemen houden verband met elkaar. Het is niet duidelijk hoe de problemen zijn begonnen. Samengevat kan worden gesteld dat een snelle drukval in een injectiefilter veroorzaakt kan worden door kortsluitstroming in de grond of door een lek in het systeem. De mate van dichtslibben is afhankelijk van de samenstelling van de bodem. In dit geval is de bodem sterk slibhoudend en dus risicovol.

#### 4.4.3 *Evaluatie van de uitgevoerde werkzaamheden*

Tijdens de installatie van het systeem zijn de volgende knelpunten geconstateerd:

- Het plaatsen van persluchtfilters op verschillende diepten op korte afstand (< 1 m) van elkaar leidt tot verhoogde risico's voor kortsluiting en dichtslibben van filters. Bij een onderlinge afstand van 2 m deden dezelfde problemen zich niet voor.
- Het filtermateriaal en met name de spleetdiameter dient te worden afgestemd op de korrel diameter van het bodemmateriaal.
- Een lek in het systeem leidt tot snelle drukval na het stilzetten van het luchtinjectiesysteem. Dit verhoogt het risico op dichtslibben van het filter.

### 4.5 **Uitvoering van de veldproeven**

#### 4.5.1 *Algemeen*

In tabel 2 is een overzicht gegeven van de veldproeven die zijn uitgevoerd in het kader van de pilotproef. In de tabel is aangegeven wat de verwachte resultaten zijn van de proeven en wat de onderlinge samenhang tussen de proeven is.

Tabel 2. Overzicht van de veldproeven.

veldproef	verwacht resultaat	samenhang met andere proeven
nulmeting	concentraties zuurstof en BTEX, temperatuur bij aanvang proef	vormt referentie voor vervolgmetingen
SF <sub>6</sub> -tests	verhoogde SF <sub>6</sub> -concentraties in verschillende peilbuizen	geeft eerste indicatie van TROI; hiermee wordt gecontroleerd of de eerste inschatting van de TROI en de omvang van de pilotplant correct was
intensieve meetronde	O <sub>2</sub> -metingen in peilbuizen, visuele waarnemingen uittredende lucht.	controle op functioneren systeem, vaststellen technische grenzen van het systeem.
lange experimenteerfase en bijplaatsen peilbuizen	O <sub>2</sub> -metingen in peilbuizen, visuele waarnemingen uittredende lucht.	injectiedebiet en regime waarmee de rest van de proef wordt uitgevoerd en wordt vastgesteld; geeft beeld van het zuurstofverbruik in het grondwater en dus van verwachte tijdsduur van de proef en bemonsteringsfrequentie
duurproef	O <sub>2</sub> -, aromaten- en temperatuurmetingen in peilbuizen	de EROI wordt vastgesteld op basis van O <sub>2</sub> -metingen; er wordt vastgesteld of en op welke termijn de EROI gelijk wordt aan de TROI
inundatieproef	visuele waarnemingen uittredende lucht aan maaiveld	geeft een beeld van TROI
respiratieproef	O <sub>2</sub> -metingen in peilbuizen	vaststellen snelheid O <sub>2</sub> -verbruik in het grondwater

Kort samengevat wordt de TROI vastgesteld op basis van de SF<sub>6</sub>-test, inundatieproef en visuele waarnemingen. De EROI wordt vastgesteld op basis van O<sub>2</sub>-, aromaten- en temperatuurmetingen tijdens de duurproef.

In 4.5.2 tot en met 4.5.8 worden de genoemde veldproeven nader toegelicht. Per onderdeel wordt aangegeven wat het doel is van de metingen, hoe de uitgevoerde metingen zijn uitgevoerd en wat de resultaten en conclusie zijn van de metingen. Daarnaast is elk onderdeel geëvalueerd.

Tijdens vrijwel alle veldproeven zijn metingen uitgevoerd in peilbuizen. De werkwijze gehanteerd bij de metingen is nader beschreven in bijlage F.

#### 4.5.2 Nulmeting

##### Doelstelling

De doelstelling van de nulmeting is het vaststellen van de nulsituatie van de belangrijkste monitoringsparameters bij aanvang van de pilotproef. Het nulonderzoek vormt de basis voor alle interpretaties met betrekking tot het procesverloop en de effectiviteit van de maatregelen.

##### Uitgevoerde metingen

In alle monitoringspeilbuizen en twee refentiepeilbuizen zijn de volgende parameters gemeten:

- opgelost zuurstof (DO), temperatuur en aromaten (BTEX en styreen) in het grondwater;
- gasconcentraties in de peilbuizen van CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en aromaten (BTEX en styreen);
- saneringsparameters, zoals sulfaat, bicarbonaat, carbonaat, calcium, magnesium, ijzer totaal, en mangaan.

##### Werkwijze

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de uitgevoerde metingen en de werkmethode van het nulonderzoek. In bijlage F wordt nader ingegaan op de gehanteerde werkmethode.

Tabel 3. Uitgevoerde metingen en werkmethode van het nulonderzoek.

meting	werkmethode	opmerking
O <sub>2</sub> (lucht in pb)	in situ gemeten, geanalyseerd met de gasanalyser	*
CO <sub>2</sub> (lucht in pb)	in situ gemeten, geanalyseerd met de gasanalyser	*
CH <sub>4</sub> (lucht in pb)	in situ gemeten, geanalyseerd met de gasanalyser	*
aromaten (lucht in pb)	in situ gemeten, geanalyseerd met de PID en FID	*
aromaten grondwater	monsternamen conform VPR	*
zuurstof grondwater	meting 50 cm vanaf de onderkant van het filter tijdens doorpompen van peilbuis; concentratie opgelost zuurstof in situ bepaald met zuurstofelektrode	eerst gasmetingen uitvoeren en daarna de DO-metingen uitvoeren; in peilbuizen met drijfslag geen zuurstofmeting
temperatuur grondwater	in situ gemeten tijdens doorspoelen	
saneringsparameters	monsternamen conform VPR	

\* Peilbuizen met drijfslag niet bemonsterd.

##### Resultaten

##### **Opgelost zuurstof in het grondwater**

Uit de nulmeting blijkt dat alle concentraties opgelost zuurstof in het grondwater kleiner zijn dan 0,4 mg/l. Dit betekent dat de bodem ter plaatse van de proeflocatie matig tot sterk anaëroob is.

### ***Aromaten in het grondwater***

In bijlage C zijn de analyseresultaten van de aromaten weergegeven voor 3 bemonsteringsronden. De resultaten zijn per sublaag (boven, onder en midden) van L3 weergegeven in tabelvorm en in overzichtstekeningen per sublaag van L3. De metingen die zijn uitgevoerd op 9-7-1997 betreffen de nulbemonstering. Als gevolg van de aanwezigheid van de drijfslag waren enkele monitoringspeilbuizen niet te bemonsteren.

### ***Saneringsparameters in het grondwater***

De resultaten van de analyse van het grondwater op de saneringsparameters sulfaat, bicarbonaat, carbonaat, calcium, magnesium, ijzer totaal en mangaan is weergegeven in bijlage G.

### ***CO<sub>2</sub> in lucht peilbuis***

De CO<sub>2</sub>-gasmetingen in de peilbuizen geven een gemiddelde concentratie van CO<sub>2</sub> in laag L3 van 0,03 V%. Dit ligt in dezelfde orde van grootte als de concentraties in de buitenlucht. Er kan daarom worden geconcludeerd dat er zonder luchtinjectie geen aërobe afbraak plaatsvindt waarbij CO<sub>2</sub> wordt gevormd.

### ***CH<sub>4</sub> in lucht peilbuis***

De CH<sub>4</sub>-gasmetingen geven een hoogste concentratie CH<sub>4</sub> van 0,89 V% en een gemiddelde concentratie CH<sub>4</sub> in de lucht van de monitoringspeilbuizen van 0,03 V%. Het voorkomen van CH<sub>4</sub> in een aantal peilbuizen duidt op anaërobe processen waarbij organisch materiaal wordt omgezet. Naar verwachting gaat het om organisch materiaal dat van nature voorkomt in de bodem.

### ***Temperatuur in het grondwater***

De gemiddelde temperatuur gemeten in het grondwater is 10,8 à 10,9 °C. Er zit nauwelijks verschil tussen de gemeten temperaturen in de verschillende monitoringspeilbuizen.

### ***Conclusie***

Op basis van de nulmetingen blijkt dat:

- de bodem ter plaatse van de proeflocatie anaëroob is en er derhalve geen sprake van (aërobe) natuurlijke afbraak is;
- er zeer hoge gehalten aromaten in het grondwater aanwezig zijn. Het betreft de stoffen benzeen en ethylbenzeen en in mindere mate toluen en styreen. De gehalten benzeen in de sublaag L3 boven zijn het hoogst (gehalten > 200.000 µg/l). De gehalten benzeen in de lagen L3 midden en onder zijn in de orde van grootte van 100.000 µg/l;
- er sprake is van een drijfslag.

### ***Evaluatie***

Bij het bemonsteren van de monitoringsfilters is het van belang het grondwater in de peilbuis goed door te pompen voordat tot meten wordt overgegaan. De reden hiervoor is dat niet het water in de peilbuis moet worden bemonsterd, maar het grondwater rondom dit filter. Dit geldt met name voor de meting van het opgelost zuurstof.

Monitoringspeilbuizen met een drijfslag zijn niet geschikt voor het meten van zuurstof. De reden daarvoor is dat de in situ meetapparatuur niet bestand is tegen puur product.

Het is van belang om bij aanvang van de monitoringswerkzaamheden enkele 'blanco' monitoringspeilbuizen te definiëren. Dit zijn peilbuizen binnen de verontreiniging maar buiten het invloedsgebied van de luchtinjectie en een peilbuis in een (relatief) schoon deel van de locatie buiten het invloedsgebied van de persluchtinjectie.

#### 4.5.3 *Intensieve meetronde (2 weken)*

##### **Doelstelling**

Het bepalen van de korte termijn effecten van luchtinjectie. Tijdens deze fase wordt het concept van pilotproef getoetst aan:

- veiligheid;
- blootstelling;
- verspreiding (gasfase, verplaatsing van drijfslag);
- explosiviteit;
- technische uitvoerbaarheid van het systeem.

Tevens wordt tijdens deze fase:

- een eerste aanzet gegeven voor de bedrijfsvoering (debiet, injectiediepte, regime en injectiedruk) van het systeem tijdens het vervolg van de pilotproef;
- een check uitgevoerd van de gekozen locatie van de eerste monitoringsfilters;
- een check uitgevoerd van de reactie van de monitoringsfilters op de luchtinjectie;
- onderzocht in hoeverre het strippen van verontreinigingen optreedt.

##### **Uitgevoerde metingen**

Gedurende de intensieve meetperiode van twee weken zijn verschillende parameters gemeten. De resultaten van de metingen zijn zoveel mogelijk ter plaatse geïnterpreteerd om de proeven daar waar nodig bij te sturen.

De volgende metingen zijn uitgevoerd:

##### **Veiligheid**

De volgende metingen zijn uitgevoerd om de veiligheid van het systeem te testen:

- gasmetingen (methaan en totaal aromaten) in de lucht in de peilbuizen om te onderzoeken in hoeverre explosieve gasmengsels ontstaan;
- bodemluchtmetingen op een diepte van 0,5 m-mv om het uittreden van verontreinigde lucht naar het maaiveld te controleren. Op basis van deze metingen is bepaald of een bodemlucht-extractiesysteem noodzakelijk is;
- drijfslagmetingen.

##### **Technische uitvoerbaarheid**

De technische uitvoerbaarheid van het systeem wordt naast de veiligheid ook bepaald door de druk die noodzakelijk is om de perslucht in de bodem te injecteren. Als uitgangspunt is gesteld dat een injectiedruk groter dan 3 bar niet acceptabel is. De reden hiervoor is dat een dergelijke druk een dermate grote installatie (compressor e.d) vergt dat dit financieel niet haalbaar wordt geacht bij een full-scale saneringsoplossing. Daarnaast is er een kans dat een grotere druk leidt tot verstoring van de bodemstructuur. De minimaal benodigde injectiedruk wordt bepaald door de waterdruk van de (water)kolom die de lucht vanuit het persluchtfilter moet wegdrücken. Dit betekent voor het ondiepe, middeldiepe en diepe persluchtfilter een tegendruk van respectievelijk 0,3, 0,6 en 0,9 bar.

##### **Bedrijfsvoering**

Een eerste indicatie van het debiet en de injectiediepte voor het vervolg van de pilotproef is gemaakt op basis van de zuurstofmetingen en visuele waarnemingen van bubbels in het grondwater in de verschillende monitoringspeilbuizen.



Gestart is met het continu injecteren van perslucht met een laag debiet in één van de filters. Vervolgens is het injectiedebiet en de injectietijd opgevoerd. Deze proeven zijn per injectiefilter (on-diep, middeldiep en diep) herhaald.

#### **Resultaten**

In bijlage H is in tabel H1 een overzicht gegeven van de resultaten van de intensieve meetronde. Per aspect zullen de resultaten van de verschillende metingen hieronder nader worden toegelicht:

#### **Veiligheid**

Op basis van de gasmetingen blijkt dat er geen sprake is van een overmatige vorming van CH<sub>4</sub> in de headspace van de monitoringsfilters. De maximaal gemeten concentratie CH<sub>4</sub> in de lucht van de peilbuizen is 5,7 V%. Deze concentratie is significant lager dan de explosiegrens van CH<sub>4</sub>.

Uit de bodemluchtmetingen in de ophooglaag op 0,5 m-mv met de PID blijkt dat er geen aromaten worden aangetroffen. Dit betekent dat er ter plaatse van de pilotproef geen sprake is van het vrijkomen van verontreinigd gas.

Er wordt een verschuiving van de drijfslag waargenomen. In één peilbuis, waar tijdens de nulbemonstering geen drijfslag is aangetoond, ontstaat direct na het aanzetten van de luchtinjectie wel een drijfslag. In twee andere peilbuizen wordt de reeds aanwezige drijfslag dikker. Naar verwachting verdringt de geïnjecteerde lucht een deel van de drijfslag die van onder tegen de kleilaag L2 aandrukt.

#### **Technische uitvoerbaarheid**

De resultaten van de metingen van de injectiedruk tegen het debiet zijn weergegeven in bijlage H. Uit de resultaten blijkt dat de injectiedruk maximaal 1 bar is. Deze injectiedruk ligt beneden de acceptabele druk van 3 bar.

Bij injectie in het diepe filter wordt een toename van de druk van maximaal 0,8 bar in het middeldiepe en ondiepe filter geconstateerd. Dit kan het gevolg zijn van verplaatsing van druk via het grondwater, maar kan ook een indicatie vormen voor het optreden van kortsluitstroming.

#### **Bedrijfsvoering**

Op basis van de resultaten die zijn gepresenteerd in bijlage H blijkt dat bij de injectie in het ondiepe filter in de monitoringsfilters 1.1 en 2.1 en in het middeldiepe filter in de monitoringsfilters 2.1 en 1.2 een zuurstofconcentratie groter dan 2 mg/l wordt gemeten. In monitoringsfilter 4.1 wordt een opgelost zuurstofconcentratie van 1,41 mg/l gemeten. In de overige peilbuizen wordt geen significante hoeveelheid zuurstof gemeten.

Bij de injectie in het diepe filter neemt in de filters 2.1, 1.2, 4.1, 3.2 en 1.3 de zuurstofconcentratie toe tot boven 2 mg/l.

Het debiet van de luchtinjectiedebiet is langzaam opgevoerd. Bij een debiet van circa 7,5 l/s bleek dat er luchtbelletjes te zien waren in het Caland kanaal.

#### **Check locatie monitoringsfilters**

Een groot aantal filters bleek te reageren op de eerste luchtinjectie. Enerzijds bleken tijdens het bemonsteren belletjes te ontstaan in het filter. Anderzijds nam het zuurstofgehalte in een aantal peilbuizen toe. De eerste indruk was dat de monitoringsfilters goed stonden. Er werd niet verwacht dat de invloedsstraal veel groter zou zijn dan de verwachte 10 m.

### **Check reactie monitoringsfilters**

Tijdens de bemonstering bleek dat veel peilbuizen bubbels vertonen. Dit bevestigt het idee dat elke peilbuis een voorkeurskanaal vormt als deze niet wordt afgesloten. Na bemonstering is daarom elke peilbuis weer luchtdicht afgesloten. Waarnemingen aan de peilbuis gaven geen aanleiding om te veronderstellen dat er veel lucht ontsnapt langs de randen van de peilbuis. Dit is later bevestigd door de inundatieproef.

### **Strippen van verontreinigingen**

Uit de bodemluchtmetingen in de onverzadigde zone bleek dat eventueel meegestripte verontreinigingen het maaiveld niet bereiken. Naar verwachting is er ter plaatse van de locatie van de pilotplant geen sprake van het strippen van verontreinigde lucht naar de ophooglaag. Het is wel mogelijk dat verontreinigde lucht ontsnapt op andere plaatsen. Indien dat gebeurt in het Caland kanaal zal dat geen meetbaar effect hebben, omdat de verontreinigingen in het gas vrijwel direct worden afgebroken op het moment dat zij in het oppervlaktewater terechtkomen. Het is niet uit te sluiten dat de lucht een eind buiten de proeflocatie omhoog komt. Aangezien deze plekken niet bekend zijn, kan de kwaliteit van het vrijkomende gas niet worden vastgesteld.

### **Conclusies**

Op basis van de intensieve meetronde van twee weken is het volgende geconcludeerd:

#### **Veiligheid**

- Er treedt geen verontreinigde bodemlucht met CH<sub>4</sub> of aromaten naar het maaiveld en derhalve is een bodemluchtextractiesysteem niet noodzakelijk.
- Er treedt een verplaatsing op van de drijf laag naar de peilbuizen. Deze verplaatsing is dusdanig gering dat er geen onveilige situaties ontstaan.

#### **Technische uitvoerbaarheid**

- Het debiet in relatie tot de injectiedruk is acceptabel. Dat wil zeggen beneden de vooraf gedefinieerde maximumdruk van 3 bar.

#### **Bedrijfsvoering**

- Bij een debiet van circa 8 l/s treden luchtbelletjes uit in het Caland kanaal.
- Injectie via het diepe filter geeft een grotere technische invloedsstraal dan injectie via het ondiepe en middeldiepe filter.
- De resultaten van de intensieve meetperiode zijn niet toereikend om een uitspraak te doen wat effectiever is: intermitterend of continu injecteren.

#### **Monitoringsfilters**

- Als de deksel van de peilbuizen wordt afgehaald, ontstaan in veel peilbuizen direct bubbels. Als de peilbuizen wel zijn afgesloten, zijn er geen indicaties dat er kortsluitstroming van lucht optreedt.

#### **Strippen van verontreinigingen**

- Er treedt geen stripeffect op van verontreinigingen naar de ophooglaag. Strippen van verontreinigingen naar het Caland kanaal of buiten de locatie van de pilotplant kan niet worden vastgesteld.

#### **Evaluatie**

Slechts enkele peilbuizen bevatten opgelost zuurstof na injectie van lucht. De verklaring hiervoor is dat in dit stadium van het project het opgelost zuurstof de monitoringspeilbuizen (nog) niet bereikt als gevolg van consumptie van zuurstof onderweg. Een duurproef kan hierin meer inzicht verschaffen.

Het luchtdicht afsluiten met een dop van de peilbuizen is van groot belang, omdat er anders voorkeursstroming via de peilbuis optreedt. Hetzelfde geldt voor de luchtinjectiefilters. In principe dient ervan te worden uitgegaan dat een peilbuis een luchtkanaal naar deze peilbuis toe veroorzaakt.

Bij het bemonsteren van de peilbuis is het tegengaan van deze kanalen bijna niet mogelijk. Mogelijkheden om voorkeursstroming te voorkomen of om de effecten van voorkeursstroming bij monsternamen tot een minimum te beperken is respectievelijk het uitzetten van het persluchtstelsel en/of het grondwater in de peilbuis goed door te pompen alvorens de peilbuis te bemonsteren.

De intensieve meetronde is een nuttige periode om een eerste inschatting te maken van de bedrijfsvoering (pompdebiet, injectiediepte en injectiedruk) van het luchtinjectiesysteem. Van belang is dat de tijdsduur van de intensieve meetperiode niet te kort wordt genomen. Gedacht moet worden aan een tijdsduur van de proef van minimaal een maand.

#### 4.5.4 *SF<sub>6</sub>-tracertest*

##### *Doelstelling*

Het doel van een tracertest is het bepalen van de technische invloedstraal (TROI) van luchtinjectie. Doordat als tracergas een inerte stof is gebruikt, die niet afbreekt en niet wordt geïnjectieerd, geeft de tracertest aan waar de lucht terechtkomt die wordt geïnjectieerd.

##### *Uitgevoerde werkzaamheden*

Als tracer is voor SF<sub>6</sub> gekozen, omdat SF<sub>6</sub> een niet-reactieve (in chemische en biologische zin) stof is waarvan de oplosbaarheid en het verspreidingsgedrag overeenkomen met die van zuurstof.

Voordat met het injecteren van SF<sub>6</sub> is begonnen is een nulbemonstering uitgevoerd om uit te sluiten dat er SF<sub>6</sub> voor de proeven in het grondwater aanwezig is. Het gehanteerde protocol voor monsternamen en analyse van SF<sub>6</sub> is opgenomen in bijlage I.

Om te bepalen wanneer sprake is van werkelijke beïnvloeding van monitoringspeilbuizen door SF<sub>6</sub> geïnjectieerd via de persluchtfilters is een soort achtergrondgehalte SF<sub>6</sub> in het grondwater gedefinieerd. Hoewel SF<sub>6</sub> een bodemvreemde stof is kan als gevolg van contaminatie bij bemonstering en meetfouten bij monsternamen een achtergrondwaarde van SF<sub>6</sub> in het grondwater ontstaan. Uit een foutenberekening is gebleken dat alle analyseresultaten met een concentratie kleiner dan 0,10 µg/l SF<sub>6</sub> als niet significant waarneembaar kunnen worden beschouwd en derhalve niet tot de technische invloedstraal worden gerekend.

De SF<sub>6</sub>-test is uitgevoerd met een debiet van 2,8 l/s dat intermitterend is geïnjectieerd. Gedurende de proeven is de injectiediepte gevarieerd. Gedurende de injectie van SF<sub>6</sub> zijn de SF<sub>6</sub>-concentraties en de concentraties opgelost zuurstof gemeten. SF<sub>6</sub> is met een debiet van 1200 ml/min meegedoseerd met de lucht. De geïnjecteerde lucht bevat daarmee een concentratie van circa 46 mg/l SF<sub>6</sub>.

Direct na het injecteren van SF<sub>6</sub> zijn de monitoringspeilbuizen bemonsterd en het grondwater ter analyse aangeboden bij het laboratorium van KPE. Bij de bemonstering van de peilbuizen is begonnen bij de monitoringsfilters die het dichtst bij het persluchtfilter lagen. Vervolgens zijn de verder van het persluchtfilter gelegen monitoringsfilters bemonsterd.

Na afloop van de proeven zijn de opgelost zuurstofconcentraties in de verschillende monitoringspeilbuizen vergeleken met de SF<sub>6</sub>-concentraties in de verschillende monitoringspeilbuizen.

## *Resultaten*

### **SF<sub>6</sub>**

De resultaten van de SF<sub>6</sub>-metingen zijn in bijlage I in de volgende overzichtstekeningen weergegeven:

- SF<sub>6</sub>-concentraties gemeten in laag L3-boven bij ondiepe injectie;
- SF<sub>6</sub>-concentraties gemeten in laag L3-boven, midden en onder bij diepe injectie;
- SF<sub>6</sub>-concentraties in laag L3 bij diepe injectie als dwarsprofiel.

Tevens zijn in bijlage I overzichtstekeningen weergegeven met de daadwerkelijk gemeten SF<sub>6</sub>-concentraties per sublaag. Uit de overzichtskaarten blijkt dat het overgrote deel van de monitoringsfilters, gelegen in het ondiepe deel van L3, bij injectie via het ondiepe filter SF<sub>6</sub> bevatten. Bij injectie via het diepe filter worden SF<sub>6</sub>-concentraties groter dan 0,1 µg/l in een groter gebied gemeten. Dit duidt erop dat de technische invloedsstraal bij injectie via het diepe filter groter is dan bij injectie via de andere filters.

Opvallend zijn de hoge concentraties in filter 81 en in 52. Beide filters liggen op grote afstand van het injectiepunt en niet in de stromingsrichting van het grondwater.

De metingen in één peilbuis tonen geen continu beeld. Op verschillende tijdstippen worden steeds verschillende SF<sub>6</sub>-concentraties gemeten.

### ***Opgelost zuurstof in het grondwater***

Tijdens de tracettest zijn ook zuurstofmetingen uitgevoerd. Deze gaven een heterogeen beeld dat overeenkomt met de metingen tijdens de intensieve periode van 2 weken. Er is weinig verband tussen de zuurstof- en de SF<sub>6</sub>-concentraties. Dit wordt toegeschreven aan het zuurstofverbruik in de bodem.

### ***Conclusies***

- Uit de tracettest blijkt een heterogeen verspreidingspatroon van de lucht. Er is geen sprake van een radiale verspreiding in alle richtingen.
- De verspreiding van geïnjecteerde lucht beperkt zich niet tot de directe omgeving van het injectiefilter. De lucht verplaatst zich in een aantal richtingen tot minimaal de buitenrand van de pilotplant.
- De injectie via het diepe filter heeft een invloedsgebied dat aanzienlijk groter is dan het invloedsgebied bij ondiepe injectie.
- Bij vergelijking van de gemeten SF<sub>6</sub>-concentraties met de DO-concentratie blijkt dat er geen relatie is tussen de gemeten SF<sub>6</sub>-concentraties en de DO-concentratie.
- Het invloedsgebied van het opgelost zuurstof is kleiner dan het invloedsgebied van de tracer. Dit zou kunnen worden veroorzaakt door consumptie van zuurstof tijdens transport. Een duurproef kan hier meer inzicht in geven.

### ***Evaluatie***

De SF<sub>6</sub>-proef is een goede methode om in een vroeg stadium van een pilotproef de technische invloedsstraal te bepalen en daarmee ook de effectieve invloedsstraal op termijn.

Bij het uitvoeren van experimenten met het gas SF<sub>6</sub> dient rekening te worden gehouden met de volgende punten:

- Indien gedurende de SF<sub>6</sub>-test het pompdebiet wordt gewijzigd, is het van belang dat dit van laag naar een hoog debiet wordt uitgevoerd. Bij voorkeur wordt gedurende de proeven één debiet gehanteerd.

- De analysetijd van een SF<sub>6</sub>-monster was in dit geval dusdanig lang dat het niet mogelijk is om gedurende de proef te kunnen sturen op reeds behaalde analyseresultaten. Het is van belang om een analysemethode te gebruiken waarmee direct resultaten kunnen worden geboekt.
- Bij het uitvoeren van de SF<sub>6</sub>-test is het slechts mogelijk om één parameter te testen, dus het injectiedebiet of de injectiediepte.
- Om verdunning van het SF<sub>6</sub>-gas met de lucht die reeds in het bodemsysteem aanwezig is te voorkomen, is het noodzakelijk dat het systeem minimaal 2 dagen heeft stilgestaan voordat met het injecteren van SF<sub>6</sub> wordt begonnen.
- Bij het bemonsteren van de monitoringsfilters dient te worden begonnen met monitoringsfilters zo dicht mogelijk bij het luchtinjectiefilter en vervolgens de wat verder gelegen filters.

Tijdens de uitvoering van de SF<sub>6</sub>-proef doen zich de volgende problemen voor:

- Er dient rekening te worden gehouden met contaminatie van het grondwater met SF<sub>6</sub> als gevolg van het afwisselend bemonsteren van opgelost zuurstof en SF<sub>6</sub>. Door het tussendoor spoelen van de meetsonde met schoon water kan dit tot een minimum worden beperkt.
- Het is aan te bevelen een achtergrondwaarde voor SF<sub>6</sub> te definiëren die representatief is voor contaminatie als gevolg van bemonstering en niet te relateren is aan de daadwerkelijke verspreiding van SF<sub>6</sub> via het persluchtfilter.

Bij de analyse van SF<sub>6</sub> dient rekening te worden gehouden met de volgende zaken:

- De analyse van SF<sub>6</sub> is niet-standaard en kan derhalve niet worden geanalyseerd in een regulier milieulaboratorium.
- Bij het uitvoeren van een dynamisch opgezette SF<sub>6</sub>-proef zijn een groot aantal bemonsteringen en analyses noodzakelijk. Het is daardoor van belang dat het laboratorium dicht bij is en een grote hoeveelheid monsters in een korte tijd kan verwerken. Een alternatief hiervoor is de uitvoering van een steady state proef waarbij gedurende enkele dagen SF<sub>6</sub> wordt geïnjecteerd en vervolgens één of twee keer wordt bemonsterd.

#### 4.5.5 Lange experimenteerfase

##### *Doelstelling*

De doelstelling van de lange experimenteerfase is:

- 'fine tuning' van de bedrijfsvoering met betrekking tot het debiet en regime voor de duurproef;
- het bepalen van de optimale locaties van de nog bij te plaatsen monitoringsfilters. Bij aanvang van de pilotproef was het niet mogelijk om de locatie van alle monitoringspeilbuizen te bepalen. Op basis van de omissies in het beeld van de opgelost zuurstof- en SF<sub>6</sub>-gehalten worden de locaties en diepten voor de aanvullende peilbuizen bepaald;
- een eerste aanzet geven tot het vaststellen van de effectieve invloedsstraal.

##### *Uitgevoerde metingen*

Door middel van DO-metingen wordt de verspreiding van zuurstof tegen de tijd nader bepaald. Bij vergelijking van de resultaten van de SF<sub>6</sub>-proef met deze meetgegevens kan een eerste uitspraak worden gedaan over de effectieve invloedsstraal.

##### *Resultaten*

In peilbuis 811 en 21 is na 2 maanden injecteren het gehalte opgelost zuurstof gestegen tot groter dan 2 mg/l. Tijdens de SF<sub>6</sub>-test was al aangetoond dat deze filters onder invloed stonden van de luchtinjectie. Het feit dat deze filters na 2 maanden injectie een verhoging van de zuurstofconcentratie te zien geven, wordt verklaard door het feit dat alle zuurstof in de injectielucht

gedurende 2 maanden wordt verbruikt tijdens het transport van het injectiefilter naar de monitoringsfilters.

Bij een pompdebiet groter dan 7,5 l/s is sprake van uittreding van lucht in het Caland kanaal. Dit is een situatie die onwenselijk is. Tijdens deze fase bleek dat een injectie met het diepe filter met een pompdebiet van 7,5 l/s gedurende 10 minuten per uur het maximum was waarbij geen bubbels in het Caland kanaal uittreden.

### *Conclusie*

Uit variatie in de injectiedebieten blijkt dat het praktisch maximaal haalbare debiet wordt bepaald door het al dan niet uittreden van lucht in het Caland kanaal. Tijdens deze fase bleek dat een injectie met het diepe filter met een pompdebiet van 7,5 l/s gedurende 10 minuten per uur het maximum was waarbij geen bubbels uittreden

Uit interpretatie van de gegevens blijkt dat de omvang van de invloedsstraal nog niet voldoende kan worden vastgesteld doordat enerzijds er nog geen evenwichtssituatie is bereikt in de pilotproef en anderzijds er nog omissies zijn in de meetinformatie in het verspreidingsbeeld van opgelost zuurstof. Door het uitvoeren van een duurproef zal de toestand qua opgelost zuurstof op termijn in de pilotplant zich stabiliseren en kunnen definitieve uitspraken worden gedaan over de effectieve invloedsstraal.

Op basis van deze fase zijn de aanvullende 40 % van de monitoringspeilbuizen geplaatst. Het betreft de peilbuizen 22, 23, 311, 812, 82, 91, 92 en 101. De locaties van deze peilbuizen zijn weergegeven in bijlage B. Voor het bepalen van de locaties van de monitoringsfilters zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Uit metingen van opgelost zuurstof en SF<sub>6</sub> blijkt dat de relevante processen zich afspelen binnen de oorspronkelijke ingeschatte omvang van de pilot (20 m × 20 m) en zich beperken tot laag L3. Het wordt derhalve niet zinvol geacht om de pilotlocatie te vergroten of filters in andere lagen dan L3 te plaatsen.
- Een aantal ondiepe filters kon niet worden gebruikt vanwege de aanwezigheid van een drijf-laag. De belangrijkste reden daarvoor is dat de meetapparatuur niet bestand is tegen pure organische vloeistof. Op dezelfde locaties zijn nieuwe filters geplaatst op een iets grotere diepte.
- Om meer inzicht te hebben in de verticale verspreiding van zuurstof zijn ter plaatse van een aantal ondiepe filters extra filters geplaatst op een diepte van: 10,5 - 11,5 m-mv en 13 - 14 m-mv.
- Om meer inzicht te hebben in de horizontale verspreiding van zuurstof binnen een straal van 10 m zijn op 2 plaatsen nieuwe filters geplaatst. Op één plaats is een monitoringsfilter met een filter van 9 - 13 m-mv bijgeplaatst. Met dit filter is geëxperimenteerd om op verschillende diepten te kunnen bemonsteren. Dit heeft zowel technische als financiële voordelen boven meerdere filters op verschillende diepten.

### *Evaluatie*

Deze fase was oorspronkelijk niet gepland, maar heeft als gevolg van technische problemen toch plaatsgevonden. De duur van deze periode was circa 4 maanden. Vanwege de technische problemen zijn tijdens deze fase niet veel harde meetgegevens verzameld. Desondanks heeft deze fase in aanvulling op de voorgaande intensieve meetperiode waardevolle informatie opgeleverd die heeft bijgedragen aan een betere bedrijfsvoering tijdens de duurproef en een betere inschatting van de benodigde tijdsduur van de duurproef. Tevens werd duidelijk dat zuurstoftoename in de filters tijd vergt en dat daarom een lagere bemonsteringsfrequentie kan worden gehanteerd dan vooralsnog vanuit was gegaan.

#### 4.5.6 *Duurproef*

##### *Doelstelling*

Bepalen van de lange termijn effecten van luchtinjectie bij een constant debiet, injectiediepte en regime. Er wordt gestreefd naar het vaststellen van de effectieve invloedsstraal (EROI).

##### *Uitgevoerde werkzaamheden*

Als voorwaarde voor de duurproef was gesteld dat de injectievariabelen (debiet, regime en injectiediepte) gedurende de duurproef onveranderd zouden blijven.

Vooraf is de duur van de duurproef vastgesteld op 6 maanden. De duur van de proef is bepaald op basis van een inschatting van de effectiviteit van het systeem, de financiën van het project en de eisen van de eindgebruikers.

Om de effectieve invloedsstraal rond het diepe filter te maximaliseren is besloten om het debiet te verhogen naar 11 l/s. Hierbij trad soms luchtuitreding op in het Caland kanaal.

Gedurende de duurproef is de intensiteit van de monitoringsmetingen sterk gereduceerd tot 3 meetronden. Tijdens de meetronden zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- opgelost zuurstof in het grondwater;
- gasmetingen van zuurstof, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>;
- temperatuur;
- analyseren van het grondwater op aromaten bij de aanvang en bij het beëindigen van de duurproef.

Het debiet is gedurende het verdere verloop van de injectieproef constant gebleven.

##### *Resultaten*

##### ***Opgelost zuurstof in het grondwater***

De resultaten van de metingen van het opgelost zuurstof in het grondwater van de verschillende sublagen aan het eind van de duurproef zijn weergegeven in bijlage J. Hierin zijn de volgende tekeningen opgenomen:

- zuurstofconcentraties op drie diepten;
- dwarsprofielen met zuurstofconcentraties;
- CO<sub>2</sub>-concentraties van gas in de peilbuizen op drie diepten.

Met name in de verder en dieper gelegen filters (onderin laag L3) bleven de zuurstofconcentraties stijgen naarmate de duurproef vorderde. De in bijlage J weergegeven peilbuizen kunnen worden gezien als maximale concentraties.

De eindconcentraties van het opgelost zuurstofgehalte zijn weergegeven in tabel 4.

Op basis van de resultaten blijkt dat het overgrote deel van de monitoringsfilters een opgelost zuurstofconcentratie heeft groter dan 2 mg/l.

##### ***Zuurstof-, CH<sub>4</sub>- en CO<sub>2</sub>-gasmetingen in de peilbuizen***

De resultaten van de zuurstof- en CO<sub>2</sub>-gasmetingen gemeten aan het eind van de duurproef zijn weergegeven in tabel 4.

Uit deze resultaten blijkt dat in bijna alle monitoringsfilters sprake is van een verhoogd CO<sub>2</sub>-gehalte in vergelijking met de gemeten CO<sub>2</sub>-concentraties aan het begin van duurproef. Alle



gemeten CO<sub>2</sub>-concentraties liggen significant hoger dan de concentratie in de buitenlucht van 0,03 V%.

In de meeste peilbuizen wordt een zuurstofgehalte gemeten dat aanzienlijk lager ligt dan 20 %. Bij de meeste peilbuizen is het zuurstofgehalte omgekeerd evenredig met het CO<sub>2</sub>-gehalte. Dit betekent dat de zuurstof in de lucht wordt omgezet in CO<sub>2</sub> en dus wordt gebruikt voor biologische afbraak.

Tabel 4. Gasmetingen in de peilbuizen aan het einde van de duurproef.

monitoringsfilter	CO <sub>2</sub> V%	O <sub>2</sub> V%	bubbelt ja/nee	afbraak ja/nee
11	3,25	16,3	ja	ja
12	4,30	16,5	ja	ja
13	> 6	8,7	ja	ja
14	0,54	20,2	ja	ja
21	3,65	17,1	ja	ja
22	2,60	18,4	ja	ja
23	3,59	15,1	nee	ja
32	0,97	20,2	ja	ja
33	2,01	19,2	ja	ja
40	0,16	20,5	nee	nee
42	4,16	16,5	ja	ja
43	2,21	18,1	ja	ja
51	> 6	3,6	nee	ja
51	> 6	6,7	nee	
52	> 6	10,4	ja	ja
53	> 6	4,92	ja	ja
60	5,08	10,5	nee	ja
61	5,09	0,2	nee	ja
62	> 6	0,0	nee	ja
63	> 6	0,4	nee	ja
71	3,64	16,5	nee	ja
72	> 6	2,3	ja	ja
82	0,40	19,9	ja	ja
91	0,97	19,9	ja	ja
92	0,90	19,9	ja	ja
101	3,68	17,5	nee	ja
311	2,37	18,4	ja	ja
811	> 6	0,1	ja	ja
812	> 6	8,7	nee	ja

### **Temperatuur van het grondwater**

Voor aanvang van de pilotproef bedroeg de temperatuur van het grondwater 10,8 à 10,9 °C. Na afloop van de duurproef zijn de volgende temperaturen gemeten:

- ondiep: 13,2 à 13,7 °C;
- middeldiep: 13,2 à 13,5 °C;
- diep: 11,5 à 12,3 °C.

Alle filters zijn 1 à 3 graden in temperatuur gestegen.

Hiervoor zijn twee mogelijke verklaringen:

- opwarming van de grond als gevolg van injectie van warme lucht;
- opwarming van de grond als gevolg van biologische activiteit.

De duurproef is uitgevoerd gedurende de wintermaanden zodat geen sprake kan zijn van opwarming door de geïnjecteerde lucht. De verklaring van opwarming als gevolg van biologische activiteit wordt realistisch geacht. Ook bij andere biologische saneringen blijkt de temperatuur van de bodem sterk op te kunnen lopen als gevolg van biologische activiteit.

### **Aromaten in het grondwater**

De resultaten van het analyseren van het grondwater op aromaten en minerale olie zijn weergegeven in bijlage C, in de vorm van een tabel en overzichtskaarten. Uit deze resultaten blijkt dat het gehalte aromaten in het grondwater in de loop van het project gemiddeld significant is afgenomen. Er wordt globaal geschat dat de concentraties gemiddeld zijn afgenomen tot 50 % van de oorspronkelijke concentraties.

### **Conclusie**

Uit de duurproef kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Tijdens de duurproef blijken de zuurstofconcentraties in een groot deel van de ondiepe en middeldiepe filters te stijgen tot boven de 2 mg/l. In enkele diepe filters blijven de zuurstofconcentraties laag.
- De filters waar de zuurstofconcentraties stijgen vallen binnen de effectieve invloedsstraal, omdat ter plaatse van die filters de biologische afbraak niet wordt beperkt door beschikbaarheid van zuurstof.
- Er is geen sprake van een beperkt aantal voorkeurskanalen waardoor alle geïnjecteerde lucht ontsnapt.
- Naar verwachting is de effectieve invloedsstraal op termijn gelijk aan de technische invloedsstraal. Er kan uit de duurproef niet worden afgeleid wanneer dat moment is bereikt.
- Voor de effectieve invloedsstraal kunnen de volgende inschattingen worden aangehouden:
  - ondiep: 6 à 10 m in de richting loodrecht op de stromingsrichting;  
10 à 20 m in de richting van de grondwaterstroming;
  - middeldiep: 6 à 10 m;
  - diep: 3 à 6 m.

### **Evaluatie**

In een sterk verontreinigd gebied is een duurproef essentieel om iets te kunnen zeggen over lange termijn effecten. In de beginperiode wordt alle beschikbare zuurstof direct gebruikt voor afbraak van de aanwezige verontreinigingen. Pas na een periode van enkele maanden begint het zuurstofgehalte in de wat verdere omgeving van het injectiepunt op te lopen.

#### 4.5.7 Inundatieproef

##### *Doelstelling*

Het doel van de brandweerproef is het bepalen waar lucht die afkomstig is van het perslucht-injectiesysteem uittreedt naar het maaiveld. Dit is met name gericht op het aantonen van de aanwezigheid van eventuele grote voorkeurskanalen.

##### *Uitgevoerde werkzaamheden*

Door de brandweer van Kuwait Petroleum is de gehele proeflocatie zoveel mogelijk onder water gezet. Op die plaatsen waar lucht uit de bodem treedt is sprake van bubbelen.

Vervolgens is het terrein bedekt met een laag blusschuim. Hierdoor wordt het ontstaan van bubbels als gevolg van de uittreding van lucht beter zichtbaar.

In bijlage K zijn foto's opgenomen van de proef.

##### *Resultaten*

In bijlage K is een tekening opgenomen waarop is aangegeven waar werd geconstateerd dat lucht uittrad.

Tijdens de proef bleek dat de lucht op veel verschillende plaatsen naar boven kwam, echter niet aan de zuidzijde.

Er kwam veel lucht omhoog in de zone tussen het injectiepunt en het Caland kanaal.

Er kwam lucht omhoog op de grens van het KPE-terrein. Deze plaats ligt op een afstand van circa 50 m vanaf het injectiepunt, loodrecht op de richting van de grondwaterstroming. De vermoedelijke oorzaak van deze luchtstroom is de aanwezigheid van een aantal diepe peilbuizen op die locatie en de horizontale gelaagdheid. Deze veroorzaken naar verwachting een kortsluitstroming.

##### *Conclusie*

Uit de inundatieproef is het volgende geconcludeerd:

- Er is *geen* sprake van sterke voorkeurskanalen waardoor een groot deel van de geïnjecteerde lucht ontsnapt. De lucht lijkt via een groot aantal kleine kanaaltjes naar het maaiveld te stromen. Dit duidt erop dat een groot deel van de bodem wordt geaëreerd.
- De stroming van geïnjecteerde lucht wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van het Caland kanaal.

##### *Evaluatie*

De inundatieproef is een goed uitvoerbare proef om direct een indruk te krijgen van de stromingspatronen van de geïnjecteerde lucht. Het geeft een goed beeld van de TROI en het geeft een duidelijke indicatie voor de mate waarin voorkeurskanalen ontstaan.

Een versturende factor en een mogelijke foutenbron is het feit dat er tussen de grondwater-spiegel en het maaiveld een stuk onverzadigde zone is waar de uittredende lucht mogelijk andere wegen volgt of dispergeert.

De inundatieproef is in een vrij laat stadium van het project uitgevoerd. Het is aan te bevelen om de proef in het beginstadium van een project uit te voeren. De resultaten kunnen dan worden gebruikt om de locaties van de peilbuizen te kiezen.

#### 4.5.8 *Respiratieproef*

##### *Doelstelling*

Het vaststellen van het verbruik van zuurstof in de tijd om daarmee inzicht te krijgen in de mate van biologische activiteit. De snelheid waarmee de zuurstofconcentratie in het grondwater afneemt, nadat de luchtinjectie is gestopt, is een belangrijk gegeven voor de dimensionering en bedrijfsvoering van een full-scale systeem.

##### *Uitgevoerde werkzaamheden*

De respiratieproef bestaat uit het meten van het opgelost zuurstof in alle monitoringspeilbuizen nadat de persluchtinjectie met behulp van het diepe filter is uitgezet. In een tweetal peilbuizen wordt de zuurstofconcentratie continu gemeten (pb 101 en pb 32). De respiratieproef heeft direct na de duurproef plaatsgevonden.

##### *Resultaten*

In bijlage L zijn de volgende tekeningen opgenomen waarmee de resultaten van de respiratieproef zijn weergegeven:

- dwarsprofielen met zuurstofconcentraties op 6 verschillende tijdstippen tijdens de respiratieproef;
- grafieken met continu gemeten zuurstofconcentraties in twee peilbuizen.

Uit de metingen blijkt dat de zuurstofconcentraties in circa 24 uur afnemen tot nagenoeg 0 mg/l.

De afnamecurve kan worden opgedeeld in tweeën. Tijdens het eerste deel blijft de zuurstofconcentratie relatief hoog. In het tweede deel daalt de concentratie snel. Een verklaring daarvoor is het feit dat er een hoeveelheid lucht is opgeslagen in het bodemsysteem waardoor nalevering van zuurstof optreedt. Als de nalevering stopt, dalen de concentraties snel naar 0 mg/l.

Een opvallend fenomeen is de invloed van getijdebewegingen op de zuurstofconcentraties. Tijdens de respiratieproef vertonen de zuurstofconcentraties een dalende trend, maar daarbinnen stijgen en dalen de zuurstofconcentraties in een cyclus die overeenkomt met de getijdebewegingen. Hiervoor kan geen verklaring worden gegeven maar is wel iets om nader onderzoek naar te verrichten.

##### *Conclusies*

- Na het stoppen van de luchtinjectie dalen de zuurstofconcentraties naar 0 mg/l. Een deel van de lucht wordt opgeslagen in de bodem en zorgt voor nalevering op het moment dat de luchtinjectie stopt.
- Het feit dat de zuurstofconcentraties relatief snel teruglopen naar 0 mg/l duidt op een sterke biologische activiteit.

##### *Evaluatie*

De respiratieproef is een goed uitvoerbare proef die veel informatie oplevert. De proef kan worden beschouwd als essentieel bij de uitvoering van een pilotplant.

Het gebruik van continumeters in een aantal peilbuizen is aan te bevelen.

#### 4.5.9 *Samenvatting veldproeven pilotplant*

In tabel 5 worden de veldproeven genoemd die zijn uitgevoerd tijdens deze pilotplant. Tevens is aangegeven wat de waardering is en zijn een aantal opmerkingen geplaatst.

Tabel 5. Overzicht van uitgevoerde veldproeven tijdens de pilotproef.

activiteit	waardering <sup>1</sup>	opmerkingen
nulmeting	4	noodzakelijk voor interpretatie van meetgegevens
meetparameters:		temperatuur is vooral aan te bevelen omdat het makkelijk te meten is; het is echter van belang dat er referentiemetingen beschikbaar zijn buiten invloedsgebied.
- aromaten	4	
- zuurstof	4	
- temperatuur	4	
- CO <sub>2</sub> en zuurstof in peilbuizen	3	
SF <sub>6</sub> -tests	3	praktisch moeilijk uitvoerbaar en relatief kostbaar; het is moeilijk om veel te variëren met injectiedebiet en/of -diepte
intensieve meetronde	4	het is noodzakelijk om te onderzoeken of het systeem technisch goed werkt voordat langere proeven worden uitgevoerd; er moet rekening worden gehouden met een tijdsduur van 4 weken
langdurige experimenteerfase	2	indien de eerste intensieve periode lang genoeg is, is deze fase niet nodig
duurproef	4	zeker in een sterk verontreinigd gebied duurt het lange tijd voordat zuurstofmetingen een goed beeld geven
respiratieproef	4	kan één keer aan het eind van de proefperiode, maar liever vaker tijdens de duurproef
inundatieproef	3	geeft goed inzicht, maar kan praktische problemen geven; deze proef wordt bij voorkeur in het begin van het project uitgevoerd

- <sup>1</sup> 4 = essentiële informatie  
 3 = belangrijke en relevante informatie  
 2 = minder zinvol, maar wel inzicht verhogend  
 1 = niet zinvol

#### 4.6 Conclusies van de pilotproef

##### 4.6.1 Invloedsstraal

Een ontwerp van een persluchtinjectiesysteem bestaat in feite uit het vaststellen van de locaties en de diepten waarop de persluchtinjectiefilters worden geplaatst. Om dit te kunnen dient de **invloedsstraal** van een filter op verschillende diepten bekend te zijn.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de **Effectieve Invloedsstraal (EROI)** en de **Technische Invloedsstraal (TROI)**. Deze begrippen zijn in 2.5 nader toegelicht. Na verloop van tijd zullen de **EROI** en de **TROI** praktisch gelijk zijn. Hoe lang deze periode duurt hangt af van de bodemopbouw, de verontreinigingsgraad en het injectiedebiet. Er moet rekening worden gehouden met een tijdsduur in de orde van grootte van jaren.

Als uit de doelstelling blijkt dat de saneringsmaatregelen op korte termijn tot resultaten moeten leiden, zal het ontwerp moeten worden gebaseerd op een **EROI** die kleiner is dan de **TROI**.

##### 4.6.2 Voorbereidend onderzoek

Voordat het voorbereidend onderzoek is uitgevoerd is de **locatie van de pilotplant** vastgesteld op basis van:

- de verontreinigingssituatie;
- de risico's voor het optreden van **voorkeursstroming**. In dit geval is ervoor gekozen om de injectiefilters op circa 30 m vanaf het Caland kanaal te plaatsen.

Voorafgaand aan het voorbereidend onderzoek is tevens een inschatting gemaakt van de invloedstraal van de luchtinjectie. Deze is gelijkgesteld aan de diepte van de luchtinjectie ten opzichte van de grondwaterstand, dus circa 10 m. De omvang van de pilotplant is daarom vastgesteld op  $20 \times 20 \text{ m}^2$ .

In 4.3.4 (zie tabel 1) is een overzicht gegeven van een aantal onderzoeksmethoden met een daaraan gekoppelde waardering. Hieruit kan worden afgeleid dat het volgende onderzoek in een sterk gelaagde bodem van **essentieel** belang wordt geacht:

- sonderingen voor de ruimtelijke variabiliteit;
- peilbuizen voor bemonstering en grondwaterstanden;
- chemische analyses verontreinigingen.

Hiernaast zijn andere onderzoeksmethoden beschikbaar die nuttige en belangrijke informatie geven, maar niet van essentieel belang zijn.

- Ackermann-boring met foto voor de bodemopbouw;
- falling headtests en zeefkrommen voor het bepalen van doorlatendheden;
- chemische analyses macroparameters voor de redoxtoestand;
- Ackermann-boring voor het nemen van ongeroerde monsters;
- kolomproeven en schudtests voor de biologische beschikbaarheid van verontreinigingen;
- continumetingen stijghoogten voor wisselende grondwaterstanden.

De resultaten van het voorbereidend onderzoek zijn weergegeven in 4.3.3.

#### 4.6.3 *Installeren pilotplant*

De pilotplant bestaat uit de volgende hoofdonderdelen:

- persluchtsysteem;
- injectiefilters;
- monitoringsfilters.

Het **persluchtsysteem** dient zodanig te worden uitgevoerd dat er voldoende druk en debiet mee kan worden geleverd. De druk en het debiet en de tijdsintervallen tussen de injectieperioden kunnen worden gevarieerd.

Er zijn drie **injectiefilters** geplaatst op verschillende diepten (boven, midden en onder in laag L3). Om kortsluitstroming tussen de 3 filters te voorkomen zijn de filters op een onderlinge afstand van circa 2 m geplaatst. Om **kortsluitstroming langs** het injectiefilter te voorkomen is het boorgat zorgvuldig afgesloten.

Er zijn 30 **monitoringsfilters** geplaatst in 2 fasen op 10 verschillende locaties. In verband met het optreden van kortsluitstroming van geïnjecteerde lucht via de monitoringsfilters zijn deze voorzien van een afsluitbare dop. De peilbuizen zijn geplaatst door middel van drukken, zodat het risico voor kortsluitstroming langs de peilbuis is geminimaliseerd.

#### 4.6.4 *Nulmeting*

Op basis van de nulmetingen blijkt dat:

- de bodem ter plaatse van de proeflocatie anaëroob is en er derhalve geen sprake is van (aërobe) natuurlijke afbraak;
- er zeer hoge gehalten aromaten in het grondwater aanwezig zijn. Het betreft de stoffen benzeen en ethylbenzeen en in mindere mate toluen en styreen;

- er sprake is van een drijf laag.

#### 4.6.5 *Uitvoering pilotplant*

De pilotplant is in de volgende fasen uitgevoerd:

- een intensieve beginperiode. Tijdens deze fase is een **tracertest** uitgevoerd met behulp van SF<sub>6</sub>;
- een lange experimenteerfase;
- het bijplaatsen van monitoringsfilters;
- een duurproef. Tijdens deze fase is een **inundatieproef** uitgevoerd;
- een respiratieproef.

Tijdens de proef bleek dat er bij een debiet van meer dan 7,5 l/s lucht uittreedt in het Caland kanaal. Aangezien dit als ongewenst wordt beschouwd is 7,5 l/s het maximumdebiet.

Uit de verschillende proeven bleek dat er geen sprake is van vorming van sterke voorkeurskanalen. De lucht verspreidt zich door de bodem in een dicht netwerk van fijne kanaaltjes. Er wordt daarom geconcludeerd dat de bodem voor een groot deel wordt geaëreerd.

Er is geconcludeerd dat injectie in het onderste deel van laag L3 het meest effectief is. Op basis van de metingen zijn bij diepe injectie op de drie onderscheiden diepten de onderstaande effectieve invloedsstralen gevonden:

- ondiep:        6 à 10 m in de richting loodrecht op de stromingsrichting;  
                  10 à 20 m in de richting van de grondwaterstroming;
- middeldiep: 6 à 10 m;
- diep:         3 à 6 m.

De conclusie kan worden getrokken dat het mogelijk is om met behulp van luchtinjectie een scherm te creëren waarbinnen alle aanwezige en met het grondwater aangevoerde verontreinigingen aëroob worden afgebroken.

### MODELMATIGE BESCHRIJVING VAN DE PILOTPLANT

#### 5.1 Inleiding

Het uitvoeren van een pilotplant is van groot belang voor het bepalen van de haalbaarheid van een full-scale sanering. De pilotplant heeft inzicht gegeven in belangrijke technische aspecten, zoals de invloedsstraal, de uittrekking naar het maaiveld en het zuurstofverbruik (tijdens de stopproef). Hierdoor is een beter inzicht verkregen in de effecten die optreden bij het in werking stellen van de persluchtinjectie. Hoewel de pilotplant dus een essentieel onderdeel vormt bij het ontwerpen van een full-scale sanering, levert het niet *alle* informatie die nodig is. Immers, de experimenten op zich geven geen direct inzicht in het verwachte saneringseffect op lange termijn. Daarnaast zijn de experimenten uitgevoerd met geen of slechts een beperkte variatie in parameters als doorlatendheid van de bodem, injectiedebiet en injectiediepte. De resultaten van de pilotproef lenen zich echter wel voor extrapolatie. Wanneer de parameters en de meetresultaten aan elkaar kunnen worden gekoppeld via een deterministisch model, kan dit model vervolgens worden gebruikt om voor andere parameters de meetresultaten te voorspellen.

In bijlage M wordt verslag gedaan van het gehele modelleringsonderzoek. In dit hoofdstuk wordt kort de aanpak besproken en worden de resultaten weergegeven.

#### 5.2 Doelstelling

De doelstelling van de modellering is als volgt geformuleerd:

*Het opzetten en toepassen van een model dat algemeen kan worden ingezet bij het voorspellen van het verloop en resultaat van een sanering door middel van persluchtinjectie in een slecht doorlatende en gelaagde bodem.*

#### 5.3 Aanpak

In hoofdstuk 2 worden de processen die in de bodem plaatsvinden opgesomd:

- P1 Hoe stroomt de geïnjecteerde lucht door de grond?
- P2 Hoe verloopt de overdracht van zuurstof vanuit de voorkeursstroombanen naar het grondwater?
- P3 Hoe verloopt het transport en de verspreiding van opgeloste zuurstof door de bodem?
- P4 Hoe verloopt het transport van verontreinigingen in het grondwater naar de aërobe zone?

Modelleringsonderzoek is een middel om tot beantwoording van deze procesvragen te komen. De modellering is in twee afzonderlijke delen gesplitst (in bijlage M wordt nader ingegaan op deze keuze):

1. beschrijving van de luchtstroming zodat de concentratie opgelost zuurstof kan worden bepaald;
2. beschrijving van alle processen (met uitsluiting van de luchtstroming zelf) zodat de pilotplant kan worden gemodelleerd.

In het eerste deel wordt aandacht besteed aan de luchtstroming. In dit deel komt vooral vraag P1 aan bod. In het tweede deel komen de vragen P3 en P4 aan de orde. Vraag P2 laat zich niet eenvoudig beantwoorden. Desalniettemin is getracht door middel van een aantal eenvoudige inschattingen inzicht te krijgen in de zuurstofoverdracht.



De belangrijkste basis voor het opstellen van een model wordt gevormd door de beschikbare meetgegevens. In tabel 6 is aangegeven welke meetgegevens als invoer hebben gediend voor het model.

Tabel 6. Gebruikte invoerparameters.

benodigde invoerparameters	gebruikte meetgegevens
laagdikten, porositeit	boorbeschrijvingen, sonderingen, foto
doorlatendheden	boorbeschrijvingen, falling headtests, korrelgrootte
stromingsvectoren	geohydrologisch model en stijghoogten
initiële concentraties BTEX	analyses van het grondwater
omvang van de invloedsstraal	zuurstofmetingen
concentratie zuurstof in de invloedsstraal	zuurstofmetingen en modelberekening voor gasverzadiging
afbraakconstanten	analyses van het grondwater, zuurstofmetingen tijdens de stopproef, literatuurwaarden
diffusiecoëfficiënt	literatuur
dispersiecoëfficiënt	literatuur

Bij persluchtinjectie in een heterogene bodem spelen grondwaterstroming en luchtstroming ten gevolge van persluchtinjectie een grote rol. De biologische afbraak van de verontreiniging bepaalt het uiteindelijke saneringsresultaat. Adsorptie veroorzaakt een vertraging in het transport van de verontreiniging. Al deze processen dienen te worden meegenomen om een adequate beschrijving van de sanering te geven.

In het eerste deel is voornamelijk onderzocht op welke wijze parameters als injectiedebiet, injectiediepte en bodemeigenschappen de invloedsstraal van het persluchtinjectiefilter beïnvloeden. In het tweede onderdeel heeft de nadruk gelegen op het extrapoleren van de resultaten van de pilotplant.

#### 5.4 Resultaten

Ten aanzien van de pilotproef kunnen op basis van modelmatige berekeningen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Indicatieve berekeningen hebben aangetoond dat de voorgestelde dimensionering van de duurproef naar alle waarschijnlijkheid correct is. Dit kan worden geconcludeerd op basis van twee observaties:
  - bij een zuurstofoverdracht van 0,5 % van de gasfase naar de waterfase is het grondwater in principe voldoende geaëreerd om de verontreiniging geheel af te breken;
  - bij de gegeven stromingssnelheid en verontreinigingsconcentraties kan de verontreiniging ter hoogte van het beluchtingsgebied in principe volledig worden afgebroken, gebaseerd op literatuurwaarden voor de afbraaksnelheid.
2. Er bestaan momenteel geen computermodellen die een persluchtinjectiesysteem in zijn geheel mathematisch kunnen beschrijven. Op basis van literatuur, waarin wordt aangetoond dat de invloed van de luchtstroming op de waterstroming kan worden verwaarloosd, is het echter toegestaan het luchttransport en het watertransport afzonderlijk modelmatig te beschrijven. Dit heeft als gevolg dat voor de beschrijving van persluchtinjectie twee modellen nodig zijn:
  - een meerfase-stromingsmodel: dit model dient ter bepaling van de invloedsstraal van de persluchtinjectie;
  - een transportmodel dat zowel chemische als biologische processen meeneemt: dit model dient ter bepaling van de mate van afbraak ten gevolge van de persluchtinjectie.

In dit project is gekozen voor MUFIS als meerfase-stromingsmodel en MODFLOW/RT3D als transportmodel. De bruikbaarheid van het zeer recent verschenen model RT3D bleek zeer goed te zijn.

3. De resultaten van het meerfase-stromingsmodel zijn als volgt:
  - in een gelaagde bodem stijgt de technische invloedsstraal bij een toename van het injectiedebiet of de heterogeniteit. Een grotere injectiediepte heeft echter nauwelijks invloed meer vanaf een diepte van 4 m;
  - in een heterogene, gelaagde bodem bepaalt een zeer sterke heterogeniteit de technische invloedsstraal. Injectiedebiet en injectiediepte hebben vanaf een bepaald niveau (ongeveer 2 l/s en 4 m) nauwelijks invloed op de invloedsstraal.
4. De resultaten van het transportmodel zijn als volgt:
  - de afname van de BTEX-concentratie is ongeveer gelijk aan 0,8 mg/l-d;
  - de doorstromingstijd van het grondwater door de invloedsstraal is ongeveer 200 dagen;
  - de transporttijd van de verontreiniging door de invloedsstraal is circa 6 jaar;
  - de BTEX-verontreiniging in de geaëreerde zone wordt geheel afgebroken;
  - het persluchtinjectiesysteem is in staat om toestromende - nieuwe - verontreinigingen geheel af te breken voordat ze het geaëreerde gebied verlaten.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat modellering van een persluchtinjectiesysteem een bijdrage kan leveren aan:

- de dimensionering van het systeem (a priori);
- de bepaling van de verwachte invloedsstraal;
- de bepaling van het saneringseffect op de lange termijn.

Eén van de doelstellingen van dit onderdeel van het project is het opstellen van een generiek model dat algemeen kan worden ingezet voor gelaagde en slecht doorlatende gronden. Voor de KPE-proeflocatie is gebleken dat het goed mogelijk is een modelmatige beschrijving te geven van de processen tijdens de pilotproef. In principe kan ditzelfde proces doorlopen worden voor andere locaties. Het is echter niet mogelijk om stappen over te slaan. Daarnaast zullen in alle gevallen metingen noodzakelijk zijn om het model te ijken.

De meest bepalende factor voor de invloedsstraal blijkt de bodemopbouw te zijn. De gelaagdheid van de bodem heeft een zeer sterke invloed op de luchtstroming. Een schatting van de invloedsstraal kan daarom ook alleen worden gemaakt wanneer de bodemopbouw op de locatie bekend is. Het is niet mogelijk om in het algemeen een uitspraak te doen over de invloedsstraal. Omdat het vaak ook lastig is om de bodemopbouw goed in kaart te brengen, kan de invloedsstraal in sommige gevallen wellicht beter via metingen worden bepaald. Dit kan via DO-metingen in peilbuizen, tracertests of door middel van een inundatieproef. Wanneer deze onderzoeksinspanning niet gewenst of mogelijk is, kan een persluchtinjectiesysteem sterk overgedimensioneerd worden.

In dit geval is er een schatting van de invloedsstraal gemaakt op basis van metingen. A priori-modellering is dus niet mogelijk gebleken. Het is gebleken dat vrijwel altijd metingen nodig zijn voor het opstellen van het model.

Hoewel het dus niet mogelijk is een generiek model op te stellen voor dit soort systemen, is het wél mogelijk om door middel van berekeningen met het aan metingen gekoppeld model uitspraken te doen over het saneringsverloop. Metingen maken het dus mogelijk om een goed model op te stellen en dit model kan vervolgens de meetresultaten extrapoleren in de tijd.



## HOOFDSTUK 6

# METHODIEK VOOR HET ONTWERPEN VAN EEN BIOLOGISCH SCHERM OP BASIS VAN LUCHTINJECTIE

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt, op basis van de in de voorgaande hoofdstukken beschreven onderzoeksresultaten, een voorstel gedaan voor een strategie die kan worden gevolgd bij het ontwerp van een luchtinjectiesysteem een slecht doorlatende en gelaagde bodem.

Voordat kan worden begonnen met het ontwerp van het luchtinjectiesysteem dient de doelstelling van de sanering te worden vastgesteld.

De doelstelling van de sanering vormt de basis voor het ontwerp en wordt vastgesteld in het saneringsonderzoek. Daarin wordt de keus gemaakt of het systeem gericht is op beheersing of verwijdering (al dan niet volledig) van de verontreiniging.

Daarnaast wordt vastgesteld op welke termijn de saneringsmaatregelen moeten leiden tot de gewenste eindconcentraties.

In de volgende paragrafen staan de stappen beschreven die doorlopen moeten worden om te komen tot het ontwerp van een full-scale luchtinjectiesysteem.

### 6.2 Stap 1: Vertaling van doelstelling naar ontwerpcriteria

Een ontwerp van een persluchtinjectiesysteem bestaat in feite uit het vaststellen van de locaties en de diepten waarop de persluchtinjectiefilters worden geplaatst. Om dit te kunnen dient de **invloedsstraal** van een filter op verschillende diepten bekend te zijn.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de **Effectieve Invloedsstraal (EROI)** en de **Technische Invloedsstraal (TROI)**. Deze begrippen zijn in 2.5 nader toegelicht. Na verloop van tijd zullen de **EROI** en de **TROI** gelijk zijn. Hoe lang deze periode duurt hangt af van de bodemopbouw en de verontreinigingsgraad. Er moet rekening worden gehouden met een tijdsduur in de orde van grootte van jaren.

Als uit de doelstelling blijkt dat de saneringsmaatregelen op korte termijn tot resultaten moeten leiden, zal het ontwerp moeten worden gebaseerd op een **EROI** die kleiner is dan de **TROI**.

### 6.3 Stap 2: Maken van voorlopig ontwerp van het systeem

De tweede stap in het ontwerpproces is het maken van een globaal ontwerp van het saneringssysteem, waarbij gebruik wordt gemaakt van a priori kennis. Het globale ontwerp bevat de volgende onderdelen:

- diepte van de luchtinjectie;
- onderlinge afstand tussen de injectiefilters, dus de EROI;
- injectiedebiet en injectiedruk.

De **diepte** van de injectie wordt bepaald door:

- de aanwezigheid van verontreinigingen:  
De injectie vindt plaats onder de te saneren verontreinigingen.

- de aanwezigheid van weerstandbiedende lagen:  
Een continu aanwezige scheidende laag kan een barrière vormen voor de opstijgende lucht. Indien verontreinigingen zich boven een dergelijke laag bevinden, dient luchtinjectie in ieder geval ook boven die laag te worden geïnjecteerd. Het is niet mogelijk om exact aan te geven bij welke dikte en weerstand in het ontwerp expliciet rekening moet worden gehouden met een scheidende laag. Vaak betekent een dergelijke laag ook een duidelijke scheiding in verontreinigingsgraad.

Voor een globale inschatting van de **invloedsstraal** van een luchtinjectiefilter kan gebruik worden gemaakt van de nomogrammen die zijn opgenomen in het CUR/NOBIS-rapport 95-1-13 'Biosparging and Bioventing, Expert Support System' (verschenen in oktober 1996). Uit deze nomogrammen blijkt dat de invloedsstraal sterk wordt bepaald door de anisotropie ( $k_v/k_h$ ) van de bodem. Met name in een slecht doorlatende en gelaagde bodem is de anisotropiefactor niet bekend en kan deze per sublaag sterk verschillen. De nomogrammen geven een goed inzicht in de mogelijke spreiding qua invloedsstraal en dus qua kosten van het full-scale systeem.

Het **injectiedebiet** en de **injectiedruk** zijn direct gerelateerd. Over het algemeen wordt een injectiedruk aangehouden van de hydrostatische druk + 0,5 bar. Welk debiet daarbij hoort hangt sterk af van de doorlatendheid van de bodem. Een hoger debiet kan worden gerealiseerd door de injectiedruk te verhogen. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de injectiedruk niet groter mag zijn dan de korrelspanning ter plaatse van het filter.

Er zijn momenteel **geen modellen** op de markt waarmee op basis van gedetailleerde bodemgegevens een nauwkeurige en betrouwbare voorspelling van de stroming van lucht kan worden gegeven. Bestaande modellen kunnen echter uitstekend worden ingezet in het kader van een interpretatie van de resultaten.

Op basis van het globale ontwerp en de onzekerheden daarin kan een globale kostenraming van het full-scale systeem worden gemaakt.

#### 6.4 **Stap 3: Keus of er onderzoek wordt uitgevoerd**

De belangrijkste variabele in het maken van een ontwerp voor luchtinjectie is de bodemopbouw. In Nederland kan de bodemopbouw over korte afstanden sterke verschillen vertonen. Ook bodems die op basis van boorgegevens niet lijken te verschillen kunnen een totaal verschillend stromingsbeeld van geïnjecteerde lucht veroorzaken.

Om een goed ontwerp te maken voor een full-scale sanering is lokaal onderzoek nodig in de vorm van een **praktijkproef**.

Het is echter mogelijk om een in situ sanering uit te voeren op basis van een globaal ontwerp dat tot stand is gekomen op basis van a priori kennis, zoals hierboven is beschreven. Dit kan het geval zijn als er ervaringen zijn opgedaan in vergelijkbare bodems. Andere redenen voor het achterwege laten van onderzoek kunnen zijn dat de kosten van het onderzoek te hoog zijn in verhouding tot de maximaal te verwachten kosten van een full-scale sanering of dat het full-scale systeem voor een bepaalde tijd moet zijn geïnstalleerd.

In het geval dat er geen ontwerp wordt gemaakt of onderzoek wordt uitgevoerd is het aan te bevelen om een sterk overgedimensioneerd, flexibel en stuurbaar systeem te maken. Dit betekent dat het aantal injectiefilters minimaal twee keer zo groot moet zijn dan op basis van de geschatte invloedsstraal wordt verwacht. Tevens moeten per injectiefilter 1 à 2 monitoringsfilters worden geïnstalleerd om te kunnen monitoren.

Ondanks een overmaat aan voorzieningen kan niet worden uitgesloten dat zich tijdens de uitvoering onverwachte problemen voordoen. Vaak hebben die te maken met het voorkomen van nooit eerder waargenomen verschillen in doorlatendheid van de bodem of met een ongelukkige combinatie tussen specifieke bodemeigenschappen en de gehanteerde materialen.

Indien het zinvol wordt geacht om onderzoek uit te voeren ten behoeve van het ontwerp van een full-scale sanering wordt aanbevolen om de volgende stappen te doorlopen.

#### 6.5 **Stap 4: Voorbereidend onderzoek**

Het voorbereidend onderzoek dient te worden uitgevoerd op de **locatie van de pilotplant**. Deze wordt bepaald door de factoren die van invloed zijn op de effectiviteit van de saneringsmaatregelen. In het geval van persluchtinjectie zijn dat met name kanalen waardoor **luchtstroming** optreedt.

Tijdens het voorbereidend onderzoek dient nadrukkelijk en binnen ruime afstand buiten de pilotplant (> 100 m) te worden gezocht naar mogelijkheden voor het optreden van voorkeursstroming. Evidente risico's voor het optreden van voorkeursstroming worden altijd gevormd door oppervlaktewater, dat direct in contact staat met het grondwater waarin de maatregelen worden getroffen. Daarnaast kan voorkeursstroming worden veroorzaakt door peilbuizen en gaten in een scheidende laag, zoals zandpalen.

Meestal wordt voorkeursstroming als nadelig ervaren, omdat dan slechts een deel van de bodem wordt geaëreerd. Er kan echter bewust gebruik worden gemaakt van het optreden van voorkeursstroming om de invloedsstraal van de persluchtinjectie te vergroten of een bepaalde kant op te richten.

Als de locatie van de pilotplant bekend is, kan het voorbereidend onderzoek worden uitgevoerd. In 4.3.4 is een overzicht gegeven van een aantal onderzoeksmethoden met een daaraan gekoppelde waardering. Hieruit kan worden afgeleid dat het volgende onderzoek in een sterk gelaagde bodem van **essentieel** belang wordt geacht:

- sonderingen voor de ruimtelijke variabiliteit;
- peilbuizen voor bemonstering en grondwaterstanden;
- chemische analyses verontreinigingen.

Hiernaast zijn andere onderzoeksmethoden beschikbaar die nuttige en belangrijke informatie geven, maar niet van essentieel belang zijn.

- Ackermann-boring met foto voor de bodemopbouw;
- falling headtests en zeefkrommen voor het bepalen van doorlatendheden;
- chemische analyses macroparameters voor de redoxtoestand;
- Ackermann-boring voor het nemen van ongeroerde monsters;
- continumetingen stijghoogten voor wisselende grondwaterstanden;
- kolomproeven en schudtests voor de biologische beschikbaarheid van verontreinigingen.

#### 6.6 **Stap 5: Installeren van de pilotplant**

Een pilotplant voor persluchtinjectie bestaat uit de volgende hoofdonderdelen:

- persluchtsysteem;
- injectiefilters;
- monitoringsfilters.

De materialen die worden gebruikt voor de installatie van de pilotplant dienen overeen te komen met de materialen die in het full-scale systeem worden gebruikt.

Het **persluchtsysteem** moet zodanig worden uitgevoerd dat er minimaal een druk van 4 bar en een debiet van 200 m<sup>3</sup>/uur mee kan worden geleverd. De druk en het debiet en de tijdsintervallen tussen de injectieperioden moeten kunnen worden gevarieerd.

Indien wordt verwacht dat de beschikbaarheid van nutriënten een beperkende factor kan worden is het aan te bevelen om een nutriëntendoseringsinstallatie aan het systeem toe te voegen.

In een gelaagde bodem levert het gebruik van één lang filter het risico dat de lucht alleen ter plaatse van de best doorlatende bodemlaag het filter verlaat. Het verdient daarom de voorkeur om **korte** filters (0,2 à 1 m) te gebruiken.

De **spleetdiameter** van de injectiefilter dient te worden afgestemd op de korrelgrootte van de bodem. De spleetdiameter dient zodanig te worden gekozen dat inspoeling van bodemdeeltjes in de filters wordt voorkomen. De eis ten aanzien van de spleetdiameter is bepalend voor de **materiaalkeuze**. Hierbij is er een keus tussen **HDPE** en **RVS**. Bij HDPE-filters bedraagt de minimale spleetdiameter 0,5 mm. Indien de bodem bestaat uit deeltjes met een kleinere diameter dienen filters te worden gemaakt van RVS. Hiermee kan een spleetdiameter van 0,15 mm worden gerealiseerd.

Een veel voorkomende fout is het optreden van **kortsluitstroming langs** het injectiefilter. Dit kan in veel gevallen worden voorkomen door het boorgat over de maximale lengte af te sluiten met bentoniet.

Aangezien de geïnjecteerde lucht omhoog stroomt, is het mogelijk dat één diep filter volstaat om de bovenliggende bodem van zuurstof te voorzien. Dit hangt echter af van de weerstand van de slechter doorlatende lagen. In het kader van een pilotproef is het aan te bevelen om filters op **verschillende diepten** te plaatsen. De filters worden geplaatst ter hoogte van de beter doorlatende lagen. Het is van belang om **kortsluitstroming tussen** de filters te voorkomen. Filters worden daarom op een onderlinge afstand van 1 à 2 m geplaatst en er bevindt zich bij voorkeur een horizontale weerstandbiedende laag tussen de verschillende filters.

Het aantal **monitoringsfilters** bepaalt de mate van detail en dus nauwkeurigheid van de resultaten van de pilotproef. Vaak is het gebruikte aantal het resultaat van een afweging tussen het beschikbare budget en de verwachte horizontale en verticale heterogeniteit van de bodem.

In verband met het optreden van **kortsluitstroming** van geïnjecteerde lucht via de monitoringsfilters moeten deze worden voorzien van een afsluitbare dop. Vaak zal na verloop van tijd een geringe hoeveelheid lucht gaan stromen langs de monitoringsfilters. Als deze hoeveelheid groter wordt dan de helft van het injectiedebiet dienen maatregelen te worden getroffen. Er is geen standaard meetapparatuur waarmee de hoeveelheid ontsnappende lucht kan worden gemeten. Op basis van een zeepvliesmeter kan wel een apparaat worden gemaakt waarmee lekstromen kunnen worden gekwantificeerd.

De locatie van de monitoringsfilters hangt af van:

- het verwachte verspreidingspatroon. In principe wordt altijd uitgegaan van een **radiaal verspreidingspatroon**. Als er in de omgeving van de injectiefilters echter voorkeursstroming wordt verwacht, door bijvoorbeeld de aanwezigheid van oppervlaktewater, kunnen meer filters worden geplaatst in de richting van de verwachte voorkeursstroming;

- de verwachte invloedsstraal van de geïnjecteerde lucht, die in eerste instantie gelijk wordt gesteld aan de diepte van de injectie ten opzichte van de grondwaterstand.

Vanwege de onzekerheid ten aanzien van de voorkeursstroming en de invloedsstraal is het raadzaam om filters **gefaseerd** te plaatsen.

Aangezien het verspreidingspatroon van lucht grillig is, is een monitoringsstrategie waarbij filters in een beperkt aantal lijnen radiaal vanaf het injectiepunt worden geplaatst *niet* aangeraden. Het aantal gebruikte filters moet zowel qua **afstand** tot het injectiepunt als in **richting** vanaf het injectiepunt een zo groot mogelijke spreiding geven.

Bij een sterke gelaagdheid biedt een **lang monitoringsfilter** goede mogelijkheden om parameters op verschillende diepten te meten. Hiervoor is het echter wel noodzakelijk dat een meetapparaat wordt gebruikt dat in de peilbuis wordt gehangen. Dit geldt voor een O<sub>2</sub>- en CO<sub>2</sub>-meter. Door dit apparaat steeds op verschillende diepten in de peilbuis te hangen, terwijl de peilbuis langzaam wordt doorgepompt, kan een goed profiel van het O<sub>2</sub>- en CO<sub>2</sub>-gehalte worden verkregen.

## 6.7 Stap 6: Uitvoeren van de pilotplant

Een pilotplant begint met het uitvoeren van een **nulmeting**, waarin alle parameters, die tijdens de proef worden gemeten, worden vastgelegd.

Een pilotplant wordt in meerdere fasen uitgevoerd. Hieronder vallen minimaal de volgende fasen:

- een intensieve beginperiode:  
Het doel van deze periode is om te testen of het systeem technisch naar behoren functioneert, om te onderzoeken wat een optimaal debiet is en op welke diepte moet worden geïnjecteerd en om een indruk te krijgen van de **TROI**;
- het bijplaatsen van monitoringsfilters (zie stap 7);
- een duurproef:  
Het doel van deze periode is om te onderzoeken wat het effect van de sanering op de langere termijn is. Een duurproef geeft inzicht in **EROI**;
- een respiratieproef:  
Het doel hiervan is om te onderzoeken met welke snelheid de zuurstof in het systeem wordt gebruikt. De respiratieproef hoeft niet persé aan het eind van de pilotproef plaats te vinden.

Tijdens de **intensieve beginperiode** wordt begonnen met het testen van het systeem door binnen een korte tijd verschillende debieten en drukken toe te passen. Punten die bijzondere aandacht vragen zijn:

- de druk die nodig is om het gewenste debiet te injecteren mag niet te hoog (< 3 bar) zijn;
- er mag geen kortsluitstroming langs de injectiefilters plaatsvinden;
- uittreding van lucht mag geen onacceptabele risico's voor de veiligheid veroorzaken. De belangrijkste risico's voor de veiligheid worden gevormd door explosiegevaar en verstoring van de stabiliteit van de grond. Er zijn geen regels voor het vaststellen van ondergrondse explosierisico's. In het geval van dit project was er een drijfslag aanwezig in de ondergrond en heeft persluchtinjectie niet geleid tot explosies. Risico's voor instabiliteit van de grond kunnen worden voorkomen door de injectiedruk van de lucht zodanig te kiezen dat de korrelspanning niet wordt opgeheven;
- uittreding van de lucht met gestripte verontreinigingen mag geen milieuhygiënische risico's veroorzaken. Om dit te beoordelen zijn er geen vastgestelde richtlijnen beschikbaar. Er kan



echter worden gedacht aan het tegengaan van emissies van verontreinigingen naar de buitenlucht. Dit kan worden getoetst aan de NER. Er kan ook worden gedacht aan het verontreinigen van de onverzadigde zone door adsorptie vanuit de verontreinigde bodemlucht. Dit kan worden getoetst aan de streef- en interventiewaarde.

Wat betreft het **optimale** debiet geldt in het algemeen dat een groter debiet leidt tot meer zuurstof in het grondwater en dus een effectievere sanering. Een groter debiet brengt daarentegen hogere onderhoudskosten met zich mee. In de praktijk zal het debiet vaak worden begrensd door technische problemen, zoals bijvoorbeeld overschrijding van de maximaal acceptabele injectiedruk, het ongecontroleerd uittreden van geïnjecteerde lucht of de capaciteit van de beschikbare pompen.

Om te onderzoeken wat de optimale **injectiediepte** is kan het best worden begonnen met een injectie op een diepte die overeenkomt met de onderkant van de te saneren verontreinigingen. Als dan blijkt dat deze injectie binnen het proefgebied geen merkbare invloed heeft in de ondiepere lagen, kan ondieper worden geïnjecteerd.

Om in relatief korte tijd een indruk te krijgen van de **TROI** kan gebruik worden gemaakt van een **tracertest** of een **inundatietest**. Beide tests vereisen een aantal speciale voorzieningen en een goede voorbereiding (zie 4.5.4 en 4.5.7).

Tijdens de **duurproef** kan een monitoringsfrequentie worden gehanteerd van 1 keer per maand of 1 keer per 2 maanden. Het uitgangspunt van de duurproef is dat de zuurstofconcentraties in monitoringsfilters op enige afstand van het injectiepunt pas na verloop van tijd (maanden) zullen stijgen, omdat de zuurstof in eerste instantie in het gebied tussen het injectiepunt en het monitoringsfilter wordt gebruikt. Idealiter wordt een duurproef afgesloten op het moment dat er geen veranderingen meer optreden in concentraties zuurstof en verontreinigingen. Dit moment is niet van te voren te voorspellen, maar het kan enkele jaren duren voordat het wordt bereikt. Voor een interpretatie van de duurproef zal daarom vaak gebruik worden gemaakt van extrapolatie en modellering.

De resultaten van de **respiratieproef** kunnen worden gebruikt voor een efficiënte bedrijfsvoering tijdens een eventuele full-scale sanering. Als bekend is hoe snel de zuurstof in het bodemsysteem wordt verbruikt kan daar rekening mee worden gehouden bij het vaststellen van de intervallen tussen pompperioden. De efficiency wordt dan gevormd door de inzet van minimale pompcapaciteit en dat leidt tot een minimaal energieverbruik.

## 6.8 **Stap 7: Ontwerp van het full-scale systeem**

De pilotplant dient minimaal de volgende resultaten op te leveren:

- kennis van de haalbare **TROI** en **EROI** op verschillende diepten;
- kennis van de termijn waarop saneringsmaatregelen tot een bepaald effect leiden.

Vaak duurt een pilotproef te kort om vast te stellen hoe een in situ sanering op de lange termijn zal verlopen. De resultaten van de proef zullen dus in de tijd moeten worden geëxtrapoleerd. In hoofdstuk 5 is beschreven hoe bestaande **grondwaterstromings- en stoftransportmodellen** daarbij kunnen worden gebruikt.

Op basis van de **EROI**-en op verschillende diepten kan voor het full-scale systeem een goede bedrijfsvoering van injectiefilters worden gemaakt. Hierbij moet nadrukkelijk voor ogen worden

gehouden wat het gewenste eindresultaat van de sanering is en op welke termijn de maatregelen een bepaald effect moeten hebben.

Er bestaat een verband tussen de intensiteit van de saneringsmaatregelen en het resultaat van de saneringsmaatregelen. In het geval van luchtinjectie geldt dat naarmate meer luchtinjectiefilters worden geplaatst en dus naarmate de kosten hoger zijn, een grotere vracht aan verontreinigingen zal worden gereinigd of een groter deel van de aanstromende verontreinigingen zal worden tegengehouden.

De intensiteit van de saneringsmaatregelen wordt in dit geval uitgedrukt als aantal injectiefilters. Het saneringsresultaat wordt in dit geval uitgedrukt op basis van de hoeveelheid c.q. het percentage aan verontreinigingen die in het biologisch scherm worden afgebroken. Dit wordt aangeduid met het begrip '% emissiereductie'.

Om een onderbouwde keus te kunnen maken voor het full-scale saneringssysteem, worden verschillende scenario's doorgerekend en met elkaar vergeleken. De scenario's worden gekenmerkt door het % emissiereductie en worden met elkaar vergeleken met behulp van de RMK-methodiek.



### EINDCONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Er is onderzoek uitgevoerd om vast te stellen of het mogelijk is om met behulp van luchtinjectie een biologisch scherm te realiseren, waarmee de verspreiding van aromaten via het grondwater in een gelaagde en slecht doorlatende bodem kan worden tegengegaan. De kern van het onderzoek wordt gevormd door een pilotproef waarmee dit saneringsconcept op praktijkschaal is getest.

De algemene conclusie is dat het mogelijk is om in een dergelijke bodem een biologisch scherm te creëren met behulp van luchtinjectie. De aanwezigheid van veel verschillende laagjes bleek geen belemmering te vormen voor een volledige aëratie van de bodem. Er wordt dan ook geconcludeerd dat er geen grote verschillen zijn tussen de aanpak van een homogeen zandige bodem en een gelaagde bodem. In beide gevallen dient er rekening te worden gehouden met voorkeursstroming.

Het project is gestart met de formulering van een aantal afzonderlijke onderzoeksvragen. Deze zijn tijdens het project beantwoord.

#### **Vraag 1:**

*Welke processen treden op in deze bodem als gevolg van luchtinjectie en op welke wijze leidt luchtinjectie tot verhoogde zuurstofconcentraties in het grondwater?*

Er is aangetoond dat de geïnjecteerde lucht zich in de bodem verspreidt via een groot aantal kanalen. Vanuit deze kanalen verspreidt de zuurstof zich naar het grondwater en dat leidt tot een volledige aëratie van de bodem.

In de bodem vindt ophoping van lucht plaats en vanuit de opgehoopte lucht wordt zuurstof nageleverd.

De stroming van de lucht wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van oppervlaktewater en andere 'gaten' in de afdekkende kleilaag.

#### **Vraag 2:**

*Is het mogelijk om in deze bodem de zuurstoflimitatie voor aërobe afbraak van monoaromatische verontreinigingen op te heffen met behulp van luchtinjectie?*

Er is aangetoond dat in een groot aantal monitoringsfilters de zuurstofconcentraties na verloop van tijd beginnen te stijgen tot boven 2 mg/l. Op dat moment is er geen sprake meer van een zuurstoflimitatie.

#### **Vraag 3:**

*Is de biologische afbraak als gevolg van luchtinjectie voldoende om alle verontreinigingen die met het grondwater worden aangevoerd af te breken, zodat een biologisch scherm kan worden gecreëerd?*

De duurproef heeft niet lang genoeg geduurd om deze vraag bevestigend te beantwoorden. De resultaten van de pilotproef zijn daarom geëxtrapoleerd met behulp van bestaande computermodellen. Hieruit komt naar voren dat de hoeveelheid zuurstof die in grondwater wordt gebracht

in ieder geval voldoende is om de aanstromende verontreinigingen af te breken. Tevens blijkt uit de modellering dat het enige jaren duurt voordat de momenteel aanwezige verontreinigingen geheel zijn afgebroken.

**Vraag 4:**

*Hoe groot is de invloedsstraal rondom een luchtinjectiefilter waarbinnen de luchtinjectie leidt tot biologische afbraak?*

Tijdens de pilotproef zijn puntmetingen uitgevoerd. Met behulp van geostatistische methoden is bewezen dat uit de puntmetingen geconcludeerd mag worden dat het gehele oppervlakte binnen de invloedsstraal wordt geaëreerd.

Er is geconcludeerd dat injectie in het onderste deel van laag L3 het meest effectief is. Op basis van de metingen zijn bij diepe injectie op de drie onderscheiden diepten de onderstaande effectieve invloedsstralen (EROI) gevonden:

- ondiep:       6 à 10 m in de richting loodrecht op de stromingsrichting;  
              10 à 20 m in de richting van de grondwaterstroming;
- middeldiep: 6 à 10 m;
- diep:         3 à 6 m.

Indien ervoor wordt gekozen om een volledig en met 100 % zekerheid dicht biologisch scherm te creëren wordt de onderlinge afstand tussen de injectiefilters bepaald door de effectieve invloedsstraal onderin laag L3. In dat geval dient een effectieve invloedsstraal van 3 m te worden aangehouden en dienen de injectiefilters op een onderlinge afstand te staan van 6 m.

BIJLAGE A

**SITUERING VAN DE LOCATIE BINNEN HET BOTLEKGEBIED**

BIJLAGE B

**SITUERING VAN DE MONITORINGSFILTERS**

BIJLAGE C

**OVERZICHT VAN DE VERONTREINIGINGSSITUATIE VAN DE CONCENTRATIE  
AROMATEN IN HET GRONDWATER IN L3 TEGEN DE TIJD**



## BIJLAGE D

### VOORBEREIDEND ONDERZOEK

#### Beschrijving van de werkzaamheden van het voorbereidend veldwerk

In deze bijlage is een kort detailoverzicht gegeven van het voorbereidend veldwerk.

#### *Inmetingen*

Alle door Gemeentewerken Rotterdam geplaatste sonderingen en peilfilters alsmede de boring zijn op de locatie horizontaal en verticaal ingemeten aan de hand van het coördinatennet van KPE. Als vaste punten zijn de door Groundwater Technology opgegeven peilbuizen GT0001 en GT0005 gebruikt.

De werkwijze is geweest dat het hek is ingemeten ten opzichte van de beide peilbuizen, waarna alle nieuwe peilbuizen en de injectiefilters zijn ingemeten ten opzichte van het hek.

#### *Sonderingen*

Er zijn vier sonderingen uitgevoerd. Eén sondering (FU60) is geplaatst in het hart van de pilotplant, voorafgaande aan het plaatsen van de injectiefilters. De drie andere sonderingen (FU59, FU61, FU62) zijn in drie van de vier hoekpunten geplaatst. De sonderingen zijn gezet tot een diepte van 26 m-mv.

#### *Ackermann-boring*

De Ackermann-boring (A1) is geplaatst op 3 m afstand van het centrum van de locatie. De boring is gezet tot een diepte van 26 m-mv. Er zijn ongeroerde monsters genomen welke zijn gebruikt voor kolomproeven en schudtests in het laboratorium van Tauw.

#### *Peilfilters*

In totaal zijn dertig peilfilters geplaatst. Deze zijn gebruikt voor verschillende doeleinden:

1. monsternamen van grondwater ten behoeve van analyses van aromaten;
2. bepaling van lokale doorlatendheid met behulp van falling headtests;
3. monitoring van de grondwaterstijghoogte gedurende (een deel van) de proefperiode.

In tabel D1 is een overzicht gegeven van de geplaatste filters. De 2e serie filters zijn cursief gedrukt.

Tabel D1. Overzicht van de monitoringsfilters (diepte en codering).

diepte → cluster ↓	freatisch	8 - 9 m-mv L3 boven	9 - 10 m-mv L3 boven	10,5 - 11,5 m-mv L3 midden	12 - 13 m-mv L3 midden	13 - 14 m-mv L3 onder	17 - 18 m-mv L5	
IM01		11		12		13	14	
IM02		21		22		23		
IM03		31	<i>311</i>	32		33		
IM04	40	41		42		43		
IM05		51		52		53		
IM06	60	61		62		63		
IM07		71		72				
IM08	811		<i>812</i>		82			
IM09			<i>91</i>		92			
IM10			<i>10.1 filter van 9 - 13 m-mv</i>					

### *Falling headtests*

In het voorbereidend onderzoek zijn veertien fallingheadtests uitgevoerd, in de clusters IM01 (4x), IM02 (1x), IM04 (4x), IM05 (3x) en IM07 (2x).

De tests zijn uitgevoerd voorafgaande aan de injectieproeven.

### *Geotechnische analyses*

De geotechnische analyses bestonden uit de karakterisering van verschillende bodemlagen met behulp van zeefkrommen. Er zijn zes monsters geselecteerd voor analyse. Deze monsters zijn genomen van de door Mos-Rhoon op 14-12-1994 geplaatste boring, waarvan een foto in figuur 1 is opgenomen.

### *Chemische analyses*

Ter bepaling van de nulsituatie bij aanvang van de proeven zijn alle in subfase 1 geplaatste filters bemonsterd, evenals een aantal reeds eerder in het kader van het reguliere bodemonderzoek geplaatste filters. In eerste instantie zijn 22 grondwatermonsters in het laboratorium van Tauw chemisch geanalyseerd. Na plaatsing van de aanvullende peilbuizen zijn 29 grondwatermonsters in het laboratorium van Tauw chemisch geanalyseerd.

### *Kolomproeven en schudtests*

Met een aantal monsters uit laag L3 zijn kolomproeven en schudtests uitgevoerd. De experimenten zijn uitgevoerd om inzicht te geven in de speciatie en de beschikbaarheid van de verontreiniging voor de biologische afbraak.

Het uitgangsmateriaal voor de proeven zijn grondmonsters die zijn genomen bij de plaatsing van de Ackermann-boring. Er zijn drie kolomproeven en twee schudtests uitgevoerd.

### *Grondwaterstands- en stijghoogteverloop*

Een viertal peilbuizen met filter in laag L3 (IM01-1, IM04-1, IM05-1, IM07-1), liggende in een raai loodrecht op de kadefijn is gedurende een maand uitgerust geweest met een drukketer ('diver') met behulp waarvan de stijghoogte in intervallen van een half uur is gemeten. Tevens is een reeds eerder in het kader van het reguliere bodemonderzoek geplaatst filter (GT0009) uitgerust met een 'diver'. Met behulp van de stijghoogtemetingen is de invloed van het getijde alsmede de invloed van drukveranderingen ten gevolge van de persluchtinjectie gemeten.

Tabel D2. Detailoverzicht resultaten voorbereidend onderzoek.

techniek	sonderingen		boring A1	falling headtest	korrelverdeling			getijmetingen		chem.analyse	
laag	bovenkant	onderkant	grondbeschrijving <sup>1</sup>	k-waarde	grondbeschrijving <sup>1</sup>	k-waarde <sup>2</sup> n = 0,3	k-waarde <sup>2</sup> n = 0,4	k-waarde <sup>3</sup> $\mu = 0,01$	k-waarde <sup>3</sup> $\mu = 0,05$	b/t/eb/st <sup>4</sup>	opmerkingen
L1	+5,9	+2	zk1/zs1	0,68	-	-	-	-	-	14/2/8,1/4,2	drijf laag
L2	+2	-0,8/-2	kz1	-	kz3(111)h1	0,20	0,65	-	-	-	
L3 boven	-0,8/-2		zk1/zs1	1,27	z(168)s1	0,62	2,02	)	)	350/30/170/52	
L3 midden			zk1/zs1	1,88	z(137)s1	0,48	1,53	) 7,3	) 36,5	180/< d/47/0,13	
L3 onder		-7,5	zs1/zk1	0,79	z(125)s1	0,43	1,42	)	)	190/< d/34/< d	
L4	-7,5	-8,5	ks1h1	-	-	-	-	-	-	-	
L5	-8,5	-12,5	zk1	2,13	-	-	-	-	-	24/0,1/6,8/0,07	
L5	-12,5	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	
	mNAP	mNAP		m/dag		m/dag	m/dag	m/dag	m/dag	mg/l <sup>5</sup>	

Verklaring:

<sup>1</sup> k = klei

z = zand

s = silt

(144) = zandmediaan ( $\mu\text{m}$ )

h = organische stof

1 = weinig ... houdend

2 = matig ... houdend

3 = sterk ... houdend

<sup>2</sup> n = poriëgehalte

<sup>3</sup>  $\mu$  = bergingscoëfficiënt laag L2

<sup>4</sup> b = benzeen

t = tolueen

eb = ethyleenbenzeen

st = styreen

<sup>5</sup> De gehalten van de grondwaterverontreinigingen zijn weergegeven in milligrammen per liter en niet in  $\mu\text{g/l}$ .

## BIJLAGE E

### **TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN DE PILOTPLANT**

- E1 Indeling van de perluchtinjectiecontainer en flowschema
- E2 As built tekening van de oude situatie
- E3 Boorstaten van de nieuwe filters
- E4 Schematische situatietekening
- E5 As built tekeningen van de nieuwe situatie

BIJLAGE E1

**INDELING VAN DE PERSLUCHTINJECTIECONTAINER EN FLOWSHEMA**

BIJLAGE E2

**AS BUILT TEKENING VAN DE OUDE SITUATIE**

BIJLAGE E3

**BOORSTATEN VAN DE NIEUWE FILTERS**

BIJLAGE E4

**SCHEMATISCHE SITUATIETEKENING**



BIJLAGE E5

**AS BUILT TEKENINGEN VAN DE NIEUWE SITUATIE**

## Technische specificatie van het persluchtinjectiesysteem

*De persluchtfilters zijn als volgt opgebouwd:*

De opbouw van de persluchtfilters is weergegeven in bijlage E4 en E5. Bijlage E4 geeft het persluchtfilter weer waarbij problemen met het dichtslibben van het filter werden geconstateerd. Bijlage E5 geeft de opbouw van het herplaatste persluchtfilter weer.

*Wijze van installeren persluchtfilters:*

Pulsboring.

*Het persluchtsysteem is opgebouwd in een geïsoleerde 10 ft container met in de container de volgende onderdelen:*

- 2 scrollcompressoren, capaciteit per stuk 25 Nm<sup>3</sup>/uur;
- persluchtketel van 2 m<sup>3</sup> met manometer, drukregelventiel en automatische afdat van condenswater;
- bedieningsluchtcompressor;
- manigold met 3 afsluitingen, elk voorzien van:
  - aansluiting nutriëntendosering;
  - handmatige regelkraan;
  - pneumatische afsluiter;
  - manometer;
  - druksensor;
  - monsterpunt;
  - terugslagklep;
- nutriëntendoseerunit:
  - voorraadvat 500 l;
  - regelbare doseerpomp;
  - verdeelsysteem met 3 pneumatische bediende afsluiters;
  - lekbak;
- plaatstalen schakelkast met 3 motorvelden, 1 niveausturing en een PRIVA telemetriesysteem;
- type Compri;
- leidingwerk van drie aansluitingen op manigold naar filters in het veld, elk voorzien van:
  - manometer;
  - monsterpunt;
  - terugslagklep;
  - T-stuk;
- ventilator.

*Besturingsmogelijkheden van het systeem:*

- De geplaatste persluchtinstallatie is voorzien van een PLC met de volgende besturingsmogelijkheden:
  - kleppen, compressor, toevoer nutriënten.
- Persluchtinjectie tijdsinterval aan, tijdsinterval per filter instelbaar, met de mogelijkheid de verschillende tijdsintervallen gedurende de dag te variëren.
- Het debiet van de luchtinjectie per injectiefilter moet handmatig worden ingesteld.

## BIJLAGE F

### OVERZICHT VAN DE WERKWIJZEN BIJ MONSTERNAME

In de onderstaande tekst wordt nader ingegaan op de gehanteerde werkwijze bij monstername.

#### *Opgelost zuurstof- en temperatuurmeting*

Voor deze meting wordt gebruik gemaakt van een opgelost zuurstofmeter die tevens temperatuur meet. De meetprobe is verbonden aan een kabel van 20 m lengte. De probe wordt op circa 0,5 m boven de onderkant van het filter gehangen. De meter zoekt een stabiele waarde die samen met de temperatuur kan worden afgelezen. De meetwaarden zijn uitgedrukt in mg/l en graden Celcius. De opgelost zuurstofmeter wordt voor gebruik gekalibreerd.

De continue opgelost zuurstof-/temperatuurmeting wordt hetzelfde uitgevoerd zoals hierboven is beschreven. Daar de DO-meter zuurstof verbruikt, moet het water in de peilbuis sneller worden ververs. Tijdens de meting wordt net boven de probe een PE-slang bevestigd waardoor het water continu kan worden afgepompt. Dit afpompen gebeurt met een debiet van circa 12 l/uur. De meetwaarden worden gelogd in de meter zelf of direct in een computer.

#### *Gasmetingen*

Voor gasmetingen met de PID, Gas Multimeter en de FID is op de peilbuizen een afsluitbaar monsternamepunt geplaatst. De meetinstrumenten pompen gas vanuit de peilbuis op om dit vervolgens te analyseren. Wanneer de meetwaarde stabiel is, wordt deze opgeschreven of gelogd.

#### *PID*

De PID (photo ionisation detector) meet totaal aan vluchtige koolwaterstoffen (eenheid: ppm) met een ionisatiepotentiaal kleiner dan 10,2 eV. Deze meter wordt voor gebruik gekalibreerd en kan meetwaarden loggen.

#### *Gas Multimeter*

De Gas Multimeter meet CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> in volumeprocent (V%). Deze moet voor gebruik buitenlucht (bekende samenstelling) meten om de meetwaarde te kunnen controleren. Bij afwijking wordt deze bijgesteld. De Gas Multimeter wordt één keer in de 3 maanden gekalibreerd. De meetwaarden kunnen in het apparaat worden gelogd.

#### *FID*

De FID (flame ionisation detector) meet het totaal aan vluchtige koolwaterstoffen (incl. methaan) in ppm. De FID kan geen waarden loggen. De FID moet voor gebruik op nul worden gesteld en wordt één keer in de zes maanden gekalibreerd.

#### *Flowmetingen*

Voor flow- of debietmetingen wordt gebruik gemaakt van een losse thermische flowmeter. Deze wordt via een monsternamepunt in de injectieleiding gehouden en afgesloten. De meetwaarde is uitgedrukt in meter per seconde (m/s). De meetwaarde wordt aan de hand van de doorsnede van de injectieleiding omgerekend naar liter per seconde. Voor de meting wordt de flowmeter op nul gesteld. Het is belangrijk dat de meting in een recht deel van de injectieleiding en minimaal 50 cm van een bocht plaatsvindt om de storende invloed van turbulentie zo minimaal mogelijk te houden.

### *Drukmetingen*

Voor drukmetingen wordt gebruik gemaakt van losse verschildrukmeters die op het monsternamepunt van de peilbuis worden gezet. De verschildrukmeters meten in Pascal met als maximaal meetbereik 10 kPa.

De drukmetingen op het systeem zijn gedaan met behulp van geïnstalleerde drukmeters.

BIJLAGE G

**NULONDERZOEK**

Tabel G1. Overzicht van saneringsparameters en gasmetingen (nulonderzoek).

	gemeten in water (mg/l)							gemeten in gas boven het grondwater in de peilbuis (ml/l)		
	sulfaat SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	bicarbonaat HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	carbonaat CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	calcium	magnesium	ijzer totaal	mangaan	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
40	19	16	< 0,1	40,0	34,0	7,5	1,00	209	0,2	0,2
11	5,7	20	< 0,1	75,0	120,0	9,5	0,90	191	7,5	> 60
12	2,8	16	< 0,1	120,0	100,0	3,4	0,49	211	0,2	0,2
13	21	20	< 0,1	75,0	180,0	6,5	0,20	207	0,8	5,2
14	21	38	< 0,1	24,0	600,0	20,0	0,32	208	0,5	5,9

BIJLAGE H

**INTENSIEVE MEETRONDE**

Tabel H1. Resultaten van de intensieve meetronde.

filter	wijze van injecteren	debiet (l/s)	tijd (uur)	druk (bar)	injectie-regime (min)	resultaat D(O)-metingen (mg/l)	bubbels	overig
ondiep	continu	1,5	0,5	-		monitoringsfilter 1.1 en 2.1 geven D(O)-gehalten > 2 mg/l  in de overige peilbuizen wordt geen significante hoeveelheid opgelost zuurstof gemeten	monitoringsfilters 1.1 en 2.1	in monitoringsfilter 1.1 ontstaat een drijfslag die er niet zat aan het begin van de metingen
		1,5	1	-				
		3	0,5	0,4				
		3,9		0,59				
		6	0,25	-				
		9	1,5	0,72				
	discontinu	6	3	-	30/30			
		3	24	-	30/10			
middeldiep	continu	1,5		0,5		In de monitoringspeilbuizen 2.1 en 1.2 worden opgelost zuurstofconcentraties gemeten boven de 2 mg/l  In het monitoringsfilter 4.1 wordt een opgelost zuurstof concentratie gemeten van 1,41 mg/l  in de overige monitoringspeilbuizen wordt geen sinificante hoeveelheid opgelost zuurstof gemeten	geen van de peilbuizen bubbelt	
		3		0,75				
	discontinu	-	-	-	-	-		
diep	continu	1,5	1	-		in de monitoringspeilbuizen 2.1, 1.2, 4.1, 3.2 en 1.3 worden opgelost zuurstofconcentraties gemeten boven de 2 mg/l		het gehalte opgelost zuurstof begint te stijgen in monitoringspeilbuis bij een debiet groter dan 6 l/s
		3	1	0,8 *				
		6	1	1 **				
		11,4	1	-				
	discontinu				30/10			

\* druktoename in het middeldiepe en diepe filter tot respectievelijk 0,35 en 0,5 bar bij injectie in het diepe filter

\*\* druktoename in het middeldiepe en diepe filter tot respectievelijk 0,48 en 0,8 bar bij injectie in het diepe filter

## BIJLAGE I

### SF<sub>6</sub>-PROEVEN

#### Protocol voor monstername en analyse van SF<sub>6</sub>

##### *Monstername*

##### **Water**

Voor elke monstername werd minstens een liter water doorgepompt om zodoende zeker te stellen dat 'vers' grondwater bemonsterd werd. De watermonsters zijn in 100 ml flesjes met teflon inlage zonder luchtinsluiting bewaard en binnen een kwartier na monstername naar het laboratorium van Kuwait Petroleum Research & Technology (gelegen op korte afstand van de raffinaderij) gebracht. Voor iedere peilbuis is een aparte PE- en siliconenslang gebruikt.

##### **Gas**

Uit peilbuizen met een drijfslag zijn geen grondwatermonsters genomen. Als alternatief is gekozen voor het nemen van gasmonsters. Hiervoor is gebruik gemaakt van gasmuisen. Deze werden enkele seconden doorspoeld met de te bemonsteren lucht waarna de muis afgesloten werd. De peilbuizen waarin zich een drijfslag bevond waren: *pb 11, pb 31, pb 41, pb 51, pb 61 en pb 71*.

#### Bepaling van de SF<sub>6</sub>-concentratie in het watermonster

##### *Analyse*

De grondwater- en gasmonsters zijn voor analyse vervoerd naar het laboratorium van Kuwait Petroleum Research & Technology. Dit laboratorium is gelegen op vijf minuten vanaf de locatie. Door een medewerker van het laboratorium zijn de monsters door middel van gaschromatografische headspace analyse geanalyseerd.

##### **Voorbehandeling van grondwatermonsters**

Met een injectiespuit is, afhankelijk van de te verwachten concentratie, 1 of 5 ml water uit het watermonster genomen en in een met stikstof gespoeld septumflesje gedaan. De inhoud van dit septumflesje bedroeg 36,6 ml. Het septumflesje met watermonster werd minimaal 30 minuten in een warmwaterbad van 35 °C gezet, zodat nagenoeg alle SF<sub>6</sub> uit het water kon vervluchtigen.

##### **Voorbehandeling van gasmonsters**

De voorbehandeling van de gasmonsters bestond uit het verdunnen van die monsters waarvan redelijkerwijs verwacht werd dat een hoge concentratie SF<sub>6</sub>-gas aanwezig was. Dit verdunnen was nodig om te voorkomen dat de kolom van de gaschromatograaf teveel vervuild zou raken. Het verdunnen hield in dat een bepaald aantal milliliters gas vanuit de gasmuis geïnjecteerd werd in een andere gasmuis. In deze gasmuis bevond zich een mengeenheid die ervoor zorgde dat er een homogene verdeling plaatsvond.

Een vaste hoeveelheid gas werd uit het septumflesje of gasmuis gehaald en in de kolom van de gaschromatograaf geïnjecteerd. Als draaggas is gebruik gemaakt van helium (4,5 ml/min). De retentietijd van SF<sub>6</sub> is 1,8 minuten en die van O<sub>2</sub> 3,0 minuten.

De uitkomsten van de laboratoriumanalyses bestonden uit concentraties gas uitgedrukt in ppb op volumebasis (ppbV). De gaschromatograaf had als onderste detectiegrens 0,05 ppbV (0,05·10<sup>-3</sup> µl/l). Deze waarde is omgerekend naar SF<sub>6</sub> opgelost in grondwater 0,002 µg/l. Dus zonder foutmarge zou dit een onderste detectiegrens van 0,002 µg/l zijn.

De uitkomsten van de concentraties SF<sub>6</sub> in de uitstromende lucht van de peilbuizen met een drijf-laag werden uitgedrukt in volume percentages (V%). Dit vanwege het voorkomen van relatief hoge concentraties SF<sub>6</sub> in deze gasmonsters.

### **Berekening van de analyse naar de concentratie in het watermonster**

De uitkomsten van de analyses in het laboratorium zijn uitgedrukt in ppbV. Deze uitkomst is volgens onderstaande voorbeeldberekening omgerekend naar een concentratie in het watermonster. Uit het genomen watermonster is 5 ml water gehaald en in een septumflesje van 36,6 ml gedaan.

$$36,6 - 5 = 31,6 \text{ ml headspace}$$

In deze headspace wordt een concentratie gemeten van 50 ppbV.

$$50 \text{ ppbV} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ ml/ml}$$

$50 \cdot 10^{-9} \cdot 31,6 = 1,58 \cdot 10^{-6}$  ml SF<sub>6</sub> heeft er in de headspace gezeten en dus in het watermonster van 5 ml.

Dit omrekenen naar mg door te vermenigvuldigen met molecuulmassa/molvolume:

$$1,58 \cdot 10^{-6} \cdot 146,1/22,4 = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ mg} = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{g}$$

Dit was aanwezig in  $5 \cdot 10^{-3}$  liter water.

$$1,0 \cdot 10^{-2} / 5 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{2,06 \text{ } \mu\text{g/l}}}$$

### **Werkvoorschrift**

Bepaling van SF<sub>6</sub> in water.

#### *Testcondities*

Kolom: Plot fused silica Molsieve 5A, 25 m ID 0,53 mm OD 0,75 mm 50  $\mu\text{m}$  film Chrom-pack  
Draaggas: Helium 4,5 ml/min  
Temp.progr.: 50 °C isothermisch  
Detector: ECD  
Make-up gas: Stikstof 60 ml/min  
Inject. Temp: 200 °C  
Det. Temp: 200 °C

#### *Materiaal*

36,6 ml septumflesjes  
Waterbad op 35 °C

#### *Werkwijze*

Injecteer 5 ml water in het met stikstof gespoelde septumflesje en zet dit minimaal 30 minuten in het waterbad.

Headspace analyse.

Retentietijd SF<sub>6</sub> 1,8 min.  
Retentietijd O<sub>2</sub> 3,0 min.

### **Resultaten**

De resultaten van de SF<sub>6</sub>-metingen zijn in de overzichtstekeningen weergegeven.



BIJLAGE J

**DUURPROEF**

BIJLAGE K

**INUNDATIEPROEF**

BIJLAGE L

**RESPIRATIEPROEF**

BIJLAGE M

**MODELLERINGSRAPPORT**

## BIJLAGE N

### STATISTISCHE ONDERBOUWING VAN DE METINGEN TEN BEHOEVE VAN DE KANAALSTROMING

#### Toetsing van de hypothesen ten aanzien van de invloedsstraal

Voordat een gehele sanering kan worden ontworpen en gedimensioneerd, is het noodzakelijk om door middel van een pilotplant een aantal aspecten te toetsen. Belangrijke factoren bij een persluchtscherm zijn:

1. het al dan niet optreden van voorkeursstroming;
2. de grootte van de invloedsstraal;

De toetsing vindt plaats aan de hand van zuurstofmetingen in peilbuizen. In deze verhandeling wordt de meetstrategie nader uitgewerkt.

#### 1. Voorkeursstroming

Hypothese: Er treedt geen voorkeursstroming op.

Criterium: Er wordt gesproken van 'voorkeursstroming' wanneer de helft of minder van het oppervlak binnen de invloedsstraal wordt belucht door luchtkanalen.

Toetsing: Aan de meetgegevens bij KPE, door middel van de  $X^2$ -toets voor aanpassing.

Bij bijna alle persluchtinjectiesystemen treedt luchtstroming via kanalen op. Alleen bij zeer bepaalde bodemeigenschappen en luchtdebieten zal een continu stromingsveld rond de conus ontstaan. Omdat sprake is van een sterk gelaagde en slecht doorlatende bodem kan worden aangenomen dat ook hier luchtkanalen worden gevormd. Nu is kanaalstroming op zich niet nadelig voor het saneringseffect. Belangrijk is wat de dichtheid van de kanalen is. Wanneer de kanalen zich op korte afstand van elkaar bevinden, zal na verloop van tijd het tussenliggende grondwater door middel van diffusie zijn geaëreerd. In dat geval is het optreden van kanaalstroming geen beperking voor het functioneren van het filter. Luchtkanalen zijn alleen dan beperkend als hierdoor niet al het grondwater binnen de invloedsstraal kan worden voorzien van zuurstof. In dat geval spreken we van voorkeursstroming. Als criterium kan worden gesteld dat er sprake is van een belemmerende vorming van voorkeurskanalen als ten hoogste de helft van het gebied binnen de invloedsstraal door kanalen wordt gevormd. Uitgaande van dit criterium is de kans dat bij de meetronde, bestaande uit 36 metingen, slechts 1 meting geen voorkeurskanaal heeft getroffen ontzettend klein. Het is daarom erg onwaarschijnlijk dat in dit geval een voorkeursstroming optreedt die minder dan de helft van de invloedsstraal bevat. Op basis van deze redenering kan worden geconstateerd dat een continue luchtverdeling mag worden verondersteld.

Zelfs wanneer het criterium voor kanaalstroming strenger wordt gesteld (niet bij slechts de helft van het oppervlak maar bij bijvoorbeeld driekwart van het oppervlak bezet door luchtkanalen is er nog sprake van kanaalstroming), leiden de resultaten van de KPE-proef tot verwerping van de hypothese.

Het is niet mogelijk om, zonder aannamen te doen ten aanzien van de kanalen, a priori het juiste aantal metingen ter bepaling van de voorkeursstroming vast te stellen. Het is in ieder geval noodzakelijk om een schatting te doen voor de kans dat een luchtkanaal wordt getroffen. Het is aan te bevelen allereerst een beperkt aantal metingen te doen om deze kans in te schatten en op basis daarvan te bepalen hoeveel aanvullende metingen noodzakelijk zijn.

Op de KPE-locatie werden in 97 % van de gevallen luchtkanalen getroffen. Uitgaande van deze schatting, zouden 7 metingen voldoende zijn om dit te bepalen binnen redelijke marges.

#### *Statistische achtergrond van de voorkeurskanalen*

Voor het toetsen van de hypothese ten aanzien van voorkeursstroming kan gebruik worden gemaakt van de  $X^2$ -toets voor aanpassing. Deze toets wordt als volgt gedefinieerd:

De  $X^2$ -toets is een aanpassingstoets die van de volgende veronderstellingen uitgaat.

Gegeven zijn  $n$  onafhankelijke waarnemingen aan een stochastische variabele  $X$ .

$X$  heeft  $k$  mogelijke uitkomsten  $A_1, A_2, \dots, A_k$ , die onderling disjunct zijn en waarvan de vereniging precies de uitkomstenruimte is (dus een klassenindeling met  $k$ -klassen). Men wil toetsen of een tevoren gespecificeerde kansverdeling over de  $k$ -klassen juist is, dus:

$$H_0: P[A_i] = p_i \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

met  $p_i$  bekend en  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$ .

Stel  $N_i$  is het aantal waarnemingen in klasse  $i$  (dus met uitkomst  $A_i$ ). De toetsingsgrootte van de Chi-kwadraat toets voor aanpassing is:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$$

Voor grote  $n$  is  $X^2$  onder  $H_0$  bij benadering verdeeld als  $\chi^2_{k-1}$ . De nulhypothese wordt verworpen (bij toetsing met onbetrouwbaarheidsdrempel  $\alpha$ ) als de toetsingsgrootte  $X^2$  groter dan of gelijk is aan het  $(1 - \alpha)$ -punt van de  $\chi^2_{k-1}$ -verdeling.

Wanneer deze toets wordt toegepast voor het toetsen van de voorkeursstroming op de KPE proeflocatie, luidt de toetsing als volgt:

Gegeven zijn 36 onafhankelijke waarnemingen aan de stochastische variabele 'luchtkanaal'. Deze variabele heeft 2 mogelijke uitkomsten 0 (geen luchtkanaal) en 1 (luchtkanaal). Omdat voorkeursstroming als negatief wordt gezien indien de helft (of minder) van het gebied binnen de invloedsstraal luchtkanalen beslaat, luidt de hypothese:

$$H_0: P[0] = 0,5, p[1] = 0,5$$

Er is 1 waarneming in de klasse '0' en er zijn 35 waarnemingen in de klasse '1'. De toetsingsgrootte voor deze waarneming is gelijk aan 32,1. Als de onbetrouwbaarheid op 10 % wordt gesteld, wordt de hypothese 'er treedt voorkeursstroming op die beperkend is voor het proces' verworpen wanneer de toetsingsgrootte de waarde 2,7 overschrijdt. Omdat dat in dit geval ruimschoots het geval is, wordt de hypothese 'beperkende voorkeursstroming' verworpen.

Deze toets kan voor een willekeurig aantal waarnemingen en voor verschillende onbetrouwbaarheidswaarden worden uitgevoerd. In het rekenvoorbeeld is gewerkt met de waarnemingen en de uitkomsten van deze waarnemingen zoals bij de pilotproef zijn gevonden.

In het rekenvoorbeeld wordt uitgegaan van het volgende criterium voor kanaalsstroming:

Er wordt gesproken van voorkeursstroming wanneer het deel van het oppervlak binnen de invloedsstraal dat door luchtkanalen in beslag wordt genomen kleiner of gelijk aan 0,5 is.

De fractie 0,5 is een waarde die enigszins arbitrair gekozen is op basis van de verwachting dat wanneer de helft van het oppervlak uit luchtkanalen bestaat op den duur door middel van diffusie het gehele invloedsgebied geaëreerd zal zijn. Vanwege de willekeur van deze waarde is in figuur N1 de toetsingswaarde berekend voor grotere en kleinere fracties en dus strengere en minder strenge criteria.

Wanneer er nog steeds van voorkeursstroming wordt gesproken als 0,87 deel van het oppervlak uit luchtkanalen bestaat, wordt de hypothese voor de situatie bij KPE geaccepteerd (zie ook fig. N1).

Fig. N1. Toetsingsgrootte als functie van het criterium voor voorkeursstroming.

*Benodigd aantal metingen voor het vaststellen van voorkeursstroming*

In het voorgaande is achteraf getoetst of de resultaten van de metingen bij KPE aanleiding geven tot het veronderstellen van voorkeursstroming. Over het aantal metingen dat nodig is om deze uitspraak te kunnen doen, is nog niet gesproken.

Wanneer een meetcampagne wordt opgezet, belandt men op een gegeven ogenblik op het punt waar een beslissing moet worden gemaakt ten aanzien van de grootte van de steekproef. Een te grote steekproef leidt tot te veel kosten, en een te kleine steekproef verkleint de algemene bruikbaarheid van het resultaat. In veel gevallen is er niet genoeg informatie om een gefundeerde keuze te maken voor de omvang van de steekproef. Statistische theorieën scheppen een kader om op een intelligente wijze om te gaan met dit probleem.

Een antwoord op dit probleem kan alleen worden geformuleerd wanneer aan een aantal eisen is voldaan:

1. de nauwkeurigheid waarmee het steekproefgemiddelde moet worden bepaald, moet vooraf worden gespecificeerd;
2. er is altijd een kans dat het steekproefgemiddelde buiten dit interval ligt en deze kans dient vooraf te worden aangegeven;
3. een inschatting voor het steekproefgemiddelde is gegeven.

In het vervolg worden metingen beschouwd die kunnen worden geclassificeerd in twee groepen, C en C'. Enige foutmarge  $d$  in het verwachte aandeel  $p$  in klasse C wordt geaccepteerd en er is een klein risico  $r$  dat we bereid zijn te nemen dat de werkelijke foutmarge groter is dan  $d$ , oftewel:

$$Pr(|p - P| \geq d) = r$$

waarbij  $P$  het werkelijke aandeel in klasse C voorstelt. Wanneer enkelvoudig aselekt trekken en  $p$  verondersteld wordt normaal verdeeld te zijn, kan voor de spreiding worden bewezen dat:

$$\sigma = \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \sqrt{\frac{PQ}{n}}$$

waarbij  $N$  de omvang van de gehele populatie is,  $n$  de omvang van de steekproef,  $P$  het werkelijke aandeel in klasse C en  $Q$  het werkelijke aandeel in klasse C'. De vereiste nauwkeurigheid is aan de steekproefomvang gerelateerd via:

$$d = t \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \sqrt{\frac{PQ}{n}}$$

waar  $t$  het punt van de normaalverdeling is dat een oppervlakte van  $r$  afsnijdt aan de flanken van de verdeling. Wanneer deze vergelijking voor  $n$  wordt opgelost, wordt gevonden:

$$n = \frac{\frac{t^2 PQ}{d^2}}{1 - \frac{1}{N} \left( \frac{t^2 PQ}{d^2} + 1 \right)}$$

Voor praktisch gebruik wordt voor  $P$  a priori  $p$  als schatting gebruikt. Als  $N$  groot is, kan de formule worden benaderd door:

$$n = \frac{t^2 pq}{d^2}$$

Deze formule geeft de steekproefgrootte als functie van de vereiste nauwkeurigheden en de eerste inschatting voor de aandelen van beide klassen.

De hierboven geformuleerde aanpak kan worden toegepast op de meetstrategie zoals deze bij KPE is toegepast. De twee klassen C en C' worden gevormd door 'wel luchtbaan aangetroffen' en 'geen luchtbaan aangetroffen'. De grootheid  $p$  stelt de kans voor om een luchtbaan te treffen. Wanneer a priori wordt geschat dat de helft van het oppervlak binnen de invloedstraal in beslag wordt genomen door luchtbanen, geldt  $p = 0,5$ . Er wordt van uitgegaan dat we  $p$  met een marge van 0,1 willen kennen (dus:  $0,4 < p < 0,6$ ), waarbij een kans van 0,1 wordt geaccepteerd op een waarde daarbuiten.

In figuur N2 is het benodigd aantal metingen weergegeven als functie van de kans om een luchtbaan te treffen. Hierbij is hetzelfde betrouwbaarheidsinterval gebruikt als in het voorbeeld hier-



boven. Wanneer vooraf was ingeschat dat ongeveer de helft van het oppervlakte door luchtbanen in beslag wordt genomen, hadden er 63 metingen moeten worden uitgevoerd. Er was dan waarschijnlijk achteraf geconstateerd dat in werkelijkheid niet 50 % maar 97,2 % in beslag wordt genomen door luchtbanen. Wanneer *a posteriori* het aantal metingen wordt berekend dat nodig is bij een verwachting van het 97,2 % in plaats van 50 %, dan zouden slechts 7 metingen nodig zijn.

Een andere benadering is er één die uitgaat van een hypothese die toetst of *minimaal* 50 % van de bodem wordt belucht.

Fig. N2. Benodigd aantal metingen als functie van de kans om een luchtbaan te treffen.

Er is aangenomen dat de goed beluchte zones willekeurige posities innemen die statistisch gezien volledig onafhankelijk zijn van elkaar. Die aanname is redelijk, indien de peilbuizen zo ver mogelijk van elkaar zijn geplaatst. Uitgaande van een luchtverzadiging van 50 % is de kans  $p$  dat een peilbuisfilter toevallig in contact komt met een luchtkanaal ook 50 %. De kans  $p$  staat dus tevens voor de gemiddelde luchtverzadiging  $p$  binnen de invloedsstraal.

Laat  $n$  het aantal waargenomen peilbuizen zijn en laat  $k$  gelijk zijn aan het aantal positieve meetresultaten, oftewel het aantal peilbuizen waar het grondwater min of meer is verzadigd met zuurstof. Onder de gedane aannamen kan  $k$  dan worden opgevat als de uitkomst van een geordende trekking uit  $2^n$  elementen. Voor dit soort trekkingen wordt de binomiale stochastische variabele  $\underline{k}$  gebruikt met de kans:

$$P[\underline{k} = k] = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

waarbij het aantal combinaties gegeven is door:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Voor het geval  $p = 0,5$  kan ook een eenvoudigere formule worden gebruikt:

$$P[\underline{k} = k] = \binom{n}{k} (0,5)^n$$

De cumulatieve kans  $P[\underline{k} < k]$  is verder gegeven door:

$$P[\underline{k} < k] = \sum_{i=0}^{i=k-1} P[\underline{k} = i]$$

De cumulatieve kans  $P[\underline{k} < k]$  kan worden beschouwd als de kans dat de bodem voldoende is belucht. Dit is als volgt nader toegelicht. Beschouw het geval waarbij in alle peilbuizen een positief meetresultaat is verkregen, oftewel  $k = n$ . De kans dat door 'toeval' dit waarnemingsresultaat is verkregen, is gelijk aan  $P[\underline{k} = n] = (0,5)^n$ . Deze kans moet van de totale kansmassa worden afgetrokken om een indruk te krijgen van de betrouwbaarheid waarmee over de meetresultaten uitspraken kunnen worden gedaan. In dit geval wordt dus een betrouwbaarheid verkregen van  $1 - (0,5)^n = 1 - P[\underline{k} = n] = P[\underline{k} < n]$ , wat dus inderdaad de cumulatieve kans  $P[\underline{k} < k]$  is voor  $k = n$ .

De tabellen N1, N2 en N3 geven de kans  $P[\underline{k} < k]$  voor respectievelijk 3, 4 en 5 peilbuizen. Aangezien voor  $p = 0,5$  de binomiale verdeling symmetrisch is, kunnen de tabellen ook worden gebruikt om de betrouwbaarheid aan te geven van het tegendeel van een gedane uitspraak, door  $k$  op te vatten als het aantal negatieve meetresultaten.

Tabel N1. De betrouwbaarheid waarmee een uitspraak kan worden gedaan, als functie van het aantal positieve meetresultaten  $k$ , voor  $p = 0,5$  en  $n = 3$ .

$k$	$P[\underline{k} < k]$
0	0
1	0,125
2	0,5
3	0,875

Tabel N2. De betrouwbaarheid waarmee een uitspraak kan worden gedaan, als functie van het aantal positieve meetresultaten  $k$ , voor  $p = 0,5$  en  $n = 4$ .

$k$	$P[\underline{k} < k]$
0	0
1	0,0625
2	0,3125
3	0,6875
4	0,9375

Tabel N3. De betrouwbaarheid waarmee een uitspraak kan worden gedaan, als functie van het aantal positieve meetresultaten  $k$ , voor  $p = 0,5$  en  $n = 5$ .

$k$	$P[k < k]$
0	0
1	0,03125
2	0,1875
3	0,5
4	0,8125
5	0,96875

Er wordt nu de hypothese geformuleerd dat 'binnen de invloedstraal de bodem overal van voldoende zuurstof is voorzien'. Met behulp van de tabellen N1, N2 en N3 kan deze hypothese worden getoetst als functie van het aantal beschikbare peilbuizen. Het is gebruikelijk om een hypothese te accepteren wanneer dit met een betrouwbaarheid van ten minste 95 % kan worden verondersteld en om een hypothese te verwerpen wanneer met een betrouwbaarheid van 95 % het tegendeel kan worden verondersteld.

Uit de tabellen N1, N2 en N3 blijkt dat voor  $n \leq 3$  de gestelde hypothese nooit kan worden verworpen of geaccepteerd, ook al is in alle peilbuizen een negatief, respectievelijk positief meetresultaat verkregen. Een betrouwbaarheid van 95 % wordt pas verkregen wanneer 4 à 5 peilbuizen worden gebruikt. Voorwaarde is dan wel dat in alle peilbuizen een negatief ( $k = 0$ ), respectievelijk positief ( $k = n$ ) meetresultaat is verkregen. Er is dus een tussengebied, gedefinieerd door  $1 \leq k \leq n - 1$ , waar geen uitspraak met 95 % betrouwbaarheid mogelijk is.

Resumerend kan dus met 95 % betrouwbaarheid de volgende uitspraken worden gedaan, uitgaande van een gemiddelde luchtverzadiging van 50 % en 4 à 5 peilbuizen:

- $k = 0$  de zuurstofvoorziening binnen de invloedstraal is onvoldoende;
- $1 \leq k \leq n - 1$  geen uitspraak mogelijk met 95 % betrouwbaarheid;
- $k = n$  de zuurstofvoorziening binnen de invloedstraal is overal voldoende,

waar  $k$  het aantal peilbuizen is waar de gemeten zuurstofconcentratie in het grondwater tegen de verzadigingsgraad aan zit.

Ofschoon dus niet altijd met zekerheid kan worden aangegeven of de bodem nu voldoende belucht is of niet, kunnen de berekende kansen in de tabellen wel worden gebruikt in risico-analyses. Bijvoorbeeld, indien bij een pilotproef 3 van de 5 peilbuizen een negatief meetresultaat geven, is er volgens tabel N3 een kans van 50 % dat binnen de invloedstraal plekken voorkomen die niet goed zijn belucht.

## 2. Omvang van de invloedstraal

De grootte van de invloedstraal is niet van invloed op de werking van een individueel filter, maar is de meest bepalende factor bij de dimensionering van een persluchtscherm. De afstand tussen twee persluchtfilters is gelijk aan tweemaal de invloedstraal. Het is daarom van belang om de invloedstraal van een filter te meten. In een isotroop medium zal de invloedstraal rond het filter in elke richting even groot zijn. In dat geval kan de invloedstraal worden gemeten volgens figuur N3a. In een anisotroop medium kan de invloedstraal afhankelijk zijn van de richting en kan de invloedstraal beter volgens figuur N3b worden gemeten. In een medium waarvan de isotropie niet geheel is vastgesteld, kan voorzichtigheidshalve beter de strategie zoals is weergegeven in figuur N3b worden gevolgd.

- Fig. N3. a. Meetstrategie voor een uniforme invloedsstraal: metingen liggen op één lijn.  
b. Meetstrategie voor een anisotrope invloedsstraal: metingen liggen op een spiraal rond het injectiefilter.