

NOBIS 95-1-05
IN SITU SANERING KLEIBODEMS (HEISA)

Fase 1: Sanering van een met toluen verontreinigde kleilaag met luchtinfiltratie en luchtonttrekking

ir. M. Hennink (Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek B.V.)
ing. R.A.J.M. van Uffelen (DHV Milieu en Infrastructuur B.V.)
drs. G.A.M. Kruse (Grondmechanica Delft)
ing. L.A. van der Kooij (DHV Milieu en Infrastructuur B.V.)

maart 1999

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 kleibodems (HEISA) - Fase 1: Sanering van een met toluene verontreinigde kleilaag met luchtinfiltratie en luchtonttrekking", maart 1999, 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 clay soils (HEISA) - Phase 1: Remediation of clay contaminated with toluene by air sparging and venting", March 1999, 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 kleibodems (HEISA)

CUR/NOBIS rapportnummer

95-1-05

Fase 1: Sanering van een met toluen verontreinigde kleilaag met luchtinfiltratie en luchtonttrekking

Project rapportnummer

95-1-05 fase 1

Auteur(s)ir. M. Hennink
ing. R.A.J.M. van Uffelen
drs. G.A.M. Kruse
ing. L.A. van der Kooij**Aantal bladzijden****Rapport:** 46
Bijlagen: 82**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**DHV Milieu en Infrastructuur B.V. (ir. A.G. Kok, 033-4682935)
Shell International Oil Products bv (ir. C.D. Parkinson, 070-3771793)
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (ing. W.A. van Hattem, 010-2521447)
Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau (ir. T. van Hille, 010-4896194)
Landbouwniversiteit Wageningen (ir. M.G. Keizer, 0317-483302)
Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek B.V. (ir. M. Hennink, 0318-624624)**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

Het hoofddoel van dit project is tweeledig:

1. in een korte proefperiode de toluenconcentraties in de vaste fase van een gerijpte kleilaag boven het grondwaterniveau op het VADA-terrein te Wageningen verlagen tot onder de interventiewaarde;
2. het niveau van nalevering van de verontreiniging uit de kleilaag verlagen, waardoor de interventiewaarde voor grondwater van 1 mg/l niet meer wordt overschreden.

Volgend op het generieke en modelmatige onderzoek zijn twee systemen toegepast in een veldproef om dit hoofddoel te bereiken:

- a. aanbrengen van een luchtbel onder de kleilaag, waarbij lucht van onder naar boven door de klei wordt geleid;
- b. onttrekken van lucht onder de kleilaag, waarbij lucht van boven naar beneden door de klei wordt geleid.

Het resultaat van beide veldproeven is dat in enkele maanden tijd de toluenconcentratie in de klei tot aan de grondwaterstand gereinigd is tot ruim onder de interventiewaarde. Biologische afbraak is daarbij waargenomen, maar kan niet worden gekwalificeerd.

Geconcludeerd kan worden dat de veldproeven geslaagd zijn. Opschaling ten behoeve van de sanering van het gehele terrein wordt overwogen en haalbaar geacht.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

aëroob, aromatische koolwaterstoffen, beluchten, biologische afbraak, bodemstructuur, kleigrond, kooldioxide

Vrije trefwoorden:

biosparging, bioventing, diffusie, luchtinjectie, luchtonttrekking

Titel project

In situ sanering kleibodems (HEISA)

ProjectleidingDHV Milieu en Infrastructuur B.V.
(ing. L.A. van der Kooij, 033-4682933)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

In situ remediation of clay soils (HEISA)

CUR/NOBIS report number

95-1-05

Phase 1: Remediation of clay contaminated
with toluene by air sparging and venting**Project report number**

95-1-05 phase 1

Author(s)ir. M. Hennink
ing. R.A.J.M. van Uffelen
drs. G.A.M. Kruse
ing. L.A. van der Kooij**Number of pages****Report:** 46**Appendices:** 82**Executive organisation(s) (Consortium)**DHV Milieu en Infrastructuur B.V. (ir. A.G. Kok, 033-4682935)
Shell International Oil Products bv (ir. C.D. Parkinson, 070-3771793)
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (ing. W.A. van Hattem, 010-2521447)
Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau (ir. T. van Hille, 010-4896194)
Landbouwniversiteit Wageningen (ir. M.G. Keizer, 0317-483302)
Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek B.V. (ir. M. Hennink, 0318-624624)**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

The principal aim of this project on the VADA-site in Wageningen was bipartite:

1. in the solid phase of a ripened layer of clay above the groundwater-table, the concentrations of toluene had to be brought down to beneath the intervention value, within a short test period;
2. the leaching of contaminated substances from the clay layer had to be decreased to beneath the intervention value for groundwater (1 mg/l).

After previous generic and modelling studies, two systems were applied in a field with a view to achieving this principal aim:

- a. creating an air bubble underneath the layer of clay and forcing the air through the clay from the bottom upward;
- b. forcing air through the layer of clay from the top down and then withdrawing the air from beneath the layer.

Both field tests resulted within a few months in decreasing the toluene content in the clay, as far as the groundwater-table, to a level well below intervention value. Biological degradation was observed during this process, but could not be qualified.

The conclusion is that the field tests were a success. Upgrading to treatment of the entire site is feasible and under consideration.

Keywords**Controlled terms:**aeration, aerobic, aromatic hydrocarbons, biodegradation,
carbon-dioxide, clay soil, soil structure**Uncontrolled terms:**air extraction, air injection, diffusion,
biosparging, bioventing, toluene**Project title**

In situ remediation of clay soils (HEISA)

ProjectmanagementDHV Milieu en Infrastructuur B.V.
(ing. L.A. van der Kooij, 033-4682933)

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

VOORWOORD

Het NOBIS-project 'In situ sanering kleibodems' is begonnen onder de naam HEISA (Heterogene Extensieve In situ SANering). De uitgevoerde veldproef, als afsluiting van de eerste fase, bleek namelijk dermate snel te leiden tot het beoogde resultaat, dat het predikaat 'extensief' niet langer van toepassing werd gevonden.

Het project 'In situ sanering kleibodems' is uitgevoerd door een consortium bestaande uit:

- Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek B.V.
- Shell International Oil Products bv
- Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
- Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau
- Landbouwniversiteit Wageningen
- DHV Milieu en Infrastructuur B.V.

DHV heeft opgetreden als penvoerder en projectmanager. Aan de eerste fase van het project hebben verder meegewerkt:

- Wolters Kluwer
- Grondmechanica Delft
- AB-DLO
- Joustra Geomet BV

maart 1999

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	viii
		BEGRIPPENLIJST	x
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
		1.1 Algemeen	1
		1.2 Verontreinigingssituatie en verontreinigingshistorie	1
		1.3 Conceptueel model voor de verontreinigingssituatie en risico's	1
		1.4 Aanleiding en motivering voor de praktijkproef	2
		1.5 Doelstelling van de praktijkproef	4
		1.6 Saneringsprincipe	5
Hoofdstuk	2	PROJECTACTIVITEITEN	7
		2.1 Algemeen	7
		2.2 Saneren door een luchtbel onder de kleideklaag	7
		2.2.1 Stuatie en principe	7
		2.2.2 Luchtbel onder de kleilaag	8
		2.3 Saneren door het onttrekken van lucht	9
		2.3.1 Situatie en principe	9
		2.3.2 Onttrekken van lucht op het grensvlak van de onverzadigde en verzadigde zone	10
		2.4 Nulmeting en eindmeting	11
Hoofdstuk	3	RESULTATEN VAN HET LUCHTBELSYSTEEM	13
		3.1 Algemeen	13
		3.2 Bodemopbouw en effecten ten gevolge van de proef	13
		3.3 Verloop van de proef en waarnemingen	14
		3.4 Analyseresultaten van de grond en het grondwater	15
		3.5 Resultaten van de FFD-sonderingen	17
		3.6 Massabalans van het luchtbelstelsel	18
		3.7 Verband met voorgaande in situ bodemsaneringsproeven binnen de damwand	18
		3.8 Bereikte resultaat van het luchtbelstelsel	19
Hoofdstuk	4	RESULTATEN VAN HET BODEMLUCHTEXTRACTIESYSTEEM	21
		4.1 Algemeen	21
		4.2 Bodemopbouw en effecten ten gevolge van de proef	21
		4.3 Verloop van de proef en waarnemingen	21
		4.4 Analyseresultaten van de grond en het grondwater	22
		4.5 Resultaten van de FFD-sonderingen	26
		4.6 Massabalans van het bodemluchtextractiesysteem	26
		4.7 Bereikte resultaat van het bodemluchtextractiesysteem	27
Hoofdstuk	5	ALGEMENE BESCHOUWING	29
		5.1 Beschouwing door externe deskundigen	29
		5.2 Schematisering van het bodemprofiel	30

	5.3	Verschil in de uitslag van de analyse binnen een bereik van 20 cm	32
	5.4	Nauwkeurigheid van de chemische analyses in het laboratorium	32
	5.5	Tekortkomingen in de kennis	33
Hoofdstuk	6	TOETSING AAN DE UITGANGSPUNTEN EN HET BEOOGDE RESULTAAT	37
	6.1	Samenvatting van het resultaat van de sanering van de gerijpte kleideklagen	37
	6.2	Toetsing aan de projectdoelstelling	37
Hoofdstuk	7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	39
Hoofdstuk	8	PROGRAMMA VAN EISEN VOOR ONTWERP EN DIMENSIO- NERING	41
Hoofdstuk	9	NAWOORD	45
Bijlage	A	SITUERING VAN DE IN SITU PRAKTIJKPROEF	
Bijlage	B	PROEF 'LUCHTBELSYSTEEM'	
Bijlage	C	PROEF 'BODEMLUCHTEXTRACTIESYSTEEM'	
Bijlage	D	BESCHRIJVING VAN HET BODEMPROFIEL	
Bijlage	E	BIJDRAGE DESKUNDIGEN	
Bijlage	F	FFD-SONDERINGEN	
Bijlage	G	VERZAMELSTATEN VAN ANALYSEGETALLEN	
Bijlage	H	MODELLERING VAN STOFTRANSPORT	

SAMENVATTING

In situ sanering kleibodems (HEISA)

Ter plaatse van een voormalige drukkerij in Wageningen is een pilotproef voor een in situ bodemsanering uitgevoerd, waarmee een doorbraak op het gebied van de in situ bodemsanering van kleilagen is bereikt. In een relatief korte periode is vrijwel alle toluen uit een zwaar verontreinigde kleilaag verwijderd. De sanering is uitgevoerd door middel van twee saneringstechnieken: het luchtbelsysteem, waarbij door middel van persluchtinjectie lucht van onder naar boven door een kleilaag wordt gevoerd en het bodemluchtexttractiesysteem, waarbij lucht vanaf het maaiveld tot net boven het grondwatervniveau wordt getransporteerd.

De kleilaag tot een diepte van 3,5 m-mv heeft een volledig ontwikkelde structuur; klei met een matrixstructuur met kleine aggregaten en wortel- en wormgangen.

Doel

Het hoofddoel van dit project is tweevoudig:

1. in een korte proefperiode de toluenconcentraties in de vaste fase van een gerijpte kleilaag boven het grondwatervniveau op het VADA-terrein te Wageningen verlagen tot onder de interventiewaarde;
2. het niveau van nalevering van de verontreiniging uit de kleilaag verlagen, waardoor de interventiewaarde voor grondwater van 1 mg/l niet meer wordt overschreden.

Bodemopbouw

De bodemopbouw op de locatie Wageningen is als volgt:

- 0,0 - 1,4 opgebrachte grond;
- 1,4 - 2,5 klei met geprononceerde bodemstructuur;
- 2,5 - 2,7 fijn siltig zand;
- 2,7 - 3,2 klei met bodemstructuur als onder grasland;
- 3,2 - grof zand.

Na het beëindigen van de pilotproef is mede op basis van een nauwkeurige analyse van de structuur van de bodem, door middel van ongeroerde monsters en het graven van proefsleuven, geconcludeerd dat een goed ontwikkelde bodemstructuur de bepalende factor is voor het slagen van deze saneringstechnieken.

De bodemluchtexttractiefilters dienen goed aan te sluiten op de macrostructuur van de bodem. Door versmering van de klei structuur neemt de werking van het filter sterk af.

Beproefde systemen

Er zijn twee systemen beproefd:

- a. het luchtbelsysteem: lucht van onder naar boven door de kleilaag;
- b. het bodemluchtexttractiesysteem: lucht van boven naar onder door de onverzadigde klei.

ad a. Luchtbelsysteem

De pilot met het luchtbelsysteem is uitgevoerd in een door damwanden geïsoleerd gebied van 5 bij 10 m. Dit gebied is eerder gebruikt voor een pilotproef voor de biologische in situ sanering van het grondwater onder de kleilaag tot 10 m-mv.

Onder de kleilaag is perslucht geïnjecteerd met een vrijwel continu debiet van 80 m³/uur, gedurende een periode van 2 maanden door middel van 2 injectielansen. Hierdoor is een luchtbel ontstaan, van waaruit langzaam lucht opwaarts door de kleilaag ontsnapt. Na het beëindigen van de proef zijn nog slechts lage toluëenconcentraties in de kleilaag aangetroffen.

ad b. Bodemluchtexttractiesysteem

De pilotproef met bodemluchtexttractie is uitgevoerd in een ander verontreinigd deel van de locatie met een vergelijkbare verontreinigingssituatie. Bodemluchtexttractiefilters zijn in 8 verschillende configuraties beproefd. In een periode van 3 maanden is een gemiddelde hoeveelheid lucht van 40 m³/uur onttrokken door middel van de verticale filters.

Tijdens de proef is een invloedssfeer (radiance of influence = ROI) gemeten van aan het maaiveld van 3.5 tot 5 m. De grond blijkt na de proef vrijwel volledig gereinigd tot op het grondwaterniveau. (2,80 m-mv). Op basis van de gemeten concentraties in de onttrokken lucht, tijdens de proef, is ongeveer 800 kg toluëen verwijderd (waarschijnlijk deels afkomstig van een drijfslag).

Doorlatendheid

Op basis van kolomtests en korrelgrootte-analyses met de kleigrond is een doorlatendheid van 10⁻¹⁰ tot 10⁻⁸ m/s afgeleid. Uiteindelijk na het uitvoeren van de pilotproef is de doorlatendheid van deze ontwikkelde kleilaag op basis van de resultaten (behaalde debieten) en een visuele waarneming geschat op ongeveer 10⁻⁵ m/s.

Biologische activiteit

De pilotproef is ontworpen voor de sanering van kleilagen verontreiniging met vluchtige verontreinigingen. Tijdens de proef zijn hoge CO₂-concentraties en afbraakproducten gemeten. De hoeveelheid biologische afbraak is verder in de interpretatie buiten beschouwing gelaten. Een aantal biologische aspecten kunnen echter in de praktijk relevant zijn voor de saneringssnelheid; gestimuleerde afbraak door toename van het zuurstofgehalte en biologische afbraak in de biologische actieve onverzadigde zone.

Conclusies

Het belangrijkste resultaat van de pilotproeven is dat de technieken persluchtinjectie en bodemluchtexttractie niet alleen in zandgrond werken, maar ook kunnen worden toegepast voor het saneren van kleilagen. Samenvattend kunnen deze technieken worden toegepast indien vluchtige verontreinigingen in goed ontwikkelde kleilagen met een zeer duidelijke structuur voorkomen. Indien de onverzadigde zone instaat is om de verontreinigingen biologisch af te breken, hoeft bij de luchtbelmethode niet altijd bodemluchtexttractie te worden uitgevoerd. Bij persluchtinjectie onder de kleilaag zal de lucht door de scheuren en wortel- en wormgangen zijn weg naar boven vinden. Bij bodemluchtexttractie is het van belang dat de extractiefilters zodanig worden geplaatst dat de open structuur niet wordt versmeerd, waardoor de gangen worden afgesloten. De combinatie van de twee technieken resulteert in een betere controle over het saneringsproces.

SUMMARY

In situ remediation of clay soils (HEISA)

On the site of a former printing works in Wageningen, a pilot soil remediation project has been implemented, which represents a breakthrough in the field of the in situ remediation of clay layers. Within a reasonably short period, practically all toluene was removed from a clay layer, heavily polluted with toluene. The remediation was carried out using air in two techniques; the first technique 'air bubble system', whereby air is passed from bottom to top through the clay layer, and the second technique 'extraction system', whereby the air is passed from top to bottom.

Throughout its entire thickness (3.5 metres), the clay layer has a developed structure; it consists of a mature clay layer with cracks, fissures and root and worm canals.

Purpose

The principal aim of this project on the VADA-site in Wageningen was bipartite:

- 1 in the solid phase of a ripened layer of clay above the groundwater-table, the concentrations of toluene had to be brought down to beneath the intervention value, within a short test period;
2. the leaching of contaminated substances from the clay layer had to be decreased to beneath the intervention value for groundwater (1 mg/l).

Soil structure

In schematic form, the soil has the following structure:

- 0.0 - 1.4 applied layer;
- 1.4 - 2.5 clay with pronounced soil structure;
- 2.5 - 2.7 silty fine sand;
- 2.7 - 3.2 clay with soil structure as beneath grassland;
- 3.2 - coarse sands.

At the end of the pilot test, it was decided that the developed soil structure is the determining factor for the remediation approach. For example, when installing soil air extraction filters, attention should be paid to the connection of the filters to the macrostructure in the soil.

Tested systems

Two systems were tested:

- a. air bubble system, air from bottom to top through the clay layer;
- b. extraction system, air from top to bottom through the clay layer.

re a. Air bubble system

The pilot test with air from bottom to top, the 'air bubble system', took place on a pilot test site confined by sheet piling, with a surface area of 5 by 10 metres. The pilot test area was used in 1995 and 1996 for biological in situ remediation tests in the aquifer below the clay layer down to 10 m below surface level.

Beneath the clay, air was sparged with a total amount of 80 m³/hour, more or less continuously, for a period of two months, using two injection lances. The air formed a bubble, which gradually escaped upwards through the clay layer. At the end of the pilot test, toluene was still identified in low concentrations in the clay layer.

re b. Extraction system

The air extraction pilot test was set up in a contaminated section elsewhere on the site. During the pilot test period, vertical extraction filters were tested in eight different configurations. In total, over a 3-month period, an average current flow of 40 m³/hour was continuously extracted with the vertical filters.

During the pilot test with air extraction, a radiance of influence (ROI) was measured, at surface level, of 3.5 to 5 metres. The soil was almost entirely cleaned, down to the groundwater level (2.80 m below surface level). According to the concentrations measured in the extracted air, during the extraction trial, a mass of approximately 800 kg of toluene was removed (probably also emanating from the floating layer).

Permeability

An estimate was made of the air penetration coefficient on the basis of the collated test results and on basis of grain size analysis, the permeability of the clay layer totalled approximately 10⁻¹⁰ up to 10⁻⁸ m/s. Finally as a result of the field experiments the permeability of this well developed clay turned out to be approximately 10⁻⁵ m/s.

Biological activity

The pilot test was designed for remediation of clay layers contaminated with volatile compounds. During the trial, in addition, high CO₂ concentrations and degradation products were measured. During the current trial phase the scale and contribution to the remediation yield from biological activity was not further taken into consideration. A number of biological aspects could however be relevant factors; stimulated degradation due to the availability of oxygen, biological degradation of rinsing air contaminated with toluene in the top layer of the trial area, co-metabolism, active root growth within the trial area to a depth of 2.5 metres.

Concluding remarks

The major result of this project is that the techniques of air sparging and air extraction, normally used for cleaning sandy soils, can be used for remediating a clay layer. In summary, it may be stated that in a situation whereby a volatile contaminant occurs in a clay layer with a developed soil profile, the most obvious solution is to inject air beneath the clay layer. The air at the top does not need to be captured, and cleaned, if the top layer is sufficiently biologically active. By injecting air beneath the clay a simple connection is achieved with the natural soil structure. From a technical point of view, preventing the clogging of filter walls, or recovering a connection between soil air extraction filters and the soil structure is more complex.

If it is impossible to build up sufficient pressure beneath the clay layer, as a result of leakage or lateral escape, it is still possible to opt for the active extraction of air. A combination of the two techniques can also result in better management of the escaping contaminated air.

BEGRIPPENLIJST

Begemann-boring	boring waarbij ongestoorde grondmonsters worden genomen
BEVER	Beleidsvernieuwing bodemsanering
BTEX	Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen en Xylenen
drijfslaag	verontreinigingslaag op de grondwaterspiegel
FFD-meting	Fuel Fluorescence Detector, meting om vast te stellen of er wel of geen verontreiniging in de bodem aanwezig is
HEISA	Heterogene Extensieve In situ Sanering
hydraulic of pneumatic fracturing	het onder hoge druk injecteren van vloeistof of gas, waardoor de bodem beter doorlatend wordt gemaakt
nalevering	het afstaan van verontreiniging door bodemdeeltjes naar het grondwater na beëindiging van de sanering
NOBIS	Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering
TFE-systeem	Twee Fasen Extractiesysteem, systeem om zowel bodemlucht als grondwater te onttrekken
VOCI	Vluchtige Organische Chloorverbindingen

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Algemeen

Bij minder goed doorlatende bodemtypen wordt de inzet van in situ saneringstechnieken over het algemeen in de planvorming nog vaak buiten beschouwing gelaten. De eigenschappen van deze bodemtypen worden zodanig ingeschat, dat de verwachting is dat met in situ technieken onvoldoende resultaat kan worden behaald. Ook bij reeds uitgevoerde saneringen met in situ technieken blijken slechter doorlatende lagen vaak een beperkende factor te zijn. Dit heeft mede te maken met de beoordelingscriteria. Een sanering wordt pas als succesvol beoordeeld als de concentraties in de verontreinigde grond zijn gedaald tot ongeveer de streefwaarden. Als andere criteria, zoals de mate van nalevering van de verontreiniging aan het grondwater en de daaraan verbonden risico's voor de volksgezondheid en het milieu, voor de beoordeling worden gehanteerd, ontstaat er een positiever beeld over de inzet van in situ technieken. Met de inzet van in situ technieken bij slechter doorlatende bodemtypen bestaat nog weinig praktijkervaring.

De praktijkproef in het kader van dit NOBIS-project, die wordt beschreven in dit rapport, heeft zich gericht op de sanering van een kleideklaag.

1.2 Verontreinigingssituatie en verontreinigingshistorie

Het terrein van het bedrijvencentrum VADA is gelegen aan de Costerweg in de bebouwde kom van Wageningen. Het terrein heeft een oppervlakte van 35.000 m² en biedt sinds augustus 1987 huisvesting en dienstverlening aan verschillende bedrijven en instellingen. In de bedrijfsgebouwen was voorheen de drukkerij VADA gevestigd. Het terrein is verontreinigd met BTEX (vooral toluene) en VOCl. De praktijkproef richt zich met name op de verwijdering van toluene uit de kleilaag. Toluene is toegepast in het drukproces. De ouderdom van de tolueneverontreiniging is minimaal 20 jaar.

De ongeroerde kleilaag heeft een dikte van circa 1,8 m en komt voor op een diepte vanaf circa 1,4 m-mv. De bodem tussen het maaiveld en de kleilaag bestaat uit ophooggrond met zand en puin. Onder de kleilaag bevindt zich een watervoerend pakket met een dikte van circa 25 m. De kleilaag heeft een ontwikkelde bodemstructuur in de vorm van krimpscheuren en wortelgangen en plaatselijk zandinschakelingen. Dit geeft aan dat er sprake is van een gerijpte kleilaag.

De grondwaterstand fluctueert circa 1 à 1,5 m. De laagste grondwaterstand ligt juist onder de kleilaag. In 5.2 is de bodemopbouw en kleistruktuur schematisch weergegeven (zie fig. 13).

Verondersteld wordt dat toluene vanuit het watervoerende pakket opwaarts de kleilaag is ingedrongen. In het watervoerende pakket komt toluene voor als drijfslag.

In de periode vanaf 1995 is de sanering van het watervoerende pakket met succes door DHV beproefd. Thans wordt door DHV onderzocht of alternatieve in situ sanering van het watervoerende pakket mogelijk is. Dit staat buiten dit NOBIS-project.

1.3 Conceptueel model voor de verontreinigingssituatie en risico's

Bij de sanering van het diepere watervoerende pakket moet worden voorkomen dat nalevering van verontreiniging uit andere bodemlagen het saneringsresultaat na verloop van tijd weer tenietdoet. In het geval van de sanering van de kleilaag op het VADA-terrein in Wageningen is

daarom onder andere de mate van nalevering uit de kleilaag, en daarmee de beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit in het watervoerende pakket, als criterium gesteld voor de bepaling van de terugsaneerwaarde van de verontreiniging in de kleilaag. Met dit streven naar voldoende risicoreductie wordt aangesloten bij de saneringsdoelstellingen die thans in het kader van de vernieuwing van het bodemsaneringbeleid (BEVER) worden ontwikkeld.

Het conceptuele verontreinigingsmodel voor het VADA-terrein, waarbij een kleilaag verontreiniging nalevert aan een reeds gesaneerd dan wel een van oorsprong schoon watervoerend pakket en waarbinnen vervolgens een snelle verspreiding naar de omgeving en de diepere bodemlagen plaatsvindt, is zeker voor Nederland generiek te noemen.

1.4 Aanleiding en motivering voor de praktijkproef

Aan de praktijkproef zijn in het kader van NOBIS een aantal onderzoeksfases voorafgegaan¹, waarin op basis van de resultaten van de beproeving van grondmonsters² van het VADA-terrein en modelberekeningen conclusies zijn getrokken over de wijze en haalbaarheid van in situ sanering van de kleilaag. In deze fasen is op laboratoriumschaal en modelmatig onderzocht wat het stofgedrag en stoftransport is van toluen. De kleilaag is daarin als een heterogene kleilaag beschouwd, dat wil zeggen, een kleilaag met daarin/tussen dunne zandlagen. De kleilaag zelf is als compact beschouwd. Onderstaand zijn de bevindingen samengevat:

Modellering

Voor de grondwater- en luchtstroming is gebruik gemaakt van het model MODFLOW en voor het stoftransport van het model ECOSAT. De berekeningen aan de sanering van klei door verwijdering van de verontreiniging (tolueen) via de waterfase en verwijdering via de gasfase hebben een aantal duidelijke conclusies met betrekking tot de haalbaarheid opgeleverd (zie bijlage H). Daarnaast zijn een aantal onzekerheden gesignaleerd over de technische uitvoerbaarheid van de sanering op de gemodelleerde wijze die met vervolgonderzoek moeten worden weggenomen of worden verkleind.

Sanering via de waterfase

De belangrijkste bevinding is dat verwijdering van toluen via de waterfase zeer traag zal verlopen. In de beoordeelde verontreinigingssituatie zal het tientallen jaren duren voordat de interventiewaarde in de klei is bereikt. Het stoftransport in de waterfase wordt daarbij vooral door trage diffusie veroorzaakt. Afbraak zou deze tijd kunnen halveren indien geen zuurstoflimitatie en andere beperkingen (te hoge toluenconcentratie) optreden, hetgeen echter wel wordt verwacht. Trage desorptie speelt bij de zeer lage waterfluxen geen rol.

¹ De volgende deelrapporten zijn opgesteld:

<i>Titel:</i>	<i>Datum:</i>	<i>Kenmerk:</i>
- Deelresultaat 1: locatiekeuze	23/9/96	K1869.71.002, MT-BD19966159
- Deelresultaat 2: fysische eigenschappen van de bodem	18/4/1997	96-129/A
- Deelresultaat 3: verontreinigingseigenschappen	4/7/1997	K1869.71.005, MT-BD973402
- Deelresultaat 4: modellering van grondwaterstroming, luchtstroming en stoftransport	3/7/1997	K1869.71.006/7, ML-BH971055

² De volgende fysische bodemeigenschappen zijn bepaald: waterdoorlatendheid, luchtdoorlatendheid, porositeit, vochtprofiel, dispersiecoëfficiënt en zetting.

De volgende verontreinigingseigenschappen zijn bepaald: desorptiegedrag, massaoverdrachtscoëfficiënt, diffusiecoëfficiënt en afbraaksnelheid.

Sanering via de gasfase

Gezien de gemeten relatief hoge luchtdoorlatendheden van de kleimonsters zijn hoge luchtfluxen mogelijk. Hierdoor zal via vervluchtiging zeer snel verwijdering van toluen kunnen plaatsvinden (volgens de berekeningen tientallen dagen). De vraag is echter of in de praktijk deze hoge luchtfluxen in de klei haalbaar zijn. Verificatie is nodig.

Afbraak en vervluchtiging kunnen beide bijdragen aan de toluenverwijdering via de gasfase. De afbraaksnelheid kan echter sterk worden beïnvloed door diverse limiterende factoren (geen zuurstoflimitatie). Bij in situ sanering lijkt optimalisatie van beide processen nuttig.

Voor de luchtdoorstroming is het niet duidelijk geworden in welke mate de trage desorptie kan zorgen voor de vertraging van de saneringsduur. Het is mogelijk dat hier de trage massaoverdracht tussen de waterfase en de gasfase een belangrijke rol speelt.

Voor de luchtdoorlatendheid is verder het vochtgehalte in de grond van groot belang. Verlaging van dit gehalte zorgt voor meer vrije poriën en dus voor een grotere luchtdoorlatendheid.

Scheuring van de kleilagen, door uitdroging tijdens de sanering, maar eventueel ook oorspronkelijk aanwezige preferente stroombanen (zandige insluitingen of anderszins beter doorlatende delen in de klei) kunnen tot kortsluitstromingen leiden die een effectief drukverschil tussen de kleilaag insluitende zandlagen onmogelijk maken. In dat geval zal het advectief transport beperkt blijven tot de preferente stroombanen en wordt de tragere gasdiffusie in de niet-doorstroomde delen van de klei het tijdsbepalende proces. Uit de modelberekeningen van het stoftransport blijkt dat hiermee weliswaar langere maar nog een hanteerbare saneringsduur kan worden bereikt (10 à 20 jaar), mits de dikte van de kleilagen dan wel de grootte van de kleiaggregaten beperkt blijft tot maximaal enkele decimeters. Het is mogelijk dat ook hier de trage massaoverdracht tussen de waterfase en de gasfase een rol speelt.

Configuratie onttrekkingsmiddelen, bodemheterogeniteit

Het voorkomen van heterogeniteiten (scheuren, zandlaagjes en zandlenzen enz.) in ondiepe kleiige afzettingen in Nederland is eerder regel dan uitzondering (mede conclusie van PIT-geologie/geohydrologie). Hiermee moet dus rekening worden gehouden. Het is echter niet goed mogelijk om het heterogeniteitspatroon in afzettingen, zoals op het VADA-terrein, door middel van conventioneel veld- en laboratoriumonderzoek te karakteriseren.

Vooralsnog is geconcludeerd dat dergelijke heterogeniteiten een sanering door middel van gastransport niet per definitie onmogelijk maken, zelfs als blijkt dat gasdiffusie met advectie in preferente stroombanen het bepalende saneringsproces is. In de gemodelleerde situatie is de maximale diffusielengte bepalend voor de duur van het diffusieproces. Deze lengte is ten hoogste (bij een luchtflux van 0 m/d) gelijk aan de helft van de maximale kleilaagdikte tussen twee in het doorstroomproces betrokken zandlagen. De diffusielengte wordt verder in belangrijke mate bepaald door de heterogeniteit van de bodem (tussenliggende zandlaagjes en zandlenzen, krimp-scheuren). Getracht zou kunnen worden de kleilaag zodanig te modificeren dat de aggregaatgrootte, en daarmee de diffusielengte, afneemt (wellicht mogelijk door hydrofracturing).

Trage massaoverdracht

In de stoftransportmodellering is verondersteld, dat de evenwichtsconcentraties in de waterfase en de gasfase zich instantaan instellen als functie van de betreffende verdelingscoëfficiënten en van de totaal nog aanwezige massa in de bodem. Het afvoerproces van toluen door de gasgevulde poriën is dan dus bepalend voor de snelheid waarmee de massa toluen in het saneringsobject afneemt. Als dit proces goed verloopt (de gasflux is voldoende hoog), gaat de veronderstelling van instantane instelling van de verdelingsevenwichten niet zonder meer op. Waar-

schijnlijk treedt ook aanzienlijke dispersie op door een groot verschil in stroomsnelheden in de verschillende stroombanen. Dit effect is mogelijk groter dan de trage massaoverdracht. In de stoftransportmodellering is deze situatie niet beschreven bij gebrek aan informatie over de daarbij betrokken invoerparameters, uitgezonderd de O₂-limitatie bij afbraak. Het is echter niet uitgesloten, dat deze processen op den duur limiterend worden voor de verwijderingssnelheid van toluen uit het saneringsobject.

Het rendement in termen van de verwijdering van de massa toluen uit de grond (zowel in de vorm van puur product als opgelost of geadsorbeerd) moet nader worden onderzocht.

Conclusies

Het transport van toluen uit de klei naar de waterfase verloopt voornamelijk via diffusie. De maximaal haalbare waterflux $V_{D,W}$ is circa 0,2 mm/dag, waardoor saneringstijden van enkele tientallen jaren zijn te verwachten. Afbraak bij voldoende zuurstof zou deze periode kunnen halveren.

De luchtdoorlatendheid van de klei is hooggebleken, met een $V_{D,L} = 3,6$ m/dag. Het transport van toluen met de klei naar de gasfase loopt bij deze snelheid vooral via vervluchtiging, waarbij de diffusie ondergeschikt is. Via luchtdoorleiding en vervluchtiging is te verwachten dat de sanering van toluen enkele tientallen dagen kan gaan bedragen. Een bijkomend positief effect is een toename van de biologische afbraak van toluen door de toename van de zuurstofgehalten.

De berekeningen met sanering via de gasfase zijn omgeven met een grote bandbreedte, veroorzaakt door de nog onbekende nalevering van toluen uit de klei. Deze bandbreedte van 1 tot 20 jaar berust op ontbrekend inzicht in, of minder betrouwbare bepalingsmethoden van een aantal bodemkenmerken. In dit verband worden met name genoemd de drainagetijd, luchtdoorlatendheid, trage massaoverdracht, bodemstructuur, aggregaatgrootte en de daarmee samenhangende processen, waarin snel adventief transport door scheuren en poriën dan wel trager diffusietransport bepalende factoren zijn.

Sanering van de kleilaag via de gasfase is op grond van deze vooronderzoeken als haalbaar beoordeeld. Omdat fundamentele kennis van en betere bepalingsmethoden voor sommige van de genoemde aspecten niet voorhanden zijn, is besloten om direct een praktijkproef uit te voeren op het VADA-terrein door middel van luchtonttrekking en luchtinfiltratie, zonder verdere proeven op laboratoriumschaal.

1.5 Doelstelling van de praktijkproef

Het doel van de in situ praktijkproef is om vast te stellen welk resultaat te halen is met luchtdoorspoeling van een kleideklaag.

Als beoogd resultaat is in het onderzoeksvorstel vastgesteld dat de proefsanering als geslaagd kan worden beschouwd als in de betrekkelijk korte proefperiode een zodanig grote verontreinigingsvracht is verwijderd dat de toluenconcentraties in de vaste fase zijn gedaald tot onder de interventiewaarde voor grond, of het niveau van nalevering van de resterende verontreiniging van de vaste fase naar het grondwater zodanig is verlaagd dat, juist stroomafwaarts van het gesaneerde gebied, de interventiewaarde voor grondwater van 1 mg/l niet meer wordt overschreden. Kortom, de proef wordt beoordeeld aan de hand van drie aspecten:

1. verwijderen van grote vracht in korte tijd;
2. eindconcentratie in de kleideklaag lager dan de interventiewaarde;
3. resterende nalevering naar het grondwater te verwaarlozen.

1.6 Saneringsprincipe

De proef is uitgevoerd op het terrein van de voormalige drukkerij VADA in Wageningen. Nabij de voormalige ondergrondse toluentanks is de bodem sterk verontreinigd met toluen. Ter plaatse van de locatie komt een heterogene deklaag voor met een dikte van 3,5 m. De proef in het kader van HEISA is uitgevoerd met twee verschillende benaderingswijzen:

1. Het aanbrengen van een luchtbel onder de kleideklaag ter plaatse van de in 1996 ingerichte proeflocatie. Dit proefgebied, met een omvang van 5 bij 10 m, is gescheiden van de omgeving door damwanden. In het proefgebied zijn vele monitoringspunten aangebracht.
Het saneringsprincipe is een opwaartse luchtstroming door de kleilaag.
2. Het uitvoeren van bodemluchtonttrekking ter plaatse van een (waarschijnlijk) niet eerder doorboord deel van de kleideklaag met een oppervlakte van 4 bij 4 m.
Het saneringsprincipe is luchtstroming door de kleilaag van boven naar onder.

In bijlage A zijn de locaties waar deze proeven zijn uitgevoerd weergegeven.

HOOFDSTUK 2

PROJECTACTIVITEITEN

2.1 Algemeen

Het onderzoek is uitgevoerd in twee strategieën:

- het aanbrengen van een luchtbel onder de kleilaag, waardoor een luchtstroom ontstaat van beneden naar boven;
- het onttrekken van lucht op het scheidingsvlak tussen de verzadigde en onverzadigde zone, waardoor een luchtstroom ontstaat van boven naar beneden.

Voor alle boringen ten behoeve van de extractiefilters geldt, dat deze handmatig met een 10 cm Edelman-boor zijn geplaatst (onder de (schijn-)grondwaterspiegel is gepulst) en dat rond het HDPE-filter (diameter uitwendig 50 mm, horizontale filterspleten van 0,5 mm breed) over de volle filterlengte grind is aangebracht met een korrelgrootte tussen 0,8 mm en 1,2 mm.

2.2 Saneren door een luchtbel onder de kleideklaag

2.2.1 *Situatie en principe* (zie fig. 1 en 2)

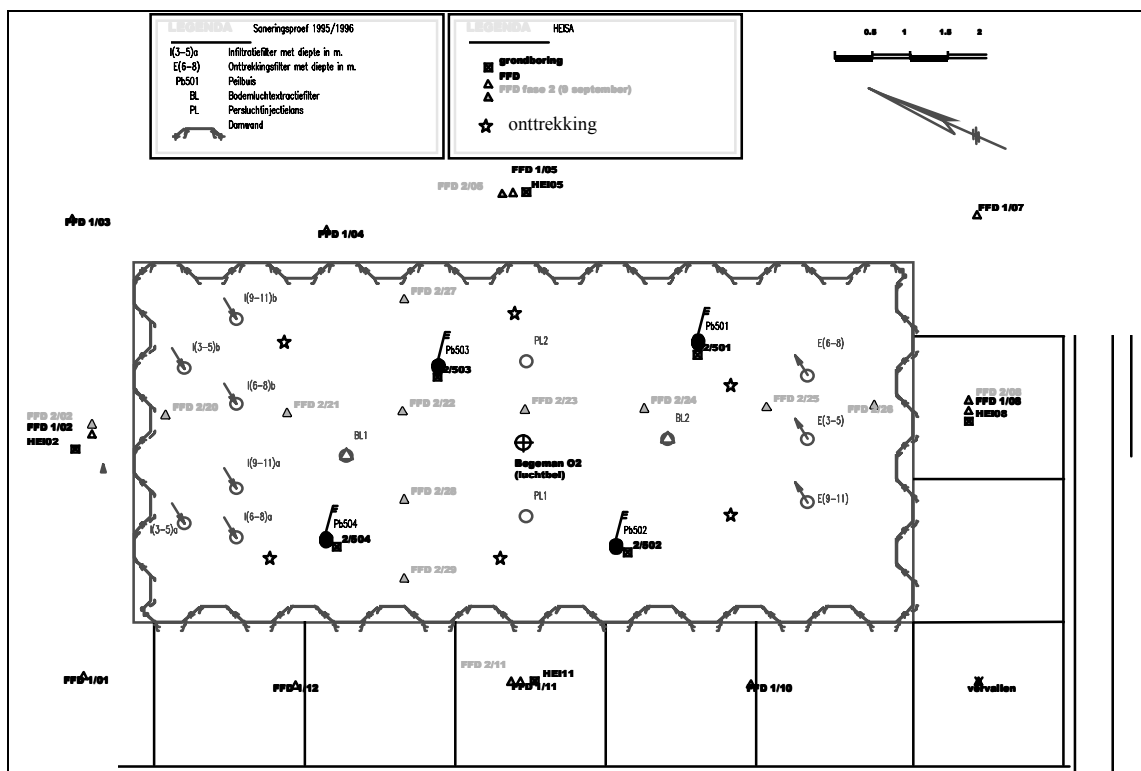


Fig. 1. Situatie van het proefgebied van het luchtbelstelsel.

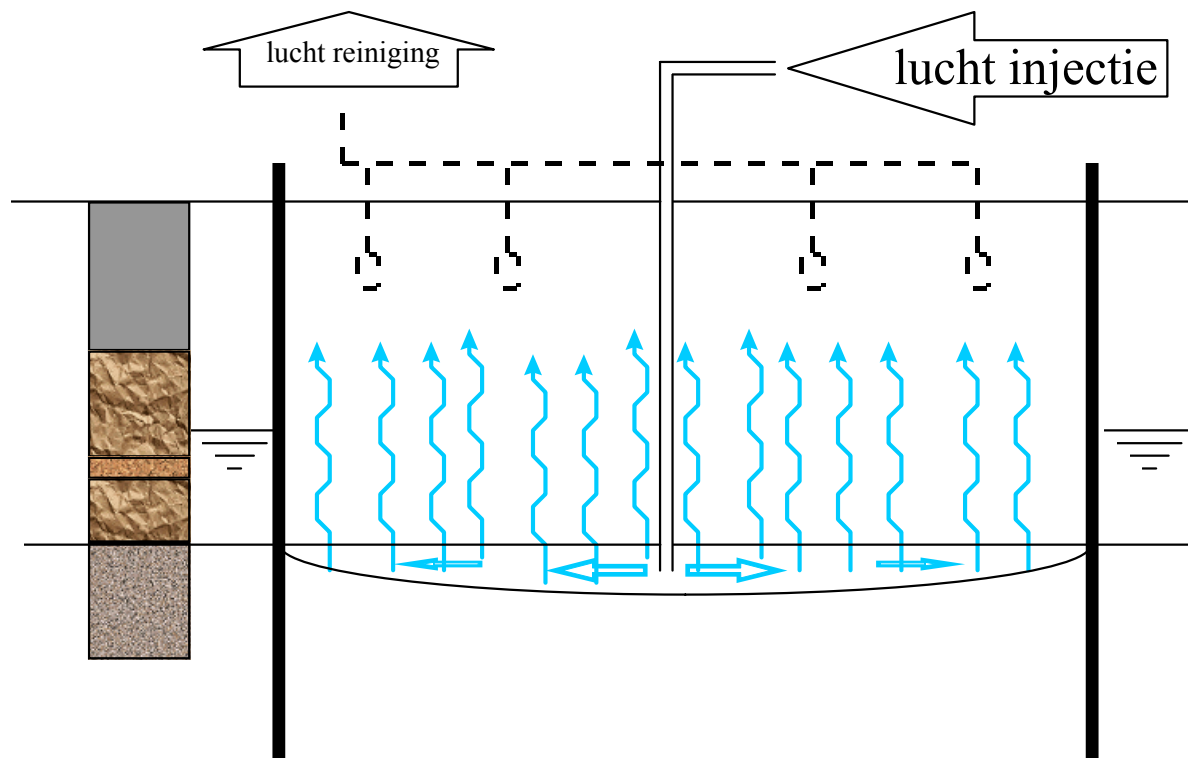


Fig. 2. Principe van het luchtbelstelsel in dwarsdoorsnede.

2.2.2 *Luchtbel onder de kleilaag*

Het aanbrengen van een luchtbel onder de kleilaag is uitgevoerd binnen het bestaande damwandproefvak van 5 bij 10 m (zie bijlage B). De benodigde perslucht is ingebracht via de ondiepe filters (3 - 5 m-mv) van de peilbuizen 502 en 503.

De proef heeft bestaan uit twee fasen:

1. Het met lucht spoelen van het grensvlak tussen de kleideklaag en de zandlaag met als doel een eventueel aanwezige drijf laag te verwijderen. Het aanbrengen van de luchtbel en het aflaten van de luchtbel.
2. Het aanbrengen en in stand houden van een luchtbel onder de kleideklaag en het afvangen van de door de kleilaag gedrongen lucht boven de kleilaag.

Aanvankelijk heeft het injecteren van lucht bij de volle capaciteit ($40 \text{ Nm}^3/\text{uur}$) geen enkel effect teweeggebracht op de grondwaterstanden in de peilbuizen. Vastgesteld is dat veel lucht is ontweken langs bestaande doorboringen van de kleilaag, ondanks dat alle boringen waren afgedicht met bentoniet. Het afdichten van waarneembare lekken had nog steeds onvoldoende effect op de grondwaterstanden in de peilbuizen. Het verdubbelen van de inblaascapaciteit is echter uiteindelijk de oplossing gebleken om een luchtbel van circa één meter dikte aan te kunnen brengen.

Het spoelen van de zandlaag onder de klei, door het alternerend 'opblazen en weer laten leeglopen van de bel' via aflatfilters direct onder de klei, is niet gerealiseerd. Daarentegen is de bel, nadat deze eenmaal was aangebracht, in stand gehouden met een overdruk van circa 100 mbar. De helft van de geïnjecteerde lucht is als 'spoellucht' gecontroleerd opgevangen en gereinigd. De andere helft ($40 \text{ Nm}^3/\text{uur}$) is op onnavolgbare wijze verdwenen via het 50 m^2 plafond van de bel.

Tijdens de spoelfase zijn geen nieuwe 'schoorsteentjes' aangebracht direct onder de kleilaag, maar is gebruik gemaakt van een vijftal reeds bestaande ondiepe filters (I(3-5)a, I(3-5)b, E(3-5), Pb501(3-5) en Pb504(3-5)). Voor het bewaken van de dikte van de luchtbel en het monitoren van de stijghoogte van het freatische water zijn de middeldiepe filters E(6-8) en I(6-8)a gebruikt.

Om in de tweede fase de verontreinigde lucht te kunnen afvangen, zijn een zestal bodemluchtextractiefilters in de klei aangebracht (zie bijlage B). Hiermee is een extra potentiaalverschil aangebracht (overdruk onder de klei en onderdruk in de klei). De luchtonttrekking is uitgevoerd met een vacuümpomp (luchtdebiet vrijloop 60 Nm³/uur); het in de waterafscheider opgevangen water is via een watermeter naar de zuiveringsinstallatie gepompt. Het verdwijnen van circa de helft van de ingeblazen lucht is geacht grotendeels langs andere 'wegen van minste weerstand' te geschieden, dan door de klei heen.

Van de spoellucht en de geëxtraheerde lucht zijn, behalve het debiet, tevens de concentraties van toluen, CO₂ en O₂ gemonitord.

2.3 Saneren door het onttrekken van lucht

2.3.1 *Situatie en principe* (zie fig. 3 en 4)

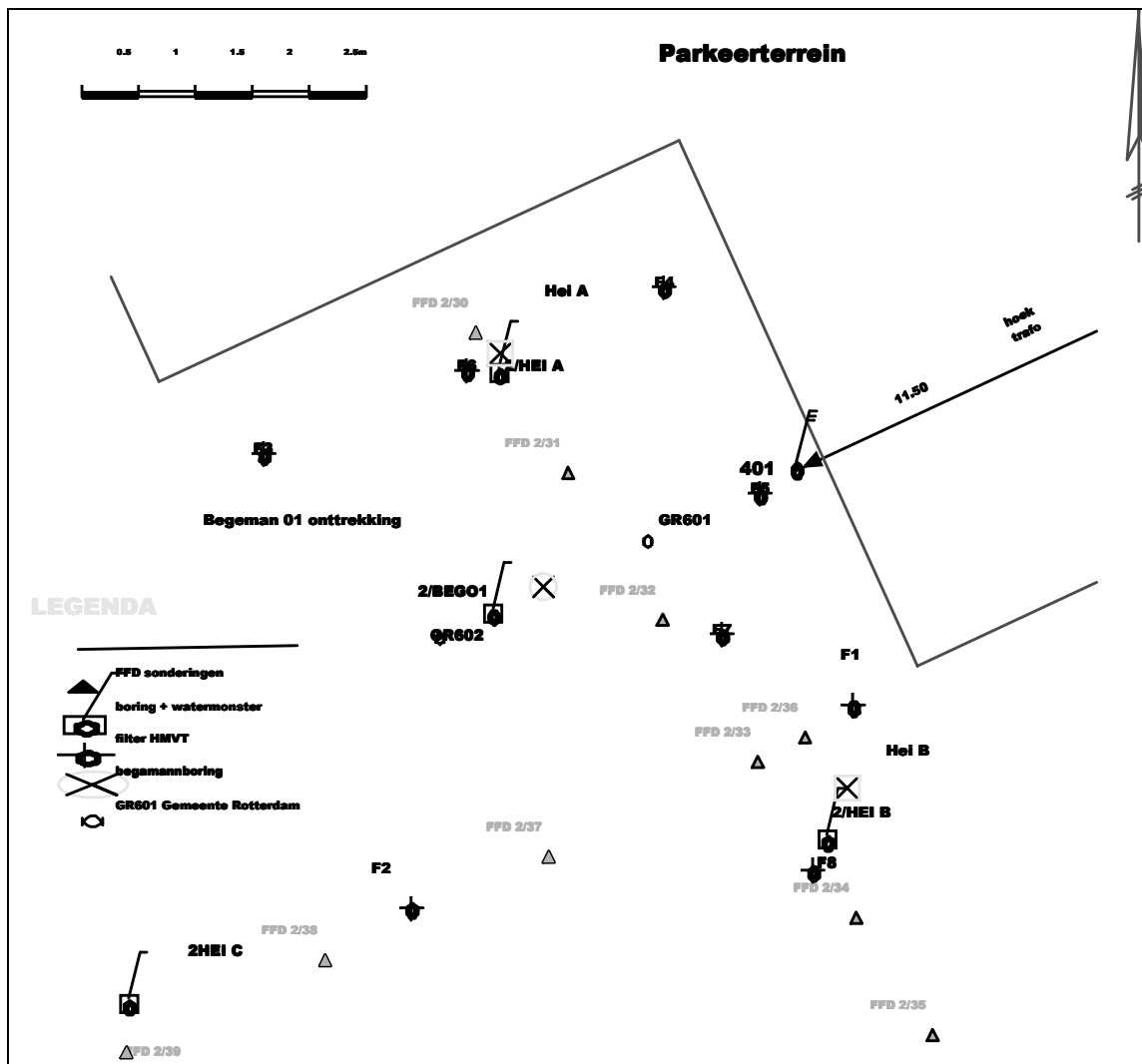


Fig. 3. Situatie van het proefgebied van de bodemluchtextractie.

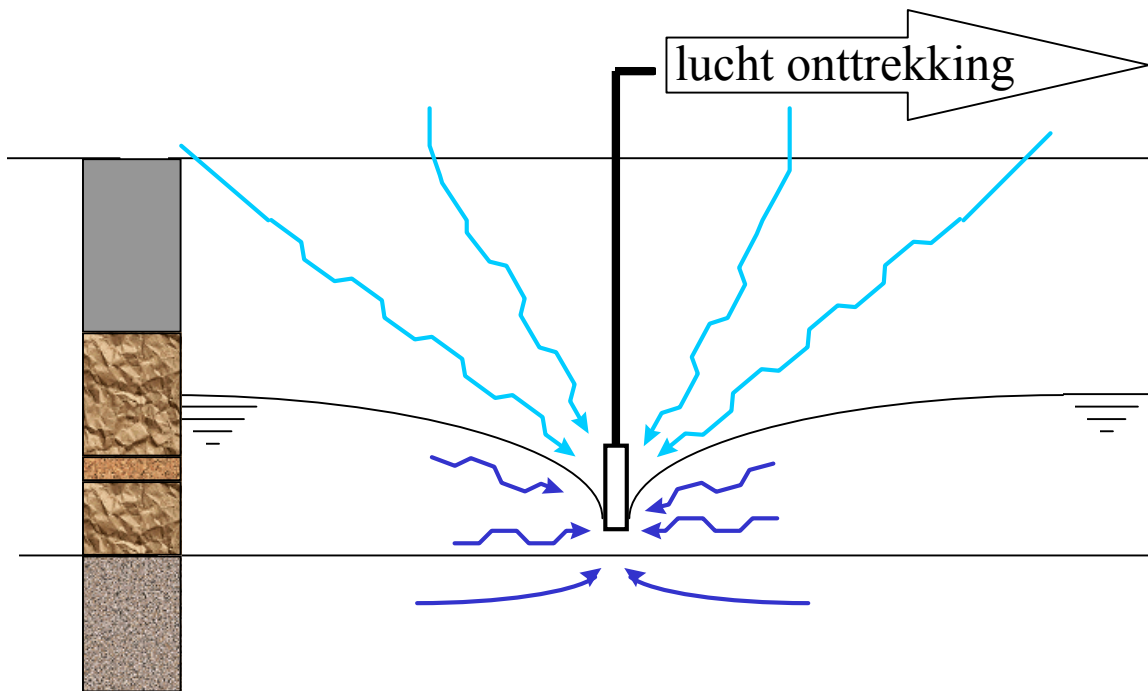


Fig. 4. Principe van het bodemluchtextractiesysteem in dwarsdoorsnede.

2.3.2 *Onttrekken van lucht op het grensvlak van de onverzadigde en verzadigde zone*

In de nabijheid van de reeds aanwezige peilbuis 401 is een proefvak (vierkant van 4 bij 4 m) ingericht met bodemluchtextractiefilters (F1 t/m F4) op de hoekpunten (zie tekening in bijlage C). Het systeem moest feitelijk functioneren als een Twee Fasen Extractiesysteem (TFE-systeem), waarbij naast bodemlucht tevens relevante hoeveelheden water worden onttrokken.

Uiteindelijk heeft de onttrekkingsproef bestaan uit 7 deelperiodes in filterstelling, debiet en configuratie. Drie varianten zijn langere tijd in stand gehouden.

Omdat de grondwaterstand bij de aanvang van de proefperiode erg hoog was (bijna een halve meter boven de veronderstelde klei-/zandovergang op 3,2 m-mv), zijn deze filters gedeeltelijk onder de vigerende grondwaterstand geplaatst en verder geheel in de klei. In de loop van de proefperiode is F1 met een andere filterstelling herplaatst en zijn verder nog een viertal extra bodemluchtextractiefilters geplaatst met variërende filterstelling (F5 t/m F8) (zie fig. 5).

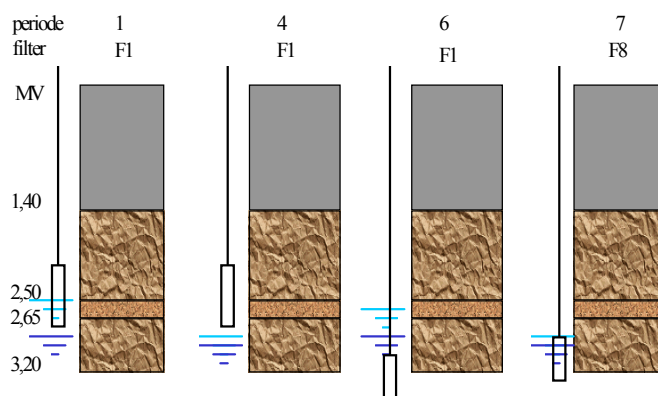


Fig. 5. Filterstelling ten opzicht van de grondwaterstand.

De luchtonttrekking (extractie) is uitgevoerd met een vacuümpomp (debiet 60 Nm³/uur) met voorgeschakelde waterafscheider. Het verontreinigde water is via een watermeter naar de waterzuiveringsinstallatie gepompt. De bodemlucht heeft een dusdanig hoge verontreinigingsvracht (voornamelijk toluen) geleverd, dat na de aanvankelijke zuivering hiervan over actieve kool is overgeschakeld op zuivering door middel van katalytische oxidatie; deze zuiveringsmethode is gebruikt tot aan het eind van de proefperiode.

Tijdens de proefperiode zijn in de onttrokken bodemlucht (discontinu) de concentraties BTEX en VOCl gaschromatografisch vastgesteld (toluën tevens met Dräger) en zijn volumepercentages CO₂ en O₂ gemeten met de META-sonde (als CO₂ tot nabij of onder de detectiegrens van 0,5 % daalde, is tevens een Dräger-meting uitgevoerd). Ook zijn de stijghoogten van Pb 401(3,5-4,5) en de ver buiten het invloedsgebied van de extractie gelegen Pb 803 gevolgd.

Al vrij snel is gebleken dat de metingen van het invloedsgebied van de luchtonttrekking zeer heterogene resultaten opleverde, met name in het verticale vlak. Het monitoren van toluen, CO₂ en O₂ op een tweetal plaatsen boven het bodemluchtexttractiesysteem op circa 1 meter boven de onderzijde van de klei is daarom achterwege gelaten.

2.4 Nulmeting en eindmeting

De beginconcentratie en de beginvracht van toluen in de klei zijn afgeleid uit de eerder beschikbare grondanalyses van binnen de damwandkuip en een aantal aanvullende metingen *rondom* de kuip. De metingen rondom de kuip zijn uitgevoerd door sonderingen tot onder de kleilaag. Gelijktijdig is een continue fuel fluorescence detectie (FFD) uitgevoerd met de meetcel in de punt van de sonde. De uitlezing van de meetcel in mV heeft een relatie met het gehalte koolwaterstoffen in de bodem (Joustra Geomet BV, Alphen aan den Rijn). De sondeermetingen zijn gekalibreerd met enkele GC-analyses op ongeroerde steekbusmonsters. Er is voorafgaand aan de proef niet binnen de damwandkuip gesondeerd om verstoring van de bodemopbouw te voorkomen. In de damwandkuip is voorafgaand aan de proef één Begemann-boring verricht (Grondmechanica Delft) om inzicht te verkrijgen in de opbouw en structuur van de kleilaag. Tevens is getracht ongeroerde monsters te nemen uit de Begemann-boorkern voor analyse.

De eindconcentraties en eindvracht van toluen in de klei zijn bepaald aan de hand van een serie sondeermetingen *binnen* de kuip, gekalibreerd met GC-analyses op steekbusmonsters. Tevens zijn enkele sondeermetingen verricht buiten de kuip ter controle van de reproduceerbaarheid van de sondeermetingen.

Na de proef is in de kleilaag binnen en in de kleilaag buiten de damwandkuip tevens een profielkuil gegraven tot de grondwaterspiegel voor een visuele beoordeling van de bodemopbouw en de kleistructuur. Uit de wanden van beide profielkuilen zijn met steekbussen monsters genomen en geanalyseerd op aromaten (GC) met het doel inzicht te krijgen in de ruimtelijke verdeling van de (rest)verontreiniging.

HOOFDSTUK 3

RESULTATEN VAN HET LUCHTBELSYSTEEM

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van de luchtbelproef. Daarbij worden de verzamelde gegevens uit het nulonderzoek, de gegevens die zijn vrijgekomen tijdens de proefneming en de gegevens van de eindbemonstering gepresenteerd en geïnterpreteerd. Het grootste deel van de informatie is afkomstig van HMVT als uitvoerende aannemer, aanvullende informatie is verzameld door DHV, commentaren en beoordelingen van het bodemprofiel zijn afkomstig van Grondmechanica Delft en AB-DLO.

3.2 Bodemopbouw en effecten ten gevolge van de proef

In het proefgebied zijn een groot aantal grondboringen verricht in de verschillende fasen van de projectvoorbereiding. De volgende veldonderzoeken zijn relevant:

1. boringen 501, 502, 503 en 504 (DHV), 3 series april 1995, november 1995 en september 1998;
2. Begemann-boring nummer 02 (Grondmechanica Delft), april 1998;
3. proefkuil 1;
4. HEI02, HEI05, HEI08, HEI11 (vlak buiten de damwand).

Hieronder is de profielbeschrijving van kuil 1 (veldonderzoek 3, op 10 september 1998) weergegeven. Kuil 1 is gegraven binnen de damwand na de beëindiging van de luchtbelproef.

Diepte (m-mv): Beschrijving:

0,0 - 1,7	Klei, zeer zandig, met grind en puin, bruinrijze structuur: kluiten en brokken kleiige grond met zand en puin, variabele dikte in de kuil. Opgebrachte grond.
1,7 - 1,9	Klei, matig siltig, zwak zandig, bruinrijze (30 % lutum, 4 % OM) structuur: 2 ^{de} fijn blokkig, 1 ^{ste} middel-grof blokkige wortelnetafdrukken op de aggregaatzijden, veel wormgangen met oranjebruine huiden, veel zeer fijne gangen. Verstoorde toplaag.
1,9 - 2,3	Klei, matig siltig, bruin (lutum 34 %) grijs gevlekte oranjebruine structuur: 2 ^{de} fijn-middel blokkig, veel kleihuiden, 1 ^{ste} grof prismatisch met donkere huiden (70 - 100 mm prisma's met spleten van 0,5 tot 1 mm open), veel fijne (wortel-) gangen, veel wormgangen, prismatische structuur in de onderste 0,2 m zwak. Bodem met zeer uitgesproken bodemstructuur.
2,3 - 2,5	Klei, zeer zandig, bruine en bruinrijze (lutum 20 %) structuur: 2 ^{de} fijn-middel blokkig, 1 ^{ste} zwak grof prismatisch met bruine huiden, veel fijne gangen.
2,5 - 2,75	Zand fijn, siltig ($M_{50} = 170 \mu\text{m}$, silt 8 %), onderste 50 mm zwarte en grijze vaak met vervormde laminatiestructuur: middel blokkig zwak ontwikkeld, plaatselijk duidelijk, weinig wormgangen.
2,75 - 3,45	Klei, matig siltig, bruine en grijze (lutum 30 %) structuur: middel blokkig en zwak prismatisch, veel fijne (wortel-)gangen met lichtgrijze wanden, plaatselijk oranjebruin, top grijs met oranjebruine gangen. Bodem met normale structuur met verkleuring van de voormalige vegetatielaag aan de bovenkant.
3,45 - 3,6	Zand met grind.

In bijlage D wordt in detail ingegaan op de bodemopbouw. Daarvan zijn tevens foto's opgenomen.

3.3 Verloop van de proef en waarnemingen

De waarnemingen zijn in tabelvorm opgenomen in bijlage B. Deze beschrijven globaal twee periodes:

1. periode 27 mei - 6 juli, waarin de zandlaag direct onder de kleideklaag met lucht is gespoeld;
2. afsluitende periode 6 - 20 juli, waarin het luchtdrukverschil over de kleilaag is vergroot door het gelijktijdig uitvoeren van een injectie onder de klei en een vacuümextractie via een zestal filters in de klei.

In beide periodes is circa 80 Nm³/uur lucht van atmosferische samenstelling (0,03 % CO₂ en 20,8 % O₂) onder de klei ingeblazen. In figuur 6 is het verloop van dit proces weergegeven.

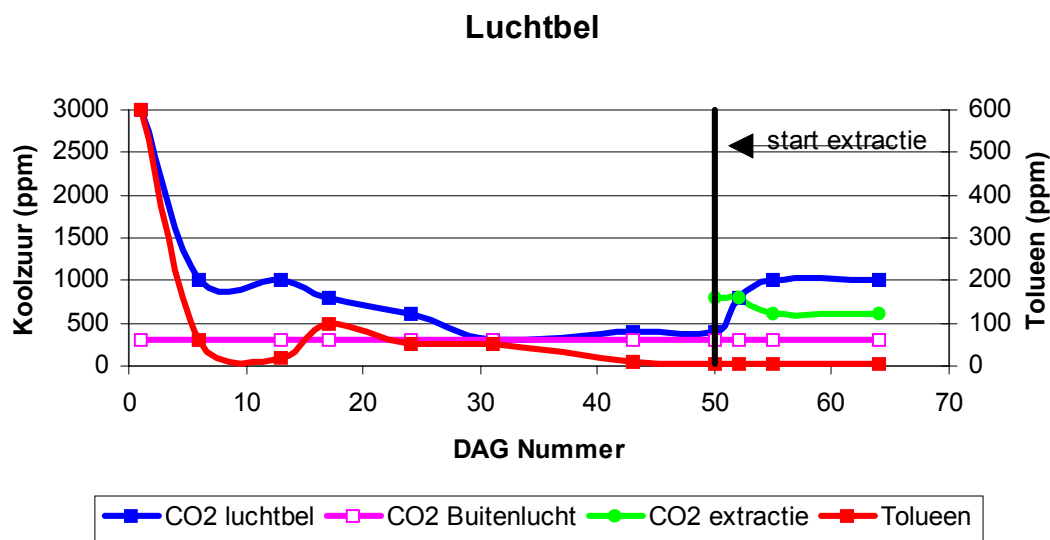


Fig. 6. Verloop van het 'luchtbel'proces.

Bij de eerste metingen in een steady-state spoelsituatie op 27 mei komt naar voren, dat er onder de klei reeds biologische afbraak op gang is gekomen, gezien de CO₂- en O₂-gehalten en de aanwezigheid van vinylchloride als afbraakproduct van tetrachlooretheen. In het verloop van de spoelperiode dalen in de afgelaten spoellucht de toluene- en VOCl-concentraties, terwijl CO₂ en O₂ steeds meer atmosferische waarden aannemen.

Bij gelijkblijvende hoeveelheden ingeblazen en afgelaten lucht daalt de benodigde overdruk voor het inbrengen van de perslucht. Dit duidt op een steeds verdergaande ontwatering van de ruimte binnen de luchtbel. De fluctuaties in de overdruk van de luchtbel en het effluentdebiet lijken goed te correleren met de hoeveelheid hangwater. Hoe meer hangwater in de grond aanwezig is, des te minder lekverliezen er via de onverzadigde zone optreden en hoe gemakkelijker een luchtbel van voldoende dikte in stand is te houden. Zo heeft het starten van de vacuümextractie in de klei van 29 juni tot 1 juli een duidelijk negatief effect op de dikte van de luchtbel, doordat water uit de onverzadigde zone wordt afgevoerd. In de direct hierop volgende spoelsituatie tot 6 juli is een licht herstel te zien van de overdruk in de bel.

Het in de tweede periode definitief starten van de vacuümextractie in de klei (zie ook de tabel in bijlage B met de resultaten van de nulmeting (d.d. 6 juli) op de geplaatste filters A t/m F) heeft als belangrijkste effect de constatering dat na de spoellucht nu ook de uit de klei onttrokken lucht nog slechts zeer lage tolueneconcentraties te zien geeft. Het onttrokken hangwater geeft eveneens zeer lage concentraties. Met het spoelen is tussen 27 mei en 6 juli ongeveer 5 - 10 kg

tolueen verwijderd van onder de klei en met de vacuümonttrekking is tussen 6 tot 20 juli niet meer dan 0,1 kg tolueen verwijderd.

3.4 Analyseresultaten van de grond en het grondwater

In de figuren 7 en 8 worden de concentraties in de grond aan het begin en aan het einde van de proef grafisch weergegeven.

Analyseresultaten in de grond

Op basis van de beschikbare analysegegevens worden de volgende opmerkingen gemaakt en conclusies getrokken:

Nulmeting

- De feitelijke nulmeetwaarden in het proefgebied dateren van november 1995 (501 t/m 504). De getallen zijn verzameld na de eerste fase van de in het damwandgebied uitgevoerde in situ saneringsproef voor het ondiepe grondwater.

Referentiemeting

- De concentraties bij boring HEI02, HEI05, HHEI08, gelegen direct buiten de damwandkuip, zijn nog steeds sterk verhoogd en komen overeen met de 501 t/m 504 nulmeting. De gemiddelde waarde van 2,60 m-mv tot 3,50 m-mv is 700 mg/kg. De grond ter plaatse van HEI11 is niet verontreinigd.
- Tot 2,50 m-mv komt geen tolueen voor in de kleideklaag, maar wel sporen vluchtige organische koolwaterstoffen.
- In de laag van 2,80 m-mv tot 3,00 m-mv is de concentratie in de kleideklaag tussen de nul- en eindmeting gedaald van zeer hoog (gemiddeld 400 mg/kg) naar nul.
- In de laag van 3,30 m-mv tot 3,50 m-mv is de concentratie in de kleideklaag tussen de nul- en eindmeting gedaald van verontreinigd (gemiddeld 3 mg/kg) naar nul.
- Van de 8 grondmonsters, verzameld uit de profielkuil nummer 1, is alleen in het grondmonster op 3,30 m-mv nog een verhoogde BTEX-concentratie aangetoond.
- Gelijktijdig met BTEX zijn ook de VOCl nagenoeg geheel verdwenen (van gemiddeld 5 mg/kg naar minder dan 0,1 mg/kg). Er is cis-1,2-dichlooretheen aangetoond als (biologisch) afbraakproduct van VOCl.

Eindmeting

- De grondmonsters, genomen uit de Begemann-boring 2 aan het eind van de proef, lijken relatief schoon. De hoogste waarde wordt gemeten van 3,11 m-mv tot 3,23 m-mv; 240 mg/kg. Door een sterk afwijkende bemonsteringsmethode is het analyseresultaat echter minder betrouwbaar (bemonstering uit de opengelegde Begemann met een directe laboratoriumvoorbewerking in tegenstelling tot de steekbusmethode).

Figuur 7 betreft het bereikte resultaat op een diepte van 2,90 m-mv en figuur 8 betreft het bereikte resultaat op een diepte van 3,40 m-mv. Per diepte zijn de begin- en eindconcentratie aangegeven. Getallen hoger dan 500 mg/kg zijn afgekapt op 500 mg/kg.

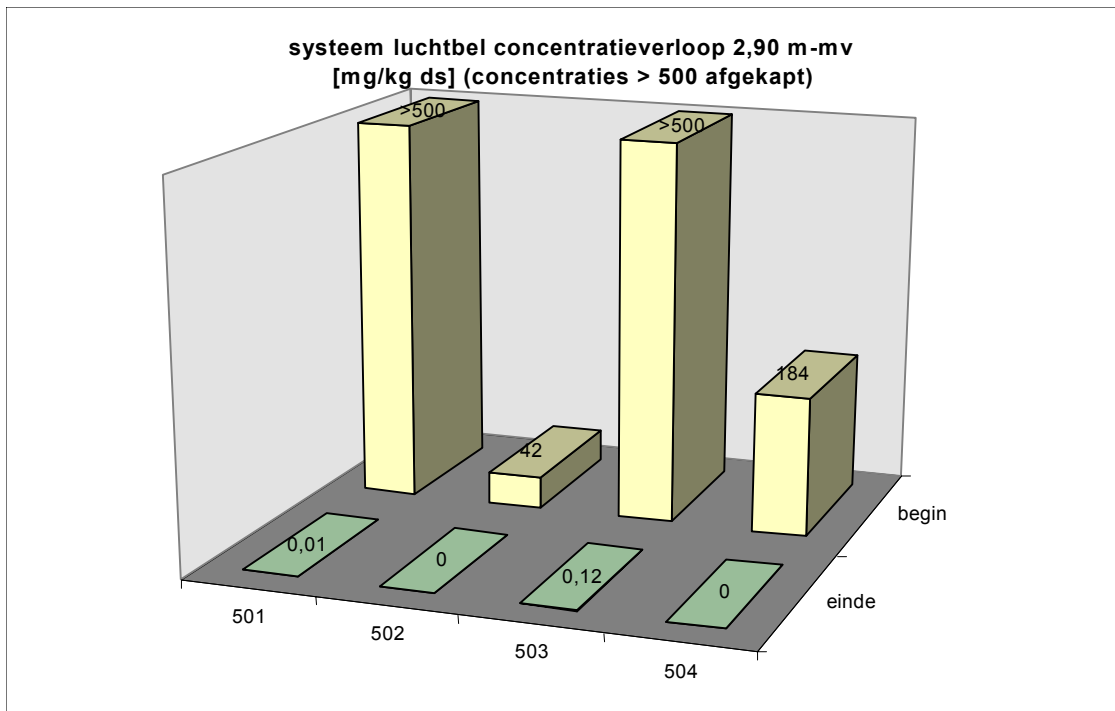


Fig. 7. Saneringsresultaat van het luchtbelstelsiem op een diepte van 2,90 m-mv.

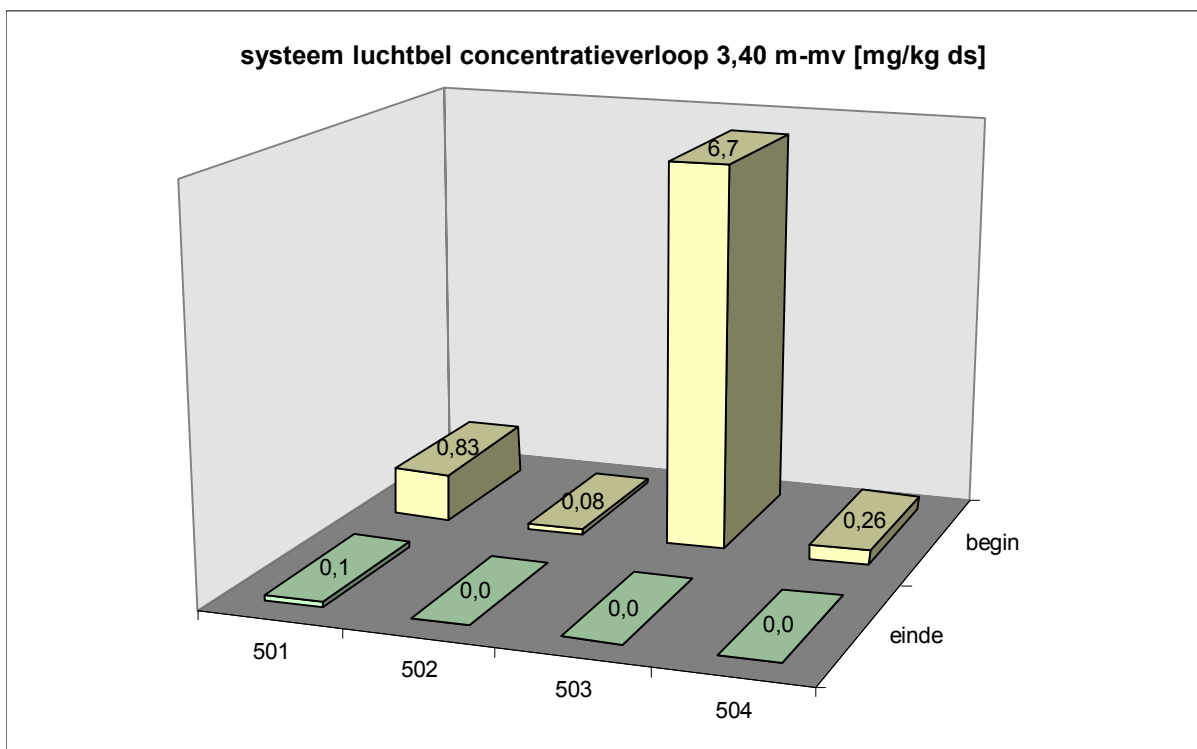


Fig. 8. Saneringsresultaat van het luchtbelstelsiem op een diepte van 3,40 m-mv.

Resultaten van het grondwater

De proef kan als geslaagd worden beschouwd als kan worden aangetoond dat de nalevering door restconcentraties in de klei beperkt is. Om dat uitgangspunt te kunnen toetsen zijn voor en na de proef grondwatermonsters verzameld uit de peilbuizen 501 t/m 504.

In tabel 1 is een samenvatting weergegeven van de beschikbare analyseresultaten uit 1997, vóór de proef en uit 1998, na de proef.

Tabel 1. Analyseresultaten van het grondwater in het luchtbelproefgebied.

peilbuis	diepte t.o.v mv (m)		BTEX totaal, met name toluen ($\mu\text{g/l}$)	
	van	tot	november 1997	september 1998
peilbuizen direct onder de kleideklaag				
501	3,00	5,00	120.380	34.110
502	3,00	5,00	16	3
503	3,00	5,00	270	1.105
504	3,00	5,00	34	102
peilbuizen van 6 tot 8 m-mv				
501	6,00	8,00	458	0
502	6,00	8,00	0	0,49
503	6,00	8,00	5.377	0,8
504	6,00	8,00	0,83	0,44

Uit de metingen blijkt dat na afronding van de proef de concentraties in het grondwater direct onder de kleilaag vaak nog hoog zijn. Aan het criterium, zoals is verwoord in 1.5, wordt gelet op deze concentraties mogelijk niet voldaan.

Uit de hoge concentraties in het grondwater aan het einde van de proef kan niet worden geconcludeerd dat dit een gevolg is van nalevering uit het kleipakket, aangezien ook het grondwater in de zandlaag van oorsprong is verontreinigd. Omdat de proef gericht is geweest op in situ reiniging van de kleideklaag en omdat het grondwater al is verontreinigd, is het niet mogelijk gebleken om nalevering van de kleideklaag naar het grondwater te toetsen door meting van concentraties in het grondwater.

Opgemerkt wordt dat de hoge concentraties in peilbuis 501 van 3 - 5 m-mv (34.110 $\mu\text{g/l}$ in verband kunnen worden gebracht met de zeer plaatselijk aangetoonde hoge concentratie in de grond. Het grondmonster uit kuil 1 (3,30 m-mv) 34 mg/kg ds is genomen nabij peilbuis 501.

3.5 Resultaten van de FFD-sonderingen

Als bijlage F van dit rapport is informatie opgenomen over de FFD-sonderingen (Fuel Fluorescence Detector).

FFD-sonderingen zijn in twee ronden uitgevoerd. Op 20 april zijn 11 sonderingen rondom de damwandkuip geplaatst. Op 9 september is als ijking 1 sondering geplaatst buiten de damwandkuip nabij sondering 05 van 20 april. Binnen de damwand zijn 7 sonderingen geplaatst. Op 9 september zijn 6 sonderingen niet geplaatst, omdat schade is opgelopen aan de sondeerstang. De sonderingen 02, 08 en 11 buiten de damwand en 20, 21 en 26 binnen de damwand zijn niet geplaatst.

Het volgende wordt geconcludeerd:

1. De pieken en dalen van sondering 05 van 20 april komen overeen met de pieken en dalen van de analyseuitslagen van de grondmonsters van boring HEI05. De pieken en dalen van FFD-sondering 2/05 van 9 september wijken echter sterk af van sondering 05 van 20 april.
2. De sonderingen binnen de damwand hebben alle een continue uitlezing van circa 200 mV als meetsignaal uit de FFD sondeerkop. Het lijkt erop dat 200 mV in dit geval moet worden beschouwd als nulwaarde.
3. De sonderingen 23, 24, 27 en 28 vertonen een hogere waarde in de uitlezing op een diepte van 2,50 m-mv.
4. De FFD moet worden gezien als een screening tool, waarbij in principe een hoog/laag vergelijking wordt gegeven (schoon - niet schoon). FFD-sonderingen zijn binnen het project minder bruikbaar gebleken.

3.6 Massabalans van het luchtbelstelsel

Voor de kleideklaag binnen de damwandkuip kan op basis van de analyseresultaten in de grond een globale massabalans worden opgezet:

- laag in beschouwing genomen (sterke verontreiniging in 1995)	2,65 - 3,50 m-mv
- bodemvolume (5-10 meter)	42,5 m ³
- soortelijk gewicht van grond	1.650 kg/m ³
- nulmeting door grondanalyse van 28 november 1995	8 stuks
- gemiddelde concentratie (BTEX, mg/kg)	398 mg/kg
- totale beginvracht	27,9 kg BTEX
- eindmeting door grondanalyse van 9 september 1998	16 stuks
- gemiddelde concentratie	2,04 mg/kg
- totale eindvracht	0,14 kg
- verwijderde vracht (vooral toluen)	27,8 kg BTEX

Volgens de bovenstaande berekening is ruim 27 kg toluen uit de klei in het proefgebied verwijderd. De hoeveelheid is echter niet bevestigd aan de hand van concentratiemetingen in de onttrokken lucht (tijdens de spoelfase 5 - 10 kg en tijdens de feitelijke luchtbelstelsel minder dan 0,1 kg).

De biologische afbraak is niet in de massabalans gekwantificeerd.

Het is mogelijk dat bij het spoelen al een grote hoeveelheid lucht door de kleideklaag heen naar de atmosfeer is ontsnapt of afbraak in de bovengrond heeft plaatsgevonden. Daarbij is dan een ongeregistreerde hoeveelheid BTEX verwijderd (spoellucht of biodegradatie).

3.7 Verband met voorgaande in situ bodemsaneringsproeven binnen de damwand

Zoals eerder is beschreven is binnen de damwand in 1995 en 1996 een in situ bodemsaneringsproef uitgevoerd, die is gericht op reiniging van grond en grondwater tot 10 m-mv.

Tijdens de saneringsproef binnen de damwand is nitraat toegevoegd om de afbraak van toluen te stimuleren. Bij voldoende zuurstof wordt nitraat gebruikt voor de groei van micro-organismen. Dit leidt tot enige nitraatconsumptie. Bij afwezigheid van zuurstof kunnen denitrificerende bacteriën nitraat gebruiken als elektronenacceptor in plaats van zuurstof. Hierdoor treedt bij afwezigheid van zuurstof toch afbraak van toluen op.

De eindbemonstering van de saneringsproef, die als nulmeting voor de proef wordt gebruikt, heeft plaatsgevonden in november 1995. In de hierop volgende periode is in het proefgebied nog een saneringsproef uitgevoerd met persluchtinjectie en zijn in het grondwater onder de kleilaag nog enige nitraatanalyses uitgevoerd. In augustus 1996 zijn in het grondwater net onder de kleilaag (3 - 5 m-mv) NO₃-concentraties gemeten van < 0,2 mg/l tot 17 mg/l (gemiddeld 11 mg/l). In november 1996 wordt geen nitraat meer aangetoond. Er is in de periode vanaf november 1996 geen effect meer te verwachten van versnelde afbraak ten gevolge van de aanwezigheid van nitraat.

3.8 **Bereikte resultaat van het luchtbelstelsel**

Als eindconclusie kan worden gesteld dat de kleideklaag binnen de damwandkuip geheel is gereinigd. Van de 16 beschikbare analyseresultaten is er slechts 1 verhoogd (32 mg/kg < tussenwaarde). De overige analyseresultaten zijn nagenoeg nul.

Het blijkt niet mogelijk een stilstaande luchtbel aan te brengen onder de kleideklaag, zoals vooraf in het projectvoorstel is opgenomen. Door het verhogen van de hoeveelheid geïnjecteerde lucht blijkt het mogelijk om een soort luchtbel te handhaven. Gelijktijdig met het injecteren is de lucht door de scheuren en openingen in de kleideklaag naar boven ontsnapt.

In de projectsituatie is vastgesteld dat er zeer veel lekkage van lucht is opgetreden. De lekkage is het gevolg van aangebrachte doorbrekingen, zoals filters en grondboringen, en er is lekkage via natuurlijke scheuren, wortelgangen en wormgangen in de kleideklaag. Niettemin wordt aangenomen dat de doorstroming van de kleilaag, al dan niet via preferente stroombanen, voldoende op gang is gebracht.

Als een schatting wordt gemaakt van de luchtdoorlatendheid van de kleideklaag op basis van de hoeveelheid lucht die per uur van onder naar boven is uitgetreden, zal de doorlatendheid ongeveer 10^{-5} à 10^{-6} m/s bedragen in tegenstelling tot de voor klei aangenomen 10^{-10} à 10^{-11} m/s.

Tijdens de spoelperiode zijn geen metingen verricht aan ongecontroleerd ontsnappende lucht. Er is op basis van zintuiglijke waarnemingen ook geen aanleiding toe geweest. Er is geen toluengeur waargenomen. Een mogelijke verklaring is dat de bovenlaag van het proefgebied als biofilter dienst heeft gedaan en dat in die laag het toluen is gemineraliseerd.

In bijlage B is een tabel opgenomen, waarbij per bodemlaag alle beschikbare informatie is gepresenteerd (bodemprofiel, analyseresultaten, proeffasegegevens, waterstanden en bodemgegevens).

HOOFDSTUK 4

RESULTATEN VAN HET BODEMLUCHTEXTRACTIESYSTEEM

4.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van de onttrekkingsproef. Zoals in hoofdstuk 3 worden de gegevens gepresenteerd en geïnterpreteerd. Als bron wordt wederom vermeld, HMVT als uitvoerende aannemer, DHV, Grondmechanica Delft en AB DLO.

4.2 Bodemopbouw en effecten ten gevolge van de proef

In het proefgebied zijn een aantal grondboringen verricht in de verschillende fasen van de projectvoorbereiding. De volgende veldonderzoeken zijn relevant:

1. HEIA, HEIB en boring 401 (DHV);
2. Begemann-boring nummer 01 (Grondmechanica Delft);
3. boring 601 en 602 (Gemeente Rotterdam, HEISA-projectfase 1a);
4. proefkuil 2.

De boorbeschrijving, die is vastgesteld bij het graven van de profielkuil (veldonderzoek 4, op 10 september 1998), is hieronder weergegeven.

Diepte (m-mv): Beschrijving:

0,0 - 1,4	Klei en zand, bruinigrijze (lutum 20 %) structuur: kluiten en brokken kleiige grond met zand en puin, variabele dikte en samenstelling in de kuil (plaatselijk meer dan 1 m zand). Opgebrachte grond.
1,4 - 1,65	Klei, matig siltig, weinig puin, bruine (lutum 30 %, 3 % OM) structuur: 2 ^{de} fijn blokkig, 1 ^{ste} grof blokkig, dichte pakking, veel wormgangen met bruine huiden, veel fijne gangen. Toplaag van bodem.
1,65 - 2,2	Klei, matig siltig, bruinigrijze (lutum 35 %) structuur: 2 ^{de} fijn-middel blokkig met verkleurde huiden, 1 ^{ste} grof prismatisch met donkere huiden (70 mm prisma's met spleten > 1 mm open) veel fijne (wortel-)gangen, veel wormgangen, prismatische structuur in de onderste 0,3 m zwak. Bodem met zeer uitgesproken bodemstructuur.
2,2 - 2,5	Klei, sterk zandig, bruinigrijze en grijze (lutum 18 %) structuur: 2 ^{de} fijn-middel blokkig, 1 ^{ste} zwak grof prismatisch, veel fijne gangen.
2,5 - 2,65	Zand, siltig, geelgrijze basis, grijze met zwarte horizontale vlekken ($M_{50} = 170 \mu\text{m}$, silt 6 %), structuur: zeer zwak grove blokken, enige grote wormgangen met helder oranjebruine coatings en bruinigrijze kleiaccumulaties.
2,65 - 3,1	Klei, matig-sterk siltig, bruine en grijze (lutum 25 %) structuur: middel blokkig, veel wortelgangen met oranjebruine of grijze coatings Bodem met normale structuur met verkleuring van de voormalige vegetatielaag aan de bovenkant.
3,1 - 3,3	Zand en klei.

In bijlage D wordt in detail ingegaan op de bodemopbouw. Daarin zijn tevens foto's opgenomen.

4.3 Verloop van de proef en waarnemingen

De waarnemingen van de proefperiode zijn in tabelvorm opgenomen in bijlage C. De proef is onderverdeeld in 7 deelperiodes, waarin elke keer onttrokken is over 1 filter. Van de 8 geplaatste extractiefilters (zie de tabel in bijlage C met nulmetingen TFE-vak in) zijn F3 en F4 niet gebruikt

vanwege een te geringe onderdruk en is F7 niet gebruikt vanwege een te sterke onderdruk. Toen na enige tijd de grondwaterstand toch begon te dalen, is F1 herplaatst met een gewijzigde filterstelling. In figuur 9 is de verwijderde vracht als functie van de tijd weergegeven.

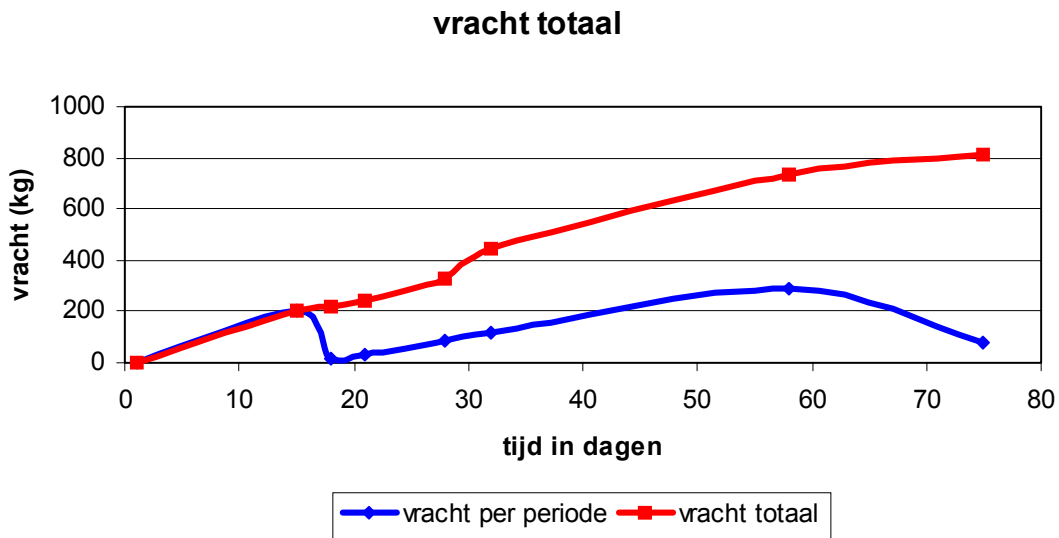


Fig. 9. Verwijderd toluene via het bodemluchtexttractiesysteem.

Uit de nulmetingen en het verloop van de CO₂- en O₂-gehalten gedurende de diverse extractieperiodes komt duidelijk naar voren dat in de bodem een sterk verhoogde biologische activiteit aanwezig is. Dit wordt nog eens extra bevestigd door de zeer sterke daling van het O₂-gehalte door stilstandsituaties (F1: 8 - 14 mei en F8: 11 - 14 juli).

In alle 7 onttrekkingsperiodes is aan het maaiveld met behulp van rookbuisjes een invloedsgebied vastgesteld met een straal van 3,5 à 5 m. Metingen aan twee groepjes van 3 meetpunten op verschillende diepten (1, 1,5 en 2,5 m-mv), met de ranguts aangebracht tussen F1 en F2, op respectievelijk 1 en 3 meter afstand van F1, laten een heel wat minder consistent beeld zien. Zo is in de meetpunten op 1 meter vanaf F1 een invloed waarneembaar van F1 alleen op 2,5 m-mv en van F8 alleen op 1 m-mv; in de meetpunten op 3 meter vanaf F1 is voor zowel F1 als F8 uitsluitend invloed waarneembaar op 1 m-mv. In het overschakelen van F1 op F8 op 3 juli kan op basis van de CO₂- en O₂-concentraties worden gesteld, dat langdurige onttrekking over F1 de directe omgeving van F8 slechts marginaal heeft beïnvloed. Het beeld dat hierdoor ontstaat is niet eenduidig en nauwelijks te interpreteren. Kortom, een beeld dat behoort bij heterogene klei.

In geen van de 7 periodes is een invloed gebleken van de onttrekking op de grondwaterstand. Vermoed wordt dat de waterstand in de Nederrijn (300 m afstand) wel een directe invloed heeft op de grondwaterstandsveranderingen ter plaatse van het proefgebied.

4.4 Analyseresultaten van de grond en het grondwater

Resultaten van de grond

Alle onderzoeksresultaten van de grond zijn opgenomen in bijlage G. Voor deze paragraaf zijn twee tabellen in bijlage G van belang. De eerste is genoemd 'Vergelijking HEIA en HEIB in onttrekkingsgebied' en de tweede 'Vergelijking invloed nabij filter 1 op 0, 1 en 2 meter afstand'.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken over het feitelijke verloop van de proef:

1. De laag tot 1,70 m-mv wordt beschreven als opgebrachte grond. Voor de boring HEIB is vastgesteld dat de BTEX-concentratie in de bodemlaag is gedaald van 27 mg/kg naar nagenoeg nul.
2. Van alle beschikbare monsters tot 2,60 m-mv kan worden gesteld dat de aanvangsconcentratie hoog was en de eindconcentratie nagenoeg nul.
3. In de beschikbare monsters tussen 3,00 m-mv en 3,20 m-mv zijn zeer sterke wisselingen opgetreden in concentratie. In de boring HEIB was de concentratie voor de proef 4.000 mg/kg en na de proef 7.000 mg/kg. In de boring HEIA is de concentratie gestegen van 173 mg/kg naar 451 mg/kg. Een aantal verklaringen zijn mogelijk:
 - door de onttrekking van lucht en water is de drijfslag opgetrokken;
 - door variaties in de grondwaterstand is de diepteligging van de drijfslag in het ene geval wel tussen 3,00 m-mv en 3,20 m-mv gelegen en in het andere geval niet;
 - door de bodemstructuur is de verontreiniging heterogeen verdeeld over korte afstand.
4. In de twee beschikbare monsters tussen 3,50 m-mv en 3,70 m-mv is een daling opgetreden. HEIB van 292 mg/kg naar 100 mg/kg en HEIA van 906 mg/kg naar 55 mg/kg. De monsters zijn genomen uit de zandlaag onder de kleideklaag 0,5 m onder de actuele grondwaterstand. Een aantal mogelijke verklaringen zijn:
 - het grondwater ter plaatse is zeer sterk verontreinigd (0,6 gr/l toluen = oplosbaarheids-grens);
 - de tijdens de proef verwijderde hoeveelheid toluen (800 kg) is gedeeltelijk afkomstig van de aanwezige drijfslag. De verwijdering van de grote vracht heeft een invloed gehad op het grondwater direct onder de kleilaag.
5. Als alle analyseresultaten onder de 2,80 m-mv in beschouwing worden genomen (massabalans), bestaat er weinig verschil tussen het begin van de proef en het einde van de proef ten aanzien van de verontreiniging dieper dan 2,80 m-mv.
6. De concentraties die zijn gemeten in de eindbemonstering voor de boringen HEIC en BEG01 liggen in de lijn van HEIA en HEIB.

In de figuren 10 en 11 wordt het concentratieverloop in de boringen HEIA en HEIB weergegeven. Vergeleken wordt de beginconcentratie en eindconcentratie. Hoge concentraties zijn getopt op 1.000 mg/kg ds.

Bij de boring HEIA is op een diepte van 1,40 m-mv en 1,90 m-mv geen eindmeting uitgevoerd.

Om de invloedssfeer van filter 1 te bepalen zijn op drie diepten, op drie afstanden monsters verzameld uit de wanden van de profielkuil (zie fig. 12). Op de diepten 2,40 - 2,60 en 2,90 m-mv op de afstanden 0, 1 en 2 m vanaf het filter. De monsters van 2,40 en 2,60 zijn genomen uit de eerste kleilaag en het monster van 2,90 is genomen uit de tweede kleilaag.

De volgende opmerkingen worden gemaakt en conclusies worden getrokken over de invloedssfeer van bodemluchtextratiefilter nummer 1:

1. Tot 2,60 m-mv is de bodem met een actieradius van 2 m zo schoon geworden dat een verloop in de ruimte moeilijk te meten is. Wat wel is vastgesteld is dat op 0 en 1 m van het filter geen verontreiniging meer kan worden aangetoond en op 2 m van het filter nog sporen voorkomen met een gemiddelde waarde van 3 mg/kg.
2. Op een diepte van 2,90 m-mv is de invloed van luchtonttrekking veel minder geweest, toch is naar het filter toe een bepaald verval in concentraties te herkennen

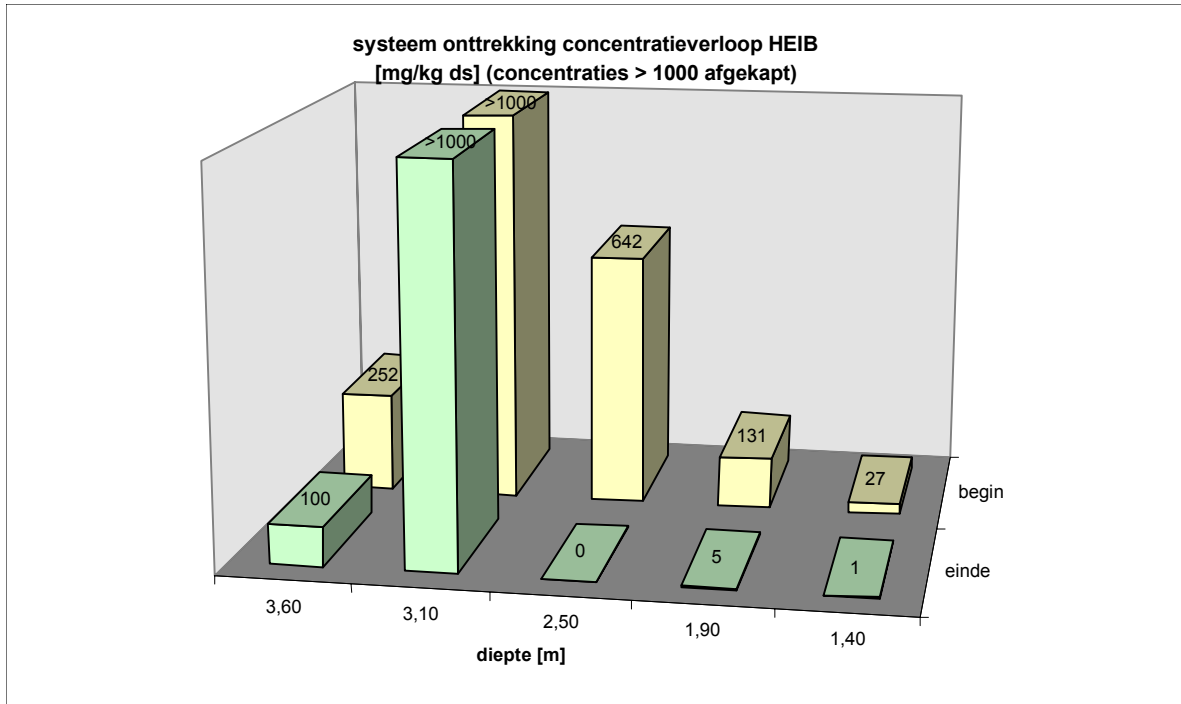


Fig. 10. Begin- en eindconcentratie in grondboring HEIB.

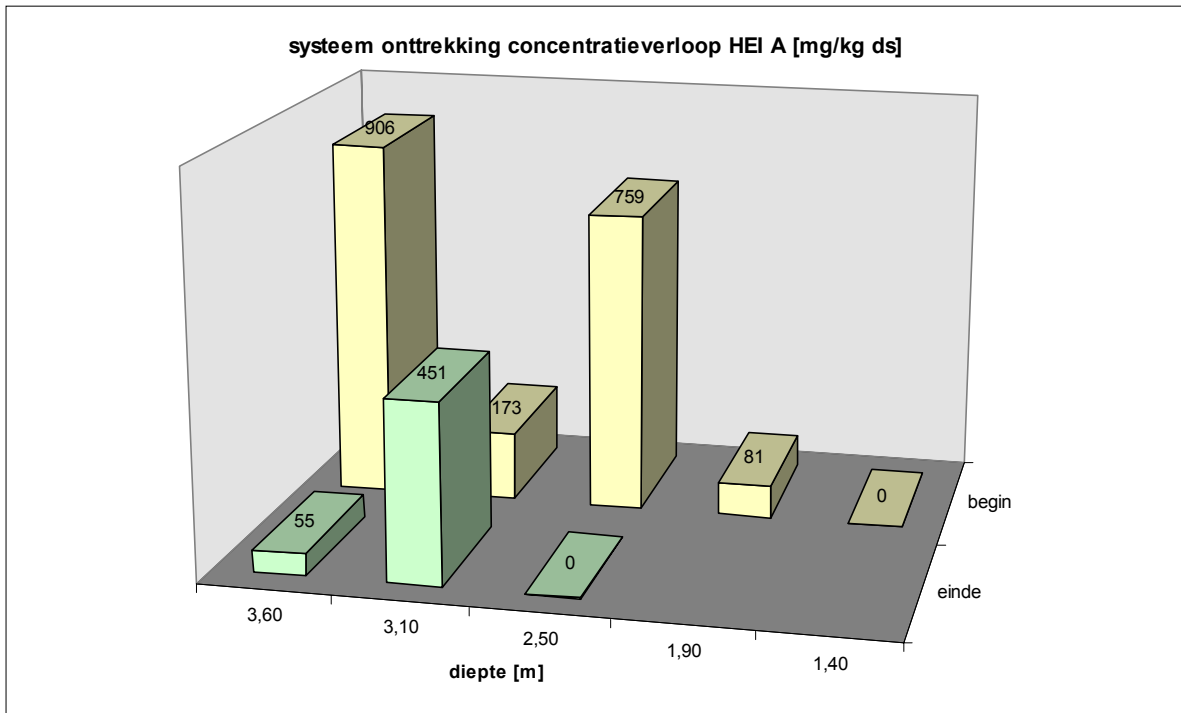


Fig. 11. Begin- en eindconcentratie in grondboring HEI A.

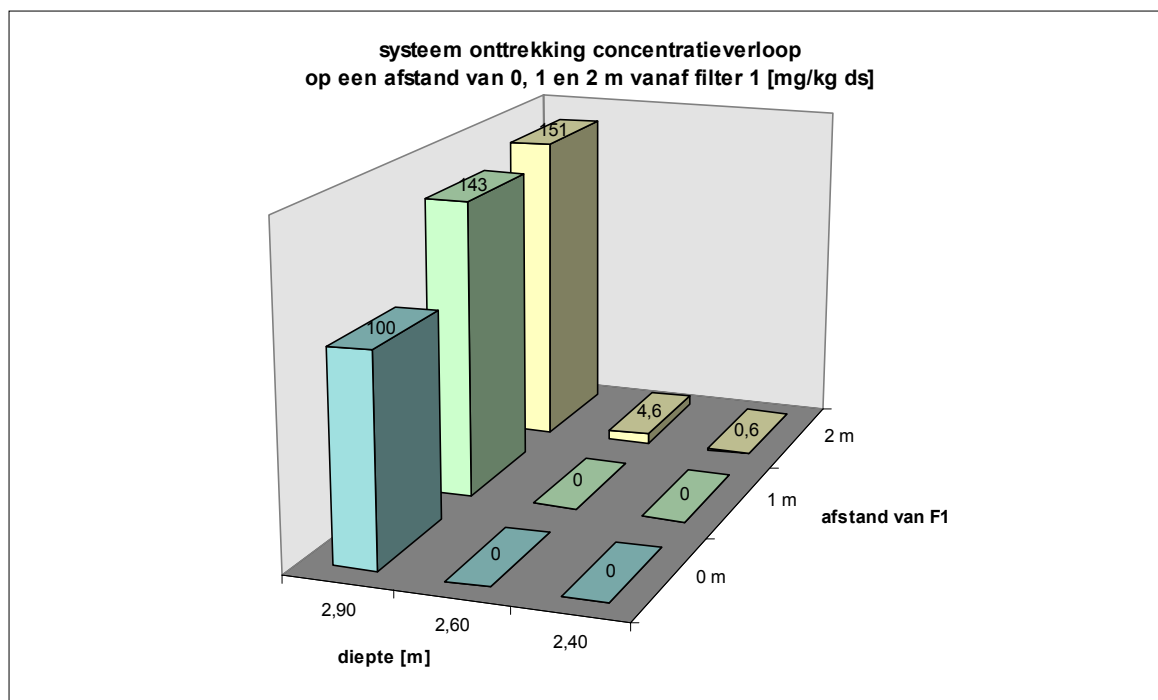


Fig. 12. Metingen in de grond nabij filter 1.

Resultaten van het grondwater

In tabel 2 zijn de meest relevante grondwateranalysegetallen opgenomen. De analysegetallen in de kolom BTEX betreft met name toluen.

Tabel 2. Analyseresultaten van het grondwater in het bodemluchtexttractiegebied.

peilbuis	diepte t.o.v. mv (m)		datum monstername	BTEX totaal, met name toluen ($\mu\text{g/l}$)
	van	tot		
grondwateranalyse ondiep grondwater voor de proef				
402	3,50	4,50	gem 1995	320.535
401	3,50	4,50	gem 1995	295.925
403A	3,50	4,50	gem 1995	295.710
grondwateranalyse ondiep grondwater na de proef¹				
401	3,50	4,50	09-sep-98	560.480
HEIA	3,00	4,00	09-sep-98	344.600
HEIB	3,00	4,00	09-sep-98	1.100.000
HEIC	3,00	4,00	09-sep-98	530.000
BEG01	3,00	4,00	09-sep-98	590.000
grondwateranalyse dieper grondwater voor de proef				
402	7,00	9,00	gem 1995	33
403A	7,00	9,00	11-feb-98	89
401	8,00	9,00	gem 1995	30
grondwateranalyse dieper grondwater na de proef				
401	8,00	9,00	09-sep-98	31

¹ watermonsters HEIA/B/C en BEG 01 zijn genomen uit het boorgat door middel van een puls.

Een aantal opmerkingen worden gemaakt en conclusies worden getrokken:

1. De oplosbaarheid van toluen in grondwater is ongeveer 0,6 gr/liter, 600.000 µg/l. Dit komt overeen met de aangetoonde concentraties in het ondiepe grondwater (de aanwezigheid van een drijf laag waarschijnlijk).
2. Het grondwater direct onder de kleideklaag is sterk verontreinigd.
3. De uitvoering van de proef lijkt het effect te hebben dat concentraties in het grondwater direct onder de kleideklaag zijn gestegen tot de oplosbaarheidsgrens.
4. De uitvoering van de proef heeft geen invloed gehad op het diepere grondwater.

4.5 Resultaten van de FFD-sonderingen

Op 9 september heeft Joustra Geomet BV een eindmeting verricht in het proefgebied. Het proefgebied is doorsneden met twee raaien, zoals is aangegeven op de situatietekening in bijlage C. De beide raaien kruisen elkaar ter plaatse van het middelpunt van de luchtonttrekkingsactiviteit, sondering 2/33.

De resultaten van de FFD-sonderingen zijn (separaat) bijgevoegd als een onderdeel van bijlage F.

In het algemeen kan worden gesteld dat er geen eenduidig verband is vastgesteld tussen de analyseuitslagen van de grondmonsters en de FFD-uitlezingen. FFD-sonderingen zijn voor dit project minder bruikbaar gebleken.

4.6 Massabalans van het bodemluchtexttractiesysteem

De massabalans is berekend op twee manieren. Als eerste op basis van concentraties die zijn gemeten in de grond en als tweede op basis van de gemeten verwijderde vrachten, die zijn gemeten in de onttrokken lucht. Er komt een groot verschil voor tussen die twee benaderingen.

1. Massabalans op basis van concentraties die zijn gemeten in de grond

Voor berekeningen in de grond wordt een invloedsgebied met een diameter van 8 m aangehouden:

- laag in beschouwing genomen (boven grondwater)	1,00 - 2,80 m-mv
- bodemvolume (diameter 8 m) aangenomen	90 m ³
- soortelijk gewicht van grond	1.650 kg/m ³
- nulmeting door grondanalyse (HEIA en HEIB)	6 stuks
- gemiddelde concentratie (BTEX, mg/kg)	273 mg/kg
- totale beginvracht	40,7 kg BTEX
- eindmeting door grondanalyse van 9 september 1998	7 stuks
- gemiddelde concentratie	1 mg/kg
- totale eindvracht	0,15 kg
- verwijderde vracht (vooral toluen)	40,5 kg BTEX

2. Massabalans op basis van concentraties die zijn gemeten in de onttrokken lucht

Als de verwijderde vracht wordt berekend aan de hand van de gemeten concentraties in de onttrokken lucht en het water blijkt de verwijderde vracht vele malen hoger, totaal 812 kg BTEX. De vrachtberekening voor deze 812 kg is in bijlage C toegevoegd.

De biologische afbraak is in geen van de beide massabalansen gekwantificeerd.

Een eenduidige verklaring voor het verschil kan niet worden genoemd. Het is mogelijk dat bij de 'tweefasen' luchtonttrekking op het grensvlak van de bodemlucht en het grondwater een deel van de daar aanwezige drijfslag is verwijderd. Ook dan is het hoge totaal echter niet goed te verklaren.

4.7 Bereikte resultaat van het bodemluchtextractiesysteem

Gesteld kan worden dat de kleideklaag door middel van de tweefasen extractie tot de grondwaterstand geheel is gereinigd. Daaronder zijn tegengestelde wijzigingen opgetreden; op een diepte van 3,10 m-mv zijn de concentraties gestegen en op een diepte van 3,60 m-mv zijn de concentraties gedaald.

De zeer hoge verwijderde vrachten, die zijn berekend uit de GC-analyse van de luchtmonsters, worden bevestigd door Dräger-metingen en zintuiglijke waarnemingen. Het is mogelijk dat door het onttrekken van lucht op het scheidingsvlak van het grondwater en de bodemlucht een hoeveelheid drijfslag is verwijderd uit het onderliggende zandpakket en de volcapillaire zone. De verwijderde vracht is niet direct bevestigd door middel van grondanalysegetallen. De aantrekking van grondwaterverontreiniging vanuit het zeer sterk verontreinigde omliggende gebied is een mogelijke verklaring.

De invloedssfeer van een bodemluchtextractiefilter is in de proefsituatie boven het grondwater aanzienlijk. Het invloedsgedebiet heeft een straal van 3,5 à 5 m.

De kleideklaag is zeer luchtdoorlatend door de aanwezige scheuren, wortelgangen en wormgangen. De doorlatendheid van de klei blijkt vele malen hoger dan geschat is op grond van het eerdere onderzoek aan ongeroerde monsters en lutummelingen. Het lijkt erop dat de verontreiniging hoofdzakelijk aanwezig is in die scheuren en gaten. Nadat de klei is doorspoeld met lucht is de bulk van de verontreiniging verdwenen (door spoeling en door biodegradatie).

In bijlage C is in een overzicht per bodemlaag aangegeven welke informatie beschikbaar is.

ALGEMENE BESCHOUWING

5.1 Beschouwing door externe deskundigen

Grondmechanica Delft

In april 1998 zijn twee Begemann-boringen geplaatst. De boringen zijn geplaatst en beschreven door Grondmechanica Delft (zie de beschrijving door de heer Kruse in bijlage E). Op 10 september 1998 zijn 3 proefsleuven gegraven en ook daarbij was de heer Kruse betrokken.

In het algemeen kan worden gesteld dat, nadat klei is afgezet, er in veel gevallen een periode zal volgen waarbij de laag boven de grondwaterstand komt te liggen en kan uitdrogen. In die periode zal een bodemstructuur worden ontwikkeld, waarbij er spleten en gangen ontstaan die tot aggregaten van 5 tot 200 mm leiden. Deze bodemstructuur is stabiel en blijft min of meer intact bij begraven. Zelfs bij een bovenbelasting van enige meters grond zorgen de scheuren en spleten voor een hoge bulkdoorlatendheid.

De omstandigheden, zoals hiervoor zijn beschreven, komen voor in het benedenrivierengebied op en nabij de huidige en voormalige stroomruggen en in het grootste deel van het bovenrivierengebied. In die situaties kan meer dan 3 m kleideklaag worden afgezet die een bodemstructuur heeft over de gehele dikte van de laag. De zogenoemde 'komgronden' in het rivierengebied zijn over het algemeen lager gelegen en hebben daardoor minder kans op uitdroging. In die gronden zorgen vegetatieresten echter samen met enige beginnende bodemvorming voor doorlatende paden door de cohesieve fijnkorrelige massa. In de kustafzettingen in West- en Noord-Nederland komt klei met een bodemstructuur slechts voor aan de basis van de holocene transgressieafzettingen. Verder is het te herkennen in de bovenste meters beneden NAP in de holocene afzettingen, waar de stijging van het grondwaterpeil in de tijd gering was ten opzichte van het sedimentaanvoer. In een groot deel van de kleiafzettingen in kustafzettingen, met name de oostelijke rand van de lagune, komen echter plantenresten voor die de bulkdoorlatendheid van de grond aanmerkelijk kunnen verhogen.

Samengevat kan worden gesteld dat de doorlatendheid voor water (en lucht) van de kleideklagen relatief hoog is door de bodemstructuur. Grond met zulke structuur heeft in het algemeen een in situ doorlatendheid van 10^{-5} - 10^{-4} m/s.

Het spreekt voor zich dat de doorlatendheid van grond met een structuur op de schaal van centimeters tot decimeters niet met standaard 66 mm monsters kan worden bepaald. Ook is in het algemeen bekend dat de boorgatmeting van de doorlatendheid in zulke cohesieve grond tot een te lage schatting leidt, waarschijnlijk veroorzaakt door versmering van de wanden van het boorgat. Uit ervaringen met doorlatendheidsmetingen in het terrein en metingen van waterdrukveranderingen blijkt dat het noodzakelijk is om de toegang tot spleten en gangen open te houden om bulkeigenschappen te kunnen bepalen. De cohesieve grond laat zich eenvoudig versmeren, waardoor effectief contact met de spleten en gangen van de bodemstructuur verloren gaat. Bij het aanbrengen van extractie- of injectiefilters is een aansluiting met de scheuren van groot belang. Mogelijk kan 'hydraulic of pneumatic fracturing' het contact van de filters met het porienetwerk verbeteren.

Het is mogelijk om aan de hand van boorkernen van zeer hoge kwaliteit de aard van de bodemstructuur te beschrijven ten behoeve van de praktische toepassingen. Bij het boren moet de grond niet worden geroerd en evenmin moet er druk op de grond worden uitgeoefend,

aangezien daarmee de structuur lokaal geheel wordt dichtgedrukt. De vergelijking van de in het verband van het project gemaakte Begemann-boringen met de waarnemingen in de profielkuilen geeft aan dat met name de grove prismatische structuur (aggregaatdiameter 50 - 100 mm) niet is beschreven voor de boorkernen.

Het onderzoek op de locatie geeft aan dat het van groot belang is dat het beschrijven van de structuur van de grond aandacht krijgt in het kader van het grondonderzoek voor saneringen. Niet de lutumpercentages en D_{50} bepalen de bulkdoorlatendheid en karakteristieke weglengten, maar de bodemstructuur, plantenresten en sedimentaire structuur. Ook de doorlatendheid van een kleilaag, die is bepaald door middel van een kolomonderzoek (66 mm), geeft vaak een veel te lage waarde (10^{-10} à 10^{-12} m/s).

AB-DLO

Tijdens het graven van proefsleuven was ook aanwezig AB-DLO, Groningen (de heer Rappoldt, inmiddels Rijksuniversiteit Groningen, Biologisch centrum, Fysische Geografie).

Behalve dat is vastgesteld dat op diepte een macrostructuur voorkomt die een hoge bulkdoorlatendheid tot gevolg heeft, is het verrassend om op een diepte van 3 m-mv bovendien een fijne structuur aan te treffen.

Aan de verkleuring was te zien dat zuurstof ook kleine poriën bereikt. Het biologische reactie/diffusieproces zal zich dus op een veel kleinere schaal afspelen dan voorheen is aangenomen, namelijk op de schaal van millimeters tot centimeters. In het algemeen verlopen diffusieprocessen op een 10 keer kleinere schaal 100 keer zo snel. Ten opzichte van oriënterende berekeningen over een kleilaag van 100 mm dik wordt dus een factor 100 tot 10.000 gewonnen in reinigingstijd!

Details hangen natuurlijk af van de verdeling van tolueen in de klei ten opzichte van de poriën, maar het is duidelijk dat de benodigde reinigingstijd zeer veel kleiner is dan voorheen is ingeschat.

Het reinigingsproces valt uiteen in twee delen:

1. het creëren van omstandigheden waaronder bacteriën hun werk kunnen doen door bijvoorbeeld lucht en nutriënten op diepte aan te bieden;
2. het reactie/diffusieproces zelf; het verloop van het proces bepaalt hoelang de voor de bacteriën gunstige condities moeten worden gehandhaafd.

Eén en ander kan volgens Rappoldt worden bestudeerd op de schaal van kolommen van 100 tot 200 mm diameter. Met een dergelijk kolomonderzoek kan snel en goedkoop inzicht worden verkregen in de potentie van het inbrengen van nutriënten en lucht.

5.2 Schematisering van het bodemprofiel

In de proefgebieden zijn een groot aantal grondboringen en sonderingen geplaatst. Aan de hand van de profielkuilen is het bodemprofiel als volgt vastgesteld (zie fig. 13):

0,0 - 1,4 Eenheid I

Recent (< 50 jaar) opgebrachte grond van een lokale ophoging bestaande uit kleigrond met veel zand en puin. De grond is niet of weinig verdicht en heeft een losse structuur met een slechts plaatselijk ontwikkelde bodemstructuur (bovenkant van de laag niet in detail beschreven).

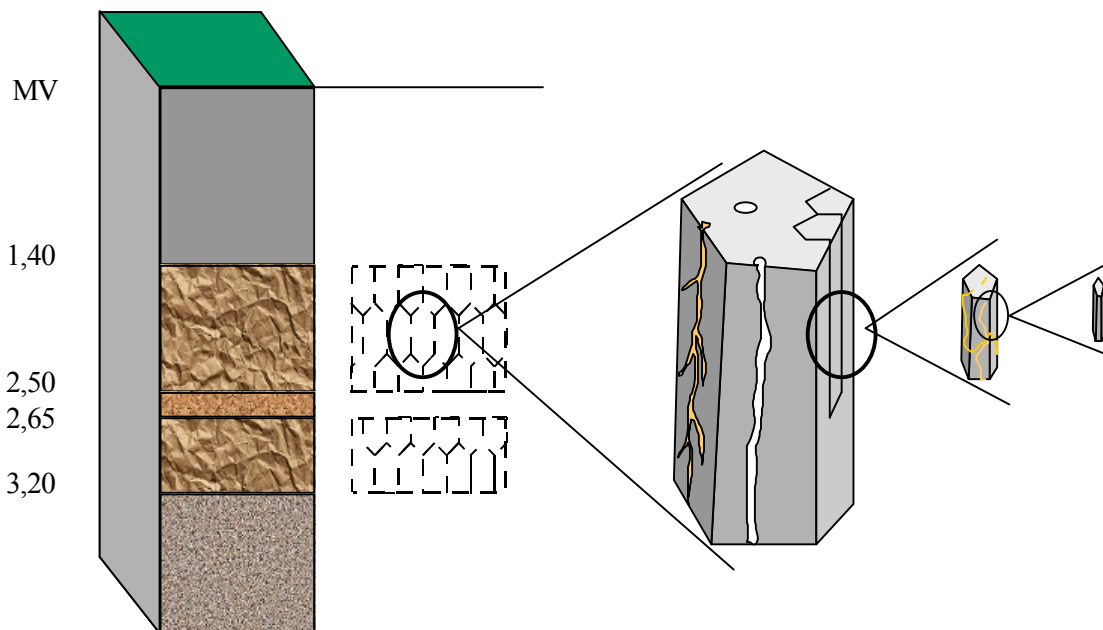


Fig. 13. Geschematiseerde bodemopbouw.

1,4 - 2,5 Eenheid II

Klei met een ontwikkelde structuur, waarin grove prismatische structuren en veel verticale wormgangen op decimeterschaal een zeer open netwerk vormen en met een wat fijnere blokkige structuur met veel kleine graaf- en wortelgangetjes, die op centimeterschaal een netwerk vormt. De structuur is in de top van de laag fijner en aan de basis van de laag gaat de prismatische structuur over in een grove blokkige structuur. In de bovenste laag van ongeveer 2 decimeter is behalve de structuur ook wat grind, puin en dergelijke aanwezig. Het onderste deel van de laag is een overgang naar de eronder liggende zandlaag en heeft een naar beneden sterk toenemend zandgehalte.

2,5 - 2,65 Eenheid III

Siltig fijn zand, dat aan de bovenzijde ongeveer 0,1 m in de erboven liggende zandige klei overgaat. De laag heeft een zwak ontwikkelde bodemstructuur van grove blokken. De zandlaag heeft een wisselende dikte, van minder dan 0,1 m tot 0,3 m, en heeft plaatselijk een herkenbare gelaagdheid. Het betreft naar het zich laat aanzien een zogenoemde 'doorbraakafzetting', die aan de basis in de ondergrond ingesneden kunnen zijn en waarvan de bovenkant ruggen kan vormen van enige decimeters hoogte. Ter plaatse van de kuilen is de basis nagenoeg niet in de ondergrond ingesneden. De kleinere voorkomens van dit soort afzetting zoals hier, zijn meestal lateraal niet-continu; loodrecht op de stromingsas meestal enige tientallen meters breed. Aan de basis van deze laag is vaak een zwarte verkleuring aanwezig die verband houdt met de afbraak van de vegetatielaag van de ondergrond, die thans nagenoeg geheel verdwenen is.

2,65 - 3,2 Eenheid IV

Klei met een bodemstructuur als onder grasland, een fijne en grove blokkenstructuur met zeer veel fijne gangen (wortel- en graafgangen). De bovenste 50 tot 200 mm van de laag is grijs met daarin veel oranjebruine huidjes van de gangen. De laag ligt ter plaatse van de kuilen abrupt op grove zanden.

3,2 - Eenheid V

Grove zanden.

5.3 Verschil in de uitslag van de analyse binnen een bereik van 20 cm

Tijdens het graven van de proefkuilen is een prismastructuur herkend met een afmeting van circa 100 mm. In de veronderstelling dat de verontreiniging voor een belangrijk deel in de openingen tussen de klei zou voorkomen is als hypothese gesteld dat op korte afstand grote verschillen zouden kunnen bestaan in het verontreinigingsgehalte.

Om de hypothese te toetsen zijn op 8 plaatsen horizontale steekbussen gestoken uit de wanden van de proefkuilen. De steekbussen hebben een lengte van 200 mm en in het laboratorium zijn uit die steekbus twee monsters gestoken; één vanuit de linkerkant en één vanuit de rechterkant van de steekbus.

De concentraties, die zijn vastgesteld, zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. Analyseresultaten van grondmonsters.

monster-locatie	monsterdiepte (m-mv)	BTEX totaal, met name toluen (mg/kg)		CKW totaal, exclusief cis (mg/kg)	
		links	rechts	links	rechts
filter 1	2,40	0	1,1	0	0
filter 1	2,60	0,093	9,1	0	0
filter 1	2,90	111	192	0,0051	0,417
kuil I	2,10	0	0	0,16	0,18
kuil I	2,30	0	0	0,11	0,17
kuil I	2,80	0	0	0,0227	0,02
kuil III	2,70	0,22	0,11	0,017	0,012
kuil III	3,15	4.429	5.230	92	110

Op basis van de resultaten kan worden geconcludeerd dat deze verschillen inderdaad kunnen voorkomen. Bij twee resultaten zijn verschillen aanwezig van een factor 100. De overige resultaten wijken in mindere mate af, maar daar is dan bijvoorbeeld het verschil in poriëngrootte van de linker- en rechterkant minder sterk aanwezig geweest.

De locatie waar geboord wordt bepaald dus sterk het gemeten gehalte van de verontreiniging. In hoeverre fouten in de analyses bijdragen aan het ontstaan van verschillende getallen zal kort worden besproken in de volgende paragraaf.

Fouten in de manier waarop de monsters worden genomen (bijvoorbeeld mate van optreden van vervluchtiging), kunnen geen verschillen veroorzaken aangezien de wijze van bemonstering voor steekbussen links en rechts gelijk is.

5.4 Nauwkeurigheid van de chemische analyses in het laboratorium

Analysefouten van grond- en grondwatermonsters worden in de regel door twee factoren bepaald:

- inhomogeniteit van de grondmonsters;
- fout in de chemische analyses.

Inhomogeniteit van de grondmonsters

De relatieve standaardafwijking in de analyseresultaten van één grondmonster is ten gevolge van inhomogeniteiten in de grondmonsters 10 - 25 %. Als wordt uitgegaan van een relatieve

standaardafwijking in het analyseresultaat, ten gevolge van inhomogeniteit van het monster, van 10 % dan resulteert dit bij een betrouwbaarheid van 95 % in een relatieve fout van 16,5 %

Fout in de chemische analyses

De fout in de chemische analyses wordt weergegeven in de standaardafwijking van de herhaalbaarheid (binnen 1 laboratorium). In tabel 4 is de relatieve fout in de analyseresultaten voor VOCl of BTEX voor grond en grondwater voor het DHV-laboratorium weergegeven bij een betrouwbaarheidsinterval van 95 %. Voor de bepaling van de relatieve fout bij een betrouwbaarheidsinterval van 95 % moet de standaardafwijking bij een normale verdeling worden vermenigvuldigd met 1,65 (Polytechnisch zakboekje, PBNA).

Tabel 4. Relatieve fout in de analyseresultaten voor BTEX of VOCl voor grond en grondwater voor het DHV-laboratorium bij een betrouwbaarheidsinterval van 95 %.

stof	monstertype	standaardafwijking (%)	relatieve fout (%)
VOCl ¹ /BTEX	grond	< 30	< 49,5
	water	< 10	< 16,5

¹ vluchtige alifatische chloorkoolwaterstoffen

Concluderend kan worden gesteld dat de afwijkingen die gebruikelijk zijn om te hanteren niet het grote verschil verklaren dat optreedt in de analyseresultaten van de monsters van de steekbussen links en rechts in tabel 3. Het lijkt er sterk op dat de heterogeniteit van het verspreidingspatroon in de klei een bepalende rol speelt.

5.5 Tekortkomingen in de kennis

Tijdens de uitvoering van de proef en de tijdens de uitwerking van de gegevens zijn op een aantal punten vragen overgebleven.

Effect van de in 1995/96 uitgevoerde in situ saneringsproef in het grondwater

De grondnulmeting in het luchtbelproefgebied dateert uit 1995 als een tussenmeting tussen de eerste en tweede fase van de in situ bodemsaneringsproef voor het ondiepe grondwater in het onderliggende zandpakket. Tussen de meting en de huidige proef is dus de tweede proeffase van de in situ sanering uitgevoerd en is 2 jaar verstreken.

De tweede fase betreft in grote lijnen het verhogen van de temperatuur, het optimaliseren van het NPK-gehalte en het biospargen gedurende totaal 4 weken met een zeer gering luchtdebiet. Het effect van dat proefdeel en het effect van de verlopen twee jaren is onbekend. Opgemerkt wordt dat bewust is afgezien van een gedetailleerde nulmeting in het proefgebied om verdere verstoringen van het bodemprofiel te voorkomen.

Verontreinigingssituatie

Tijdens de uitvoering van de proef kon de massabalans niet sluitend gemaakt worden. De hoeveelheid toluen die is vastgesteld en berekend uit de onttrokken lucht, is veel hoger dan de hoeveelheid verwijderde toluen die is berekend uit de analyse van de grondmonsters.

De verontreinigingssituatie wordt min of meer bekend verondersteld. Als de situatie anders is dan verondersteld, kan daar mogelijk een verklaring worden gevonden voor het verschil. Verder is tijdens de uitvoering van de proef het vermoeden gerezen dat mogelijk een aantal puntverontreinigingen in het proefgebied voorkomen (bijvoorbeeld nabij 501).

Biologische activiteit

De huidige proef is uitgelegd op sanering door middel van luchtdoorstroming van heterogene lagen. Er zijn echter hoge CO₂-gehalten gemeten en er zijn vele tussenvormen van afbraakproducten aangetoond wat wijst op biologische activiteit (zie fig. 15). De omvang en de bijdrage van de biologische activiteit is niet nader in beschouwing genomen.

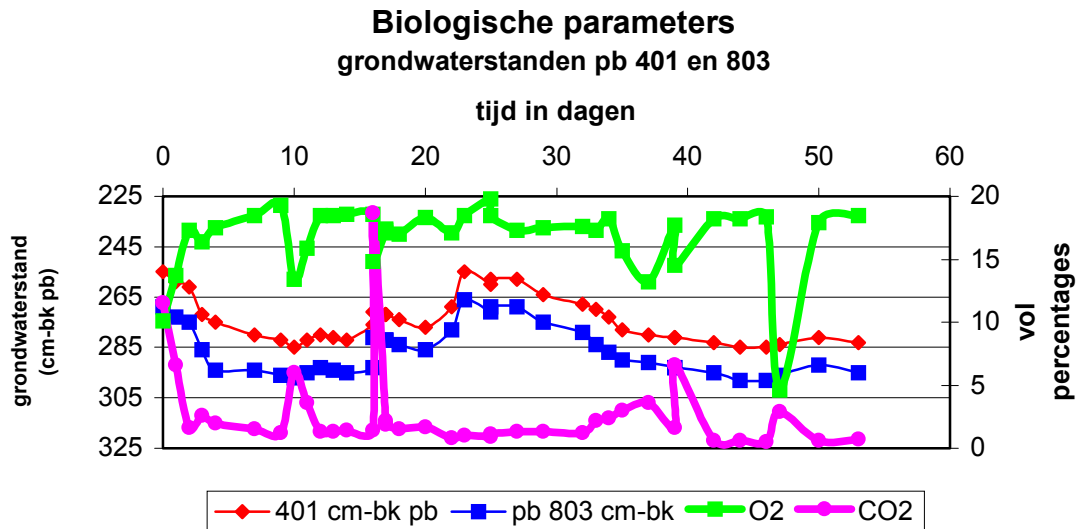


Fig. 14. Verloop van het biologische proces en de grondwaterstanden als functie van de tijd.

Onderstaand is een aantal hypothesen gesteld die in de huidige proef niet nader zijn onderzocht:

1. Tijdens de uitvoering van de proef is een sterke biologische activiteit aangetoond tot een diepte van 3,20 m-mv. Het is mogelijk om op basis van de gemeten hoeveelheid CO₂ te concluderen dat deze activiteit hoog is geweest; in de massabalans is die overigens moeilijk te verklaren.
2. De lucht in het luchtbelproefgebied is van beneden naar boven door de klei gestroomd en heeft daarbij verontreiniging meegenomen. De verwachting is dat die verontreinigde lucht in de bovenlaag (grasveld) biologisch is gereinigd (zoals in een compostfilter).
3. Als de biologische component aanmerkelijk groter is dan de uitspoeling, kan worden overwogen om de onttrokken lucht, na verrijking met O₂ en verwijdering van CO₂, voor injectie toe te passen. Het reinigen van de lucht kan daarmee worden bespaard.
4. Er wordt verondersteld dat de op de locatie aanwezige menging van BTEX en VOCl een stimulerende werking heeft op de natuurlijke afbraak van VOCl. De aanwezigheid van beide stoffen is daarbij van belang voor het biologische afbraakproces (cometabolisme).
5. Bij het graven van de proefsleuven is op een diepte van 2,5 m-mv actieve wortelgroei geconstateerd (waarschijnlijk populier). Het effect van de wortelgroei op de bodem is niet nader bestudeerd.

Natuurlijk reinigingsproces

Er kan worden verondersteld dat door diffusie een natuurlijke migratie zal optreden van vluchtige stoffen vanuit de bodem naar de atmosfeer. Als resultaat van de proef is vastgesteld dat onder invloed van het drukverschil relatief veel lucht kan stromen door de kleilaag. Het principe dat lucht kan stromen betekent niet dat diffusie van vluchtige stoffen uit een kleilaag een snel proces is. Diffusie in grond wordt in tegenstelling tot convectie niet bepaald door poriëngrootte maar door luchtgevulde porositeit. De snelheid van het diffusieproces in deze bodem is niet nader onderzocht.

Grondwaterstand

Tijdens de uitvoering van de proef was de grondwaterstand hoger dan normaal in de zomer op basis van meerjarige peilgegevens. De neerslaghoeveelheid tijdens de proefperiode was hoog en ook de waterstand in de Nederrijn was hoger dan normaal. Het is mogelijk dat een andere grondwaterstand andere resultaten zou hebben gegeven. In figuur 14 is de grondwaterstand als functie van de tijd weergegeven.

Duur van de proefneming

Bij het beëindigen van de onttrekkingsproef werden nog steeds hoge concentraties onttrokken. Een eindsituatie was nog niet bereikt en de beschreven resultaten kunnen dan ook niet worden beschouwd als het eventueel haalbare eindresultaat. Omdat de proef slechts een beperkte looptijd had is de te bereiken eindsituatie niet bekend.

TOETSING AAN DE UITGANGSPUNTEN EN HET BEOOGDE RESULTAAT

6.1 Samenvatting van het resultaat van de sanering van de gerijpte kleideklagen

De huidige proeffase kan ten aanzien van het saneringsresultaat als volgt worden samengevat:

Luchtbel onder de kleideklaag met lucht van beneden naar boven

Het kleideklaagpakket ter plaatse van het proefgebied is vrijwel geheel gereinigd. Op een enkele plaats is nog een verhoogde toluenconcentratie aangetoond.

Bodemluchtextractie met lucht van boven naar beneden

Tot een diepte van 2,70 m-m is de bodem nagenoeg geheel gereinigd in een periode van 11 weken. In het bodemdeel onder het grondwaterniveau lijken tegengestelde veranderingen opgetreden in concentraties (zowel toename als afname). Een stabiele eindsituatie is daar in de proefperiode niet bereikt.

6.2 Toetsing aan de projectdoelstelling

"Als beoogd resultaat is in het onderzoeksvoorstel gesteld dat de proefsanering als geslaagd kan worden beschouwd wanneer in de betrekkelijk korte proefperiode een zodanig grote verontreinigingsvracht is verwijderd dat de toluenconcentraties in de vaste fase zijn gedaald tot onder de interventiewaarde voor grond, of het niveau van nalevering van de resterende verontreiniging van de vaste fase naar het grondwater zodanig is verlaagd dat, juist stroomafwaarts van het gesaneerde gebied, de interventiewaarde voor grondwater van 1 mg/l niet meer wordt overschreden".

Kortom, de proef wordt beoordeeld aan de hand van drie aspecten:

1. verwijderen van grote vracht in korte tijd;
2. eindconcentratie in de kleideklaag lager dan de interventiewaarde;
3. resterende nalevering naar het grondwater te verwaarlozen.

ad 1. Verwijdering van vracht

Er is een grote hoeveelheid verontreiniging verwijderd. Ondanks een niet-sluitende massabalans is vastgesteld dat grote hoeveelheden toluen zijn verwijderd uit de bodem. Volgens berekeningen op basis van grondanalyse is uit het luchtbelgebied 27 kg verwijderd en uit het onttrekkingsgebied circa 40 kg. Op basis van GC-metingen in de onttrokken lucht blijkt dat er echter meer dan 800 kg toluen is verwijderd.

ad 2. Eindconcentratie in de kleideklaag

Er is afdoende aangetoond dat de actief bewerkte delen van de bodem nagenoeg schoon zijn geworden. In het luchtbelproefgebied is dit het geval over de gehele hoogte van de kleilaag en in het proefgebied van de bodemluchtextractie van het maaiveld tot aan het grondwaterniveau op een diepte van 2,80 m-mv.

ad 3. Resterende nalevering naar het grondwater te verwaarlozen.

In eerder onderzoek is berekend dat bij een concentratie van 3.100 mg/kg toluen in homogeen gedachte klei (250 mg/l in poriewater) voldaan wordt aan het criterium dat er geen overschrijding is van de interventiewaarde in de waterlaag van 1 m onder de klei. Hierbij is uitgegaan van een vlak diffusieoppervlak aan de onderzijde van de kleilaag. Er is nu gebleken dat op sommige plaatsen de beginsituatie in de klei al voldoet aan het verontreinigingscriterium (gemiddeld ca.

700 mg/kg is < 3.100 mg/kg), maar tegelijkertijd is gebleken dat het diffusieoppervlak niet als vlak wordt beschouwd. Door de aanwezigheid van een uitgebreid wortel-, wormgang- en aggregatenstelsel is het diffusievlak veel groter, waardoor de diffusieflux enigszins (niet rechtevenredig met het oppervlak) toeneemt. Verticale grondwaterstroming ten gevolge van de meer open structuur draagt ook bij aan een verhoogde flux naar het onderliggende grondwater.

Op basis van de huidige experimenten kan geen uitspraak worden gedaan of de doelstelling is bereikt. Feitelijke meting van grondwaterconcentraties na afloop van de proef levert niet voldoende inzicht op ten aanzien van nalevering van verontreiniging uit de kleilaag (zie ook 3.4)

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies aan de hand van de resultaten van de praktijkproef

1. Het resultaat van de praktijkproef is positief. In de proefsituatie met een toluenverontreiniging in een kleilaag met een ontwikkelde structuur is door middel van luchtbehandeling een goed saneringsresultaat behaald. Daarbij zijn in hoofdzaak twee principes getoetst; opwaartse luchtstroming 'luchtbelstelsysteem' en neerwaartse luchtstroming 'bodempluuchtexttractiesysteem'. Bij het bodempluuchtexttractiesysteem zal ook laterale stroming door de klei hebben plaatsgevonden.
2. De luchtdoorlatendheidscoëfficiënt van kleideklagen met een ontwikkelde bodemstructuur lijkt op die van zand en is vele malen hoger dan de veronderstelde doorlatendheidscoëfficiënt die wordt bepaald met behulp van kleine grondmonsters. Ook een interpretatie op basis van korrelgrootteanalyses zal over het algemeen een te lage coëfficiënt tot resultaat hebben (factor 10.000).
3. Door middel van het doorspoelen met lucht kan toluen relatief snel worden verwijderd uit ontwikkelde kleilagen. Als toluen voorkomt in de ruimte tussen de kleiaggregaten en in de openstaande wortel- en wormengangen kan de snelle in situ sanering daarmee worden verklaard.
4. Bij het installeren van filters in de klei zal aansluiting moeten worden gerealiseerd met de poriën. Versmering van de kleistructuur bij het op gebruikelijke wijze aanbrengen van filters zal de aansluiting met die poriën verstoren. Mogelijk kan de aansluiting met de macroporiën worden hersteld of verbeterd met technische ingrepen (hydraulic and pneumatic fracturing).
5. Tijdens de proef is biologische activiteit aangetoond. De verhouding tussen het bereikte effect door luchtspoelen en door het bijkomende effect van biodegradatie kon op basis van de beschikbare resultaten niet worden vastgesteld.

Aanbevelingen

1. De huidige veldonderzoeksmethoden met boringen zijn onvoldoende geschikt om de macrostructuur van klei te bepalen. Aangevonden wordt om bij saneringen van kleilagen eerst een proefgat of proefsleuf te graven of boorkernen van Begemann-boringen te onderzoeken.
2. De huidige kolomexperimenten maken veelal gebruik van gestoken boorkernen met een doorsnede van minder dan 5 à 10 cm. Aanbevolen wordt bij klei een grotere diameter te nemen, teneinde de snelheid van versmering aan de randen te relativeren en de effecten van de macrostructuur beter te kunnen inschatten.

PROGRAMMA VAN EISEN VOOR ONTWERP EN DIMENSIONERING

In het huidige hoofdstuk wordt op een beknopte wijze een programma van eisen geschetst. Het programma van eisen is niet uitputtend en niet dwingend. Voorgesteld wordt om het programma te gebruiken als leidraad/checklist in situaties waarbij projectspecifiek wordt beoordeeld of een aanpak zoals in de huidige praktijkproef toepasbaar is en kan leiden tot een gewenst saneringsresultaat. Daar waar mogelijk worden kwantitatieve aspecten aangegeven op basis van de resultaten van de huidige proeffase.

Het programma van eisen wordt in drie onderdelen gesplitst:

1. bodem- en verontreinigingssituatie;
2. onderzoeksaspecten;
3. technische aspecten voor de systemen 'lucht van beneden naar boven' (luchtbelsysteem) of van 'lucht van boven naar beneden' (bodempluchtexttractiesysteem).

Bodem- en verontreinigingssituatie

Het programma van eisen is van toepassing op situaties zoals hierna wordt beschreven:

1. De verontreiniging betreft vluchtige aromaten (BTEX) of vluchtige oliecomponenten. Vluchtige chloorkoolwaterstoffen zijn in de huidige fase onvoldoende onderzocht maar vermoedelijk op soortgelijke wijze aan te pakken.
2. Voor het aanbrengen van een luchtbel moet onder de kleilaag een lateraal met lucht of water doorspoelbare laag voorkomen. In de proefsituatie is de kleideklaag gelegen op een grofzandige laag.
3. Voor de methode van luchtdoorspoeling van beneden naar boven (luchtbelsysteem) mag de te behandelen zone gedeeltelijk onder de grondwaterstand liggen. Voorlopig wordt gesteld dat de te behandelen verzadigde zone maximaal 2 m dik mag zijn. De dikte van de daarboven gelegen onverzadigde zone is van minder belang.
4. Voor de methode van luchtdoorspoeling van boven naar beneden (bodempluchtexttractiesysteem) zal de te behandelen zone grotendeels in de onverzadigde zone moeten liggen.

Onderzoeksaspecten

Het onderzoek moet gericht zijn op de volgende aspecten

1. Vastgesteld moet worden of in de bodem een bodemstructuur is ontwikkeld en tot welke diepte (wortelgangen, wormgangen en kleischeuren op micro- en macroschaal). De bodem is te behandelen indien een dergelijk ontwikkeld profiel voorkomt. Het graven van een proefsleuf is noodzakelijk, daar de huidige veldonderzoeksmethoden hier niet toereikend voor zijn.
2. De water- en luchtdoorlatendheidsmetingen aan gestoken kolommen met beperkte diameter moeten zorgvuldig worden geïnterpreteerd. Door het verstoord zijn van de macrostructuur is de doorlatendheidscoëfficiënt die is berekend uit kolomonderzoek in veel gevallen veel lager dan in werkelijkheid (10^{-11} versus 10^{-5} m/s).
3. Bij de verschillende fasen van het bodemonderzoek zal iedere doorboring zorgvuldig moeten worden afgedicht om kortsluitstromen en lekkage te beperken.

Technische aspecten bij luchtinjectie

1. De lucht moet gelijkmatig worden verdeeld onder de te behandelen laag (luchtbel), door injectie met een groot debiet (proefsituatie vrijuitstoombaar $80 \text{ Nm}^3/\text{uur}$ voor 50 m^2). Gelijk-

matige spreiding van lucht kan ook worden gerealiseerd door injectie van lucht dieper in het grondwater of via dicht bij elkaar liggende injectiepunten.

2. De infiltratiesituatie zal continu in stand moeten worden gehouden om verdringing van grondwater uit de verzadigde zone mogelijk te maken.
3. Het luchtdebiet moet zo hoog mogelijk zijn. Het doel is het luchtdrukverschil zo hoog mogelijk te laten zijn, waardoor een zo groot mogelijke flow wordt gerealiseerd door de kleilaag. Het hoge debiet is nodig om een groot mogelijke laterale spreiding te krijgen voordat de geïnjecteerde lucht naar boven ontsnapt door de klei (of door lekken).
4. In de fase van verdringing van grondwater uit de verzadigde zone bedraagt de benodigde overdruk meer dan 500 mbar in de fase van in stand houden van de luchtbel bedraagt de benodigde overdruk minder dan 300 mbar.
5. Alle waarneembare lekstromen moeten worden afgedicht (peilbuizen, grondboringen, filters, damwandsloten enz.).
6. Afvangen en behandelen van spoellucht indien noodzakelijk in het kader van de NER. Er moet rekening worden gehouden met het reinigende vermogen van de bovenlaag, met name bij teelaarde met begroeiing (werking zoals in een compostfilter).
7. Ongecontroleerde laterale verspreiding van ingebrachte lucht moet worden voorkomen (in de proefsituatie was een damwand aanwezig). In een verzadigde situatie wordt lucht opgesloten door waterdruk. Technisch kan worden gedacht aan luchtaflaatbuizen, zogenoemde 'schoorsteentjes', om druk af te laten of verspreiding te controleren (zie fig. 15).

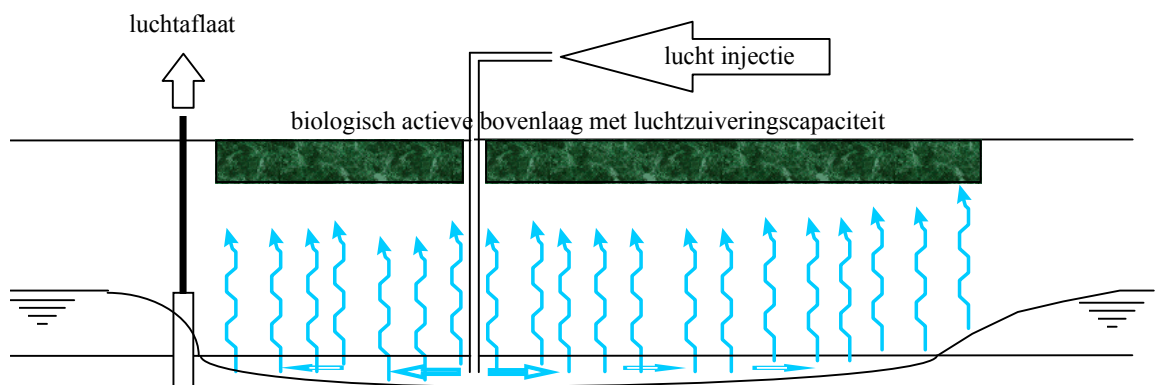


Fig. 15. Toepassen van luchtaflaat ter controle van de luchtbel.

Technische aspecten bij luchtextractie

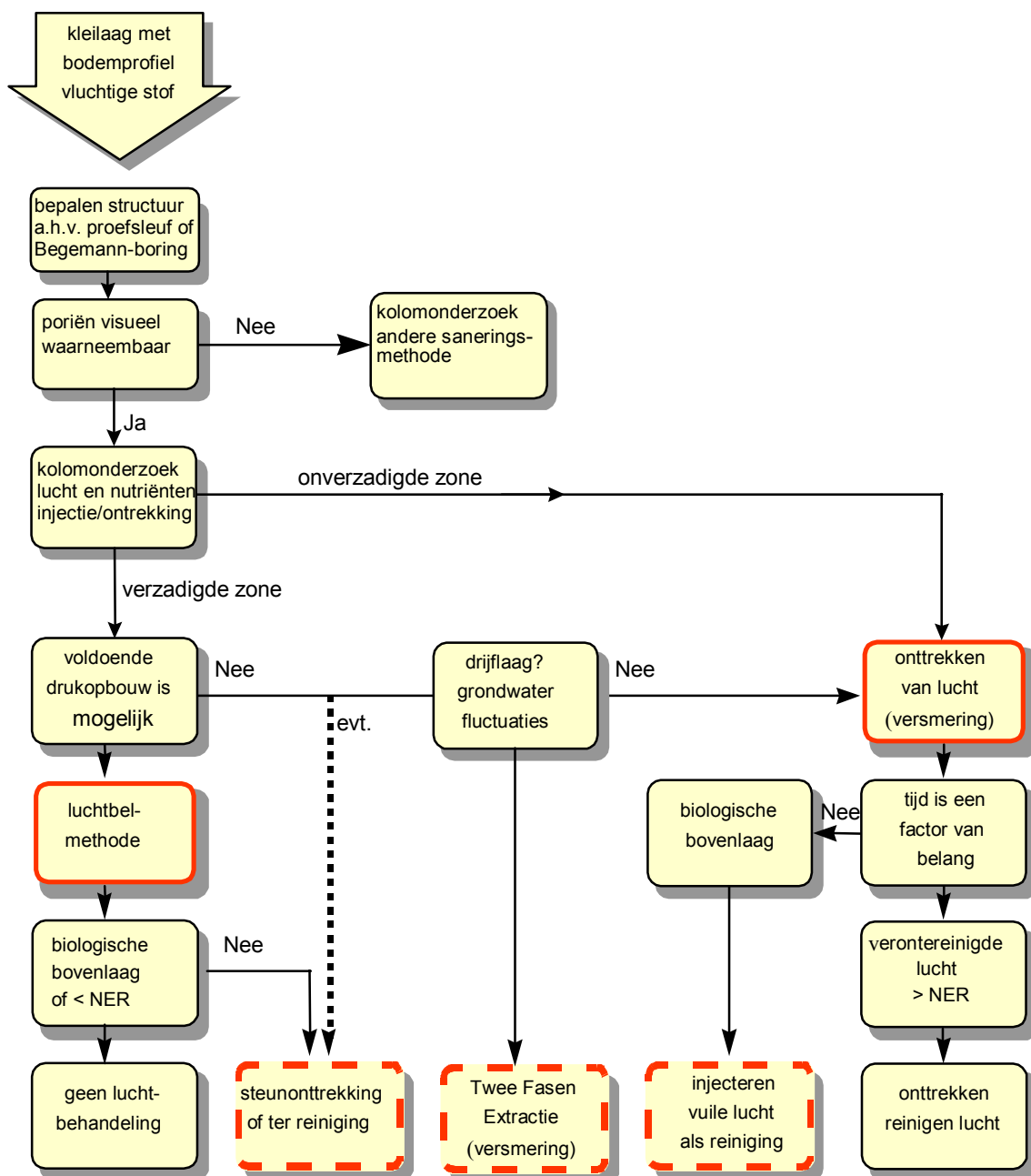
Er moet rekening worden gehouden met de volgende technische aspecten:

1. De bodemluchtextractiefilters moeten volledige aansluiting hebben aan zoveel mogelijk ruimten tussen de kleiaggregaten. Verondersteld wordt dat 'boren' in kleiige lagen al veel aansluitingen zal 'dichtsmen'. Voor het herstel van de aansluiting kan worden gedacht aan een kortstondige zeer hoge luchtdruk (mogelijk explosie), luchtzuiging, waterdruk, zeer ruime boordiameter of plaatselijk scheuring door uitdroging nabij het filterdeel. In de proefsituatie is de aansluiting niet specifiek beïnvloed. Er is gewerkt met een handboring 100 mm en een filteromstorting met filtergrond 0,8 - 1,2 mm.
2. De filterstelling zal relatief kort moeten zijn (0,5 m) en zal moeten worden geplaatst op het grensvlak van de verzadigde en de onverzadigde zone. In de proefsituatie zijn een aantal filterstellingen geprobeerd om de juiste stelling vast te stellen.
3. De debietonttrekking moet regelbaar zijn per filter, met de mogelijkheid ieder afzonderlijk filter af te zuigen.
4. De afstand tussen de bodemluchtextractiefilters moet klein zijn, afhankelijk van de situatie. Een invloedssfeer met een diameter van 8 m is aannemelijk (afhankelijk van K_{zand}).

5. Het luchtdebiet moet zo hoog mogelijk zijn (indicatie onderdruk 0,4 à 0,6 bar). In de proef-situatie is 30 - 50 vrijuitstroombare Nm³/uur onttrokken.
6. Als de af te laten lucht niet voldoet aan de eisen van de Nederlandse Emissie Richtlijn (NER) moet deze lucht worden behandeld worden.
7. Na een bepaalde wachttijd (b.v. 2 weken) moet het grondwater worden gecontroleerd op concentratie en nalevering. Over het algemeen kan worden gesteld dat een bodemluchtextractie kan worden beëindigd als de concentraties in de bodemlucht permanent zijn gedaald onder de 1 mg/m³ (projectspecifiek vast te stellen door bevoegd gezag).

Keuzemogelijkheid van de beschreven technieken

De keuze is hierna beknopt weergegeven:



HOOFDSTUK 9

NAWOORD

Het circa 3,5 ha grote VADA-terrein is verontreinigd met voornamelijk toluen en spitsgewijs met VOCl. Beide komen in het grondwater en de daarboven gelegen kleilaag voor. De verontreinigingen zijn grotendeels in kaart gebracht.

Met een beheersmaatregel wordt al gedurende enkele jaren de verspreiding van verontreinigingen via het grondwater tegengegaan. Het opgepompte grondwater wordt in een bioreactor behandeld waarbij het rendement, waarmee toluen wordt verwijderd, meer dan 99 % bedraagt.

Ter voorbereiding van de sanering is, buiten dit voorliggende NOBIS-project, een in situ test uitgevoerd binnen een daarvoor speciaal aangelegde damwandkuip. Deze test, gericht op de afbraak van toluen in het watervoerende pakket, is succesvol verlopen. Voor de verwijdering van VOCl moet nog een concept worden ontwikkeld. De vele in NOBIS-verband ontwikkelde methoden voor afbraak van VOCl kunnen goede aanknopingspunten bieden.

De sanering van de volledige kleilaag op het VADA-terrein moet met het in het onderhavig NOBIS-project ontwikkelde concept van sparging en venting succesvol kunnen worden uitgevoerd. Verwacht wordt dat naast toluen ook het VOCl op deze wijze goed te verwijderen is.

Opschaling van dit concept tot optimale oppervlakte-eenheden verdient nog aandacht. Factoren die hiervoor bepalend zijn, zijn onder andere:

- saneringsdoelstelling;
- kosten en tijdsduur;
- beheersbaarheid en veiligheid;
- noodzaak van een damwand in het geval er met een bel wordt gewerkt;
- voorkómen van herverontreiniging van de kleilaag na de sanering;
- combinatie met de grondwatersanering.

Of de uitvoerende aannemer de ontwikkelde techniek inderdaad gebruikt, moet nog blijken. Er is een saneringsplan opgesteld, waarin het saneringsresultaat en niet de saneringsmethode is beschreven. De saneringsbeschikking en de aanbesteding moeten nog plaatsvinden. In het kader van de aanbesteding zullen alle resultaten van dit NOBIS-project beschikbaar worden gesteld. Het is aan de financier van VADA en het bevoegd gezag (Provincie Gelderland) om een keuze te maken uit de inschrijving van aannemers voor de sanering van het VADA-terrein.

BIJLAGE A

SITUERING VAN DE IN SITU PRAKTIJKPROEF

Tekening A3 'Situatie', Tekeningnummer GELM00XD.02

BIJLAGE B

PROEF 'LUCHTBELSYSTEEM'

Tekening A3 'Inrichting proefterrein systeem luchtbel', Tekeningnummer GELM00IB.03

Tabel van de bodemgegevens en diepten van grondmonsters van het luchtbelsysteem, 1 A4

Tabellen van de verzameling van meetgegevens door HMVT, 3 A4

Vergelijking van de analyseresultaten in het luchtbelproefgebied, 1 A4

Grafische weergave van het concentratieverloop van de meetgegevens van het luchtbelsysteem,
1 A4

BIJLAGE C

PROEF 'BODEMLUCHTEXTRACTIESYSTEEM'

Tekening A4 'Inrichting proefterrein systeem luchtonttrekking', Tekeningnummer GELM00XC.02
Tabel van de bodemgegevens en diepten van grondmonsters van het bodemluchtexttractiesysteem (TFE), 1 A4
Tabellen van de verzameling van meetgegevens van periode 1 t/m 7 door HMVT, 7 A4
Vrachtberekening TFE-vak, 1 A4
Vergelijking tussen de grondboring HEIA en HEIB in het onttrekkingsgebied, 1 A4
Grafische weergave van het concentratieverloop van de meetgegevens van het bodemluchtexttractiesysteem, 2 A4

BIJLAGE D

BESCHRIJVING VAN HET BODEMPROFIEL

Tekening A3 'Locatie profielkuilen', Tekeningnummer GELM00W1.01

Factural report GD, CO-383270/8, mei 1998, 11 A4

Boorbeschrijving DHV, HEIA, HEIB, HEI02, HEI05, HEI08 en HEI11, 20 april 1998, tekening 1 A3, legenda 1 A4

Fotobladen profielkuilen, 4 A4

BIJLAGE E

BIJDRAGE DESKUNDIGEN

Grondmechanica Delft, CO-385730: HEISA, profielkuilen, Memo 16 september 1998, 7 A4

Grondmechanica Delft, CO-383270: HEISA, beschrijving Begemann-boringkernen, Memo 5 april 1998, 5 A4

BIJLAGE F

FFD-SONDERINGEN

Algemene informatie over het systeem 'Fuel Fluorescence Detector' (FFD), 2 A4

Aantal specifieke voorbeelden en ijkingen, 1 A4

Memo Joustra Geomet BV met betrekking tot het systeem en de proefneming, 3 A4

BIJLAGE G

VERZAMELSTATEN VAN ANALYSEGETALLEN

Overzicht van analyses verzameld door HMVT tijdens proef, 2 A4

Separaat rapport bevat:

Verzamelblad analyseresultaten grond, 4 A4

sorteringen:

- vergelijking analyseresultaten in het luchtbelproefgebied, 1 A4
- vergelijking HEIA en HEIB in onttrekkingsgebied, 1 A4
- vergelijking invloed nabij filter 1 op 0, 1 en 2 meter afstand, 1 A4
- vergelijking links en rechts in de steekbus, 1 A4
- ijking van FFD-sonderingen, 1 A4

Verzamelblad analyseresultaten grondwater, 1 A4

sorteringen:

- vergelijking resultaten grondwater in het luchtbelgebied, 1 A4
- vergelijking onttrekkingsgebied grondwater, 1 A4

MODELLERING VAN STOFTRANSPORT

Samenvatting 1

1. Inleiding

In de volgende paragrafen wordt de modellering samengevat en vervolgens wordt getoetst aan het vooraf gestelde criterium voor de haalbaarheid van sanering van de beschouwde verontreinigde bodem. Voor nadere gegevens over de uitgevoerde modellering wordt verwezen naar de betreffende deelrapporten (zie 1.4), waarbij het omwille van de inzichtelijkheid raadzaam is de deelrapporten te lezen in de volgorde 'modellering stofgedrag' - 'modellering stroming'.

2. Verontreinigingssituatie

De tolupeenverontreiniging op de onderzoekslocatie VADA in Wageningen bevindt zich in een kleilaag van circa 1,6 m dikte op een diepte vanaf circa 1,5 m-mv. De bodem tussen het maai-veld en de kleilaag bestaat uit grof ophoogmateriaal (zand en puin). Onder de kleilaag bevindt zich een watervoerend pakket met een dikte van circa 25 m. In de kleilaag komen zandlaagjes voor met een dikte van maximaal 0,2 m. De gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstand bedragen respectievelijk 1,8 m-mv en 2,9 m-mv.

3. Modellering

Voor de grondwater- en luchtstroming is gebruik gemaakt van het model MODFLOW en voor het stoftransport van het model ECOSAT. De berekeningen aan de sanering van klei door verwijdering van de verontreiniging (tolueen) via de waterfase en verwijdering via de gasfase hebben een aantal duidelijke conclusies met betrekking tot de haalbaarheid opgeleverd. Daarnaast is een aantal onzekerheden gesignaleerd over de technische uitvoerbaarheid van de sanering op de gemodelleerde wijze. Een aantal van deze onzekerheden moet met vervolgonderzoek worden weggenomen of worden verkleind.

4. Sanering via de waterfase

De belangrijkste bevinding is dat verwijdering van tolueen via de waterfase zeer traag zal verlopen. In de beoordeelde verontreinigingssituatie zal het tientallen jaren duren voordat de interventiewaarde in de klei is bereikt. Het stoftransport in de waterfase wordt daarbij vooral door trage diffusie veroorzaakt. Afbraak zou deze tijd kunnen halveren indien geen zuurstoflimitatie en andere beperkingen (te hoge tolueenconcentratie) optreden, hetgeen echter wel wordt verwacht. Trage desorptie speelt bij de zeer lage waterfluxen geen rol.

5. Sanering via de gasfase

Gezien de gemeten relatief hoge luchtdoorlatendheden van de kleimonsters zijn hoge luchtfluxen mogelijk. Hierdoor zal via vervluchtiging zeer snel verwijdering van tolueen kunnen plaatsvinden (volgens de berekeningen tientallen dagen). De vraag is echter of in de praktijk deze hoge luchtfluxen in de klei haalbaar zijn. Verificatie is nodig.

Afbraak en vervluchtiging kunnen beide bijdragen aan de tolupeenverwijdering via de gasfase. De afbraaksnelheid kan echter sterk worden beïnvloed door diverse limiterende factoren (geen zuurstoflimitatie). Bij in situ sanering lijkt optimalisatie van beide processen nuttig. Voor de luchtdoorstroming is het niet duidelijk geworden in welke mate de trage desorptie kan zorgen voor de vertraging van de saneringsduur. Het is mogelijk dat hier de trage massaoverdracht tussen de waterfase en de gasfase een belangrijke rol speelt.

Voor de luchtdoorlatendheid is verder het vochtgehalte in de grond van groot belang. Verlaging van dit gehalte zorgt voor meer vrije poriën en dus voor een grotere luchtdoorlatendheid.

Scheuring van de kleilagen, door uitdroging tijdens de sanering, maar eventueel ook oorspronkelijk aanwezige preferente stroombanen (zandige insluitingen of anderszins beter doorlatende delen in de klei) kunnen tot kortsluitstromingen leiden die een effectief drukverschil tussen de kleilaag insluitende zandlagen onmogelijk maken.

In dat geval zal het advectief transport beperkt blijven tot de preferente stroombanen en wordt de tragere gasdiffusie in de niet doorstroomde delen van de klei het tijdsbepalende proces. Uit de modelberekeningen van het stoftransport blijkt dat hiermee weliswaar langere maar nog een hanteerbare saneringsduur kan worden bereikt (10 à 20 jaar), mits de dikte van de kleilagen dan wel de grootte van de kleiaggregaten beperkt blijft tot maximaal enkele decimeters. Het is mogelijk dat ook hier de trage massaoverdracht tussen de waterfase en de gasfase een rol speelt.

6. Configuratie onttrekkingsmiddelen, bodemheterogeniteit

Het voorkomen van heterogeniteiten (scheuren, zandlaagjes en zandlenzen enz.) in ondiepe kleiige afzettingen in Nederland is eerder regel dan uitzondering (mede conclusie van PIT-geologie/geohydrologie). Hiermee moet dus rekening worden gehouden. Het is echter niet goed mogelijk om het heterogeniteitspatroon in afzettingen, zoals op het VADA-terrein, door middel van conventioneel veld- en laboratoriumonderzoek te karakteriseren.

Vooralsnog is geconcludeerd dat dergelijke heterogeniteiten een sanering door middel van gastransport niet per definitie onmogelijk maken, zelfs als blijkt dat gasdiffusie met advectie in preferente stroombanen het bepalende saneringsproces is. In de gemodelleerde situatie is de maximale diffusielengte bepalend voor de duur van het diffusieproces. Deze lengte is ten hoogste (bij een luchtflux van 0 m/d) gelijk aan de helft van de maximale kleilaagdikte tussen twee in het doorstroomproces betrokken zandlagen. De diffusielengte wordt verder in belangrijke mate bepaald door de heterogeniteit van de bodem (tussenliggende zandlaagjes en zandlenzen, krimpscheuren). Getracht zou kunnen worden de kleilaag zodanig te modificeren dat de aggregaatgrootte, en daarmee de diffusielengte, afneemt (wellicht mogelijk door hydrofracturing).

6. Trage massaoverdracht

In de stoftransportmodellering is verondersteld, dat de evenwichtsconcentraties in de waterfase en de gasfase zich instantaan instellen als functie van de betreffende verdelingscoëfficiënten en van de totaal nog aanwezige massa in de bodem. Het afvoerproces van toluen door de gasgevulde poriën is dan dus bepalend voor de snelheid waarmee de massa toluen in het saneringsobject afneemt. Als dit proces goed verloopt (de gasflux is voldoende hoog), gaat de veronderstelling van instantane instelling van de verdelingsevenwichten niet zonder meer op. Waarschijnlijk treedt ook aanzienlijke dispersie op door een groot verschil in stroomsnelheden in de verschillende stroombanen. Dit effect is mogelijk groter dan de trage massaoverdracht. In de stoftransportmodellering is deze situatie niet beschreven bij gebrek aan informatie over de daarbij betrokken invoerparameters, uitgezonderd de O₂-limitatie bij afbraak. Het is echter niet uitgesloten, dat deze processen op den duur limiterend worden voor de verwijderingssnelheid van toluen uit het saneringsobject.

Het rendement in termen van de verwijdering van de massa toluen uit de grond (zowel in de vorm van puur product als opgelost of geadsorbeerd) moet nader worden onderzocht.

Samenvatting 2

In het kader van het NOBIS-project HEISA zijn met het speciatie- en transportmodel ECOSAT berekeningen uitgevoerd om inzicht te krijgen in het gedrag van toluen in de verontreinigde kleibodem onder verschillende opgelegde omstandigheden. Het uiteindelijke doel is de snelheid van (geforceerde) verwijdering van toluen uit de verontreinigde kleilagen te voorspellen. De belangrijkste daarbij optredende speciatieprocessen (vervluchtiging, oplossen, desorptie en afbraak) en transportprocessen (advectie en diffusie/dispersie) zijn nader uitgewerkt. Ook is aangegeven op welke wijze deze processen in het hiervoor gebruikte rekenmodel ECOSAT worden beschreven.

De toluenverontreiniging bevindt zich in een kleilaag van circa 1,5 m dikte op een diepte van 1,5 tot 3 m-mv. In de kleilaag bevinden zich verspreid voorkomend dunne zandlaagjes met een dikte variërend tot maximaal 20 cm. Aan de boven- en onderzijde bevinden zich dikkere zandlagen, waardoor de afvoer van toluen via de water- of gasfase vermoedelijk snel verloopt. De modellering is daarom gericht op het stoftransport in de relatief slecht doorlatende kleilagen. Voor de bodemopbouw is als schematisatie gekozen voor kleilaagdikten van 10, 30 en 70 cm, waarmee de in de praktijk verwachte range aan effectieve transportafstanden wordt gedekt.

Uit de modellering blijkt dat bij de op de locatie gevonden maximale waarde van 19.000 mg toluen/kg grond het grootste deel van het toluen in de vorm van organische vloeistof zal voorkomen (> 66 %). Deze verdeling hangt af van de mate van adsorptie van toluen aan de organische stof, die weer afhankelijk is van het gehalte aan organische stof (gemiddeld 1,2 massa-%) en de waarde van de betreffende bindingsconstante ($K_{om} = 140$ tot 1.030 l/kg organische stof). Variatie in K_{om} blijkt weinig invloed te hebben op de berekende saneringsduur, omdat de bulk van het toluen in de vorm van organische vloeistof voorkomt.

Door de relatief lage waterflux die maximaal haalbaar is (hier gesteld op $V_D = 0,225$ mm/dag), wordt het stoftransport in de waterfase vooral door diffusie veroorzaakt. Dit leidt tot zeer lange saneringstijden (tientallen jaren). Afbraak zou deze tijd kunnen halveren indien geen O_2 -limitatie en andere beperkingen (te hoge toluenconcentraties) optreden, hetgeen echter wel wordt verwacht. Trage desorptie speelt hierbij geen rol vanwege de zeer lage waterflux, waardoor de snelheid van het desorptieproces relatief groot is.

De onverwacht hoge luchtdoorlatendheid, die in enkele kleimonsters is geconstateerd, leidt tot hoge mogelijke luchtfluxen (hier gesteld op $V_D = 3,6$ m/dag). Hierdoor verloopt de vervluchtiging zeer snel, binnen tientallen dagen. De diffusie speelt bij deze hoge luchtflux geen rol. De variatie in de waarde voor de luchtflux geeft een omgekeerd evenredig verband met de saneringsduur. Een lagere bodemluchttemperatuur dan 25 °C kan zorgen voor een forse verlenging van de nu voorspelde saneringsduur. Bij 15 °C ongeveer een factor 2.

Afbraak kan sterk bijdragen aan de toluenverwijdering, omdat nu veel minder snel O_2 -limitatie optreedt. Hierbij wordt wel aangenomen dat er geen andere beperkende factoren zijn (nutriëntenvoorziening, te hoge toluenconcentratie). Beide processen, vervluchtiging en afbraak, kunnen op elkaar worden afgestemd om een optimale in situ bodemsanering te realiseren.

Voor de luchtdoorstroming is het niet duidelijk geworden in welke mate de trage desorptie kan zorgen voor een vertraging in de saneringsduur en voor te hoge restconcentraties. Mogelijk dat ook de trage massaoverdracht tussen de gasfase en de waterfase een rol speelt. Om hierin enig

inzicht te krijgen is het noodzakelijk dat aanvullende kolomproeven met gestoken grondkolommen worden uitgevoerd.

Samenvatting 3

In het kader van het NOBIS-project HEISA zijn met het model MODFLOW berekeningen uitgevoerd om de effecten van geforceerde bodemlucht- en grondwaterstroming te voorspellen ten behoeve van het simuleren van stoftransport en afbraak van toluen in een slechtdoorlatende bodemlaag.

Het model is gebaseerd op de bodemeigenschappen die in deelstudie 3 van dit project zijn bepaald op het VADA-terrein in Wageningen. Het gemodelleerde bodemsysteem bestaat uit een pakket kleilagen, afgewisseld door een aantal dunne zandlaagjes. Alhoewel het kleipakket in werkelijkheid waarschijnlijk heterogeen van samenstelling is, is gekozen voor deze laagsgewijze opbouw. De geforceerde lucht- en grondwaterstroming zijn door middel van een drietal configuraties van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen met opgelegde druk gestuurd. Twee van deze configuraties behelzen verticale stroming vanuit de centrale zandlaag en één behelst horizontale stroming door het kleipakket.

Om te kunnen voorspellen in hoeverre verschijnselen als uitdroging, lekkage langs randen en dergelijke van invloed zijn op de doorstroming wordt geadviseerd om een kolomproef of een praktijkproef op kleine schaal uit te voeren. Hierbij kan dan aan de geïnjecteerde lucht een tracer worden toegevoegd om deze verschijnselen te kunnen waarnemen.

Uit de modellering blijkt dat een maximale verticale waterflux mogelijk is van circa 0,35 m per dag bij een overdruk van 2 m waterkolom. De gemiddelde verticale luchtflux is circa 7,5 m per dag bij een luchtoverdruk van circa 0,3 atmosfeer.

Variatie van de onderlinge afstand tussen de infiltratiedrains in de tussenzandlaag geeft een kleine variatie in de onttrekkingsdebieten doordat nabij de infiltratiedrains de flux iets toeneemt. De gemiddelde infiltratiedruk in de rest van de zandlaag blijft nagenoeg constant evenals de flux door elke kleilaag naar de onttrekkingsfilters.

Verhoging van de infiltratiedruk heeft een verhoging van de fluxen en infiltratiedebieten tot gevolg.

Indien heterogeniteit wordt gesimuleerd door variatie, in horizontale zin, van de luchtdoorlatendheden van de kleilagen heeft dit als effect dat de fluxen lineair variëren met de luchtdoorlatendheid van de kleilaag. Variatie van de doorlatendheid van het zand in deze laag levert echter wel variatie op in de druk in deze laag, zodat de verticale luchtfluxen door de kleilagen variëren.

Voor de luchtdoorlatendheid is het vochtgehalte in de grond van groot belang. Verlaging van dit gehalte zorgt voor meer vrije poriën en dus voor een grotere luchtdoorlatendheid. Als de bodemlagen enige tijd worden doorstroomd door lucht kan door verdamping en meevoering de vochtigheid in de bodem afnemen en kunnen krimpscheurtjes ontstaan. Het gevolg hiervan is dat de luchtdoorlatendheid sterk kan toenemen. De uitdroging wordt nog eens versterkt door de hogere temperatuur die ontstaat wanneer de lucht onder grote druk wordt geïnjecteerd.

Indien de bodem alternerend met water en met lucht wordt doorstroomd, is de tijd die nodig is om het water of de lucht uit de poriën te dringen van belang. Gezien de hogere luchtdoorlatendheid is deze tijd verwaarloosbaar voor de overgang van lucht naar water, maar voor de overgang van water- naar luchtstroming kan dit 1 tot 7 jaar duren. Er wordt derhalve, mede doordat de haalbare luchtfluxen groot zijn, geadviseerd om de bodemlagen enkel met lucht te doorstromen.