

SV-218

Demonstratie van anaërobe benzeen
bioremediatie

ir. P.C. Slik (Ingenieursbureau Oranjewoud B.V.)
ir. H. Hidding (Ingenieursbureau Oranjewoud B.V.)
dr. ir. A.A.M. Langenhoff (TNO-MEP)
dr. J. Griffioen (TNO-NITG)

juni 2003

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

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 SKB.

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, "©"Demonstratie van anaërobe benzeen bioremediatie", juni 2003, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

SKB 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 SKB 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 SKB 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 SKB.

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, "©"Demonstration of anaerobic benzene bio-remediation", June 2003, SKB, Gouda, The Netherlands."

Liability

SKB 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 SKB 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 SKB and/or the contributors.

Titel rapport

Demonstratie van anaërobe benzeen bioremediatie

SKB rapportnummer

SV-218

Project rapportnummer

SV-218

Auteur(s)

ir. P.C. Slik
ir. H. Hidding
dr. ir. A.A.M. Langenhoff
dr. J. Griffioen

Aantal bladzijden

Rapport: 43
Bijlagen: 40

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Ingenieursbureau Oranjewoud B.V. (ir. H. Hidding, ir. P.C. Slik, 0513-634313 / 0513-634312)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (dr. J. Griffioen, 030-2564808)
Provincie Groningen (J. Vrolijk, 050-3164542)
Oosterhof Holman Milieutechniek B.V. (ing. T.J.M. Noordstrand, 0594-280123)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

Op bodemmateriaal van de locatie Flebo in Hoogezand is in het laboratorium anaërobe afbraak van benzeen vastgesteld onder invloed van nitraat. Met een praktijkproef op de locatie is onderzocht of de afbraak van benzeen ook daadwerkelijk in het veld kon worden vastgesteld. Uit de veldresultaten blijkt dat anaërobe afbraak van benzeen plaatsvindt in grondwater, waarin gedurende enkele maanden nitraat aanwezig is. De gemeten snelheid van afbraak is vergelijkbaar met hetgeen in de literatuur wordt vermeld. In grondwater, waarin hoge gehalten sulfiden aanwezig zijn of geen nitraat aanwezig is, is geen afbraak van benzeen vastgesteld. De conclusies uit het laboratoriumonderzoek worden hierdoor in de praktijkproef bevestigd. Er is nu een nieuwe saneringstechniek beschikbaar voor verontreiniging met benzeen in grondwater. De techniek is naar de huidige inzichten inzetbaar op locaties met een anaëroob bodemmilieu. In het hele land, maar vooral in het noorden en westen, komt deze situatie op grote oppervlakken voor.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

afbraak, anaëroob, benzeen, nitraat, infiltratie

Vrije trefwoorden:

redoxstatus

Titel project

Demonstratie van anaërobe benzeen bioremediatie

Projectleiding

Ingenieursbureau Oranjewoud B.V.
(ir. P.C. Slik, 0513-634312)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title
Demonstration of anaerobic benzene bio-remediation

SKB report number
SV-218

Project report number
SV-218

Author(s)
ir. P.C. Slik
ir. H. Hidding
dr. ir. A.A.M. Langenhoff
dr. J. Griffioen

Number of pages
Report: 43
Appendices: 40

Executive organisation(s) (Consortium)

Ingenieursbureau Oranjewoud B.V. (ir. H. Hidding, ir. P.C. Slik 0513-634313 / 0513634312)
TNO-MEP (dr. ir. A.A.M. Langenhoff, 055-5493034)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (dr. J. Griffioen, 030-2564808)
Provincie Groningen (J. Vrolijk, 050-3164542)
Oosterhof Holman Milieutechniek B.V. (ing. T.J.M. Noordstrand, 0594-280123)

Publisher
SKB, Gouda

Abstract

Laboratory tests on soil material from the Flebo site in Hoogezand have revealed anaerobic degradation of benzene under the influence of nitrate. A practical test at the site investigated whether the degradation of benzene could actually be detected in the field. The results showed that anaerobic degradation of benzene occurs in groundwater, in which nitrate is present for several months. The measured rate of degradation is comparable with that specified in the literature. No degradation of benzene was detected in groundwater containing high levels of sulphides or no nitrate. The conclusions drawn from the laboratory research were thereby confirmed by the practical test. There is now a new remediation technique available for benzene contamination in groundwater. According to current insights, the technique can be used at sites with anaerobic soil environments. This is the case throughout the country, but especially in the large expanses in the north and west.

Keywords

Controlled terms:

anaerobic, benzene, degradation, nitrate, infiltration

Uncontrolled terms

redox status

Project title
Demonstration of anaerobic benzene bio-remediation

Projectmanagement
Ingenieursbureau Oranjewoud B.V.
(ir. P.C. Slik, 0513-634312)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

VOORWOORD

Dit rapport beschrijft de resultaten van de uitgevoerde praktijkproef op de locatie 'Flebo' in Hoogezand.

Het onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van de resultaten van NOBIS-project 96-3-05: 'Benzeenafbraak in een sterk reducerende bodem' [september 1999]. Tijdens het NOBIS-project is in het laboratorium anaërobe afbraak van benzeen aangetoond in monsters van de locatie waaraan nitraat als elektronenacceptor was toegevoegd.

De praktijkproef bestond uit het dimensioneren en monitoren van het infiltratiesysteem, het monitoren van de gehalten nitraat en benzeen in de bodem na afloop van de infiltratie en ondersteunend laboratoriumonderzoek.

Het project is uitgevoerd door het consortium bestaande, uit de provincie Groningen (Afdeling Milieubeleid en Bodemsanering), Ingenieursbureau Oranjewoud B.V., het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO-NITG), Oosterhof Holman Milieutechniek B.V. en de afdeling Milieubiotechnologie van TNO-MEP (Milieu, Energie en Procesinnovatie). Het project is met steun van bovengenoemde partijen en de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB) tot stand gekomen.

Het rapport beschrijft in hoofdlijnen de opzet en resultaten van het onderzoek. Detailinformatie uit de diverse metingen en registraties is achterwege gelaten om het rapport niet onnodig dik te maken. Deze informatie is op te vragen bij SKB.

juni 2003

INHOUD

		SAMENVATTING.....	VI
		SUMMARY.....	VIII
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
Hoofdstuk	2	UITGANGSSITUATIE.....	3
	2.1	Terreinbeschrijving en historie	3
	2.2	Verontreinigingssituatie.....	4
	2.3	Bodemopbouw en hydrologie.....	4
	2.4	Resultaten voorgaand onderzoek	5
	2.5	Afbraak van benzeen	6
	2.6	Nitraatinjectie als mogelijk nieuwe saneringstechniek	7
Hoofdstuk	3	ONTWERP EN AANLEG VAN HET INFILTRATIESYSTEEM.....	8
	3.1	Ontwerp van het systeem	8
	3.2	Nitraatdosering.....	11
	3.3	Aanleg van het systeem.....	13
	3.4	Vaststellen van de nulsituatie.....	14
	3.5	Veldanalyses.....	15
Hoofdstuk	4	UITVOEREN VAN DE INFILTRATIE.....	17
	4.1	Draaiuren van het systeem	17
	4.2	Controlemetingen aan het systeem	17
	4.2.1	Gehalten nitraat, nitriet en bromide in de doseervaten	17
	4.2.2	Gehalten benzeen in opgepompt water	18
	4.2.3	Geïnfiltreerde debieten.....	18
	4.2.4	Zwevende stof in het bemalingswater	19
	4.2.5	Verloop van de gehalten nitraat in de bodem.....	21
	4.2.6	Verloop van de gehalten bromide in de bodem.....	22
	4.3	Evaluatie van de infiltratie en aandachtspunten	22
Hoofdstuk	5	RESULTATEN MONITORING IN HET VELD	23
	5.1	Werkwijze.....	23
	5.2	Verloop van de gehalten nitraat en aromaten in de bodem.....	23
	5.3	Redoxcondities in de bodem.....	27
	5.4	Evaluatie van de monitoringsresultaten	29
Hoofdstuk	6	BATCHEXPERIMENTEN	31
	6.1	Doel van het onderzoek	31
	6.2	Uitvoering van het onderzoek	31
	6.3	Resultaten batchexperimenten	32
	6.3.1	Resultaten eerste serie batchexperimenten	32
	6.3.2	Resultaten tweede serie batchexperimenten	33
	6.3.3	Resultaten derde serie batchexperimenten.....	35
	6.4	Discussie	36

Hoofdstuk	7	TOEPASSEN VAN DE TECHNIEK EN VERVOLGONDERZOEK	38
	7.1	Huidige stand van zaken.....	38
	7.2	Toepassen van de techniek op de Flebo-locatie.....	38
	7.3	Toepassen van de techniek op andere locaties	39
	7.4	Aanvullend wetenschappelijk onderzoek	40
Hoofdstuk	8	ALGEMENE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
		LITERATUUR	43
Bijlage	A	VERONTREINIGINGSSITUATIE GRONDWATER LOCATIE FLEBO	
Bijlage	B	ONTWERP VAN DE PRAKTIJKPROEF	
Bijlage	C	LOCATIE MONITORINGSFILTERS	
Bijlage	D	BOORPROFIELEN	
Bijlage	E	RESULTATEN NULSITUATIE	
Bijlage	F	GEMETEN GEHALTEN NITRAAT TIJDENS DE INFILTRATIE	
Bijlage	G	GEMETEN GEHALTEN BROMIDE TIJDENS DE INFILTRATIE	
Bijlage	H	VERLOOP GEMETEN GEHALTEN BENZEEN, TOLUEEN, NITRAAT EN NITRIET IN DE BODEM	
Bijlage	I	VERLOOP REDOXPARAMETERS	

SAMENVATTING

Demonstratie van anaërobe benzeen bioremediatie

In de voormalige chemische fabriek 'Flebo' in Hoogezand zijn natuurlijke geur- en smaakstoffen geëxtraheerd en verwerkt. Als gevolg van deze activiteiten zijn grond en grondwater op de locatie ernstig verontreinigd geraakt met oplosmiddelen, geur- en smaakstoffen. De bodem op de projectlocatie kan worden omschreven als 'diep anaëroob'.

Nadat de activiteiten van de fabriek begin jaren tachtig zijn beëindigd, zijn de opstallen gesloopt en is de verontreinigde grond ontgraven. Aansluitend is een grondwatersanering opgestart volgens het principe 'pump and treat'. Het effluent is daarbij deels geïnfiltreerd en deels op het riool geloosd.

Het grondwater op de locatie bevat veel waterstofsulfide. Emissies vanuit de waterzuivering op de locatie en vanuit het effluent dat op de riolering werd geloosd, veroorzaakten stankoverlast voor de omgeving. Uiteindelijk heeft dit er toe geleid dat de grondwatersanering voortijdig is beëindigd. Op de locatie resteert momenteel nog een omvangrijke restverontreiniging met benzeen in het grondwater.

Om de mogelijkheden voor aanpak van de restverontreiniging via anaërobe afbraak te onderzoeken, is een onderzoeksconsortium opgericht, bestaande uit de provincie Groningen, Ingenieursbureau Oranjewoud B.V., TNO-NITG, TNO-MEP en Oosterhof-Holman Milieutechniek.

In het vooronderzoek [NOBIS rapport 96-3-05 "Benzeenafbraak in een sterk reducerende bodem", 1999] is vastgesteld dat op de locatie sprake is van een sulfaatreducerend tot methanogeen milieu. Tijdens batchexperimenten met grond en grondwater van de locatie is anaërobe afbraak van benzeen vastgesteld onder invloed van nitraat. Afbraak trad daarbij pas op na een lagfase (adaptatietijd micro-organismen) van 25 tot 75 dagen. Met deze resultaten was de basis aanwezig voor het uitvoeren van een praktijkproef op de locatie.

In de praktijkproef is onderzocht of anaërobe afbraak van benzeen in de bodem met nitraat op gang kon worden gebracht. Daarnaast had het project tot doel om praktijkervaring op te doen met de infiltratie van nitraathoudend water in een anaëroob pakket en met het monitoren van gestimuleerde anaërobe benzeenafbraak in verontreinigd grondwater.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat de anaërobe afbraak van benzeen plaatsvindt in grondwater, waarin gedurende langere tijd nitraat aanwezig is. De gemeten snelheid van afbraak is vergelijkbaar met hetgeen in de literatuur wordt vermeld. In grondwater, waarin nog hoge gehalten sulfiden aanwezig zijn en daardoor geen nitraat, is geen afbraak van benzeen vastgesteld. Daarmee worden de conclusies uit het voorgaande laboratoriumonderzoek bevestigd.

Voor het saneren van de locatie Flebo en voor soortgelijke locaties elders is hiermee een nieuwe saneringstechniek beschikbaar gekomen. De techniek is naar de huidige inzichten inzetbaar op locaties waar sprake is van een anaëroob bodemmilieu. In Nederland betreft dit een groot deel van de westelijke en noordelijke provincies. Met de techniek kan ook een verontreiniging worden aangepakt die bijvoorbeeld onder bebouwing aanwezig is.

Voorafgaand aan de toepassing op een locatie of een deel daarvan, moet de techniek worden afgewogen tegen de beschikbare alternatieven. Dit zou plaats kunnen vinden in het saneringsonderzoek voor de locatie. Op het moment dat de techniek interessant is, kan vervolgonderzoek worden uitgevoerd. Hiervoor is in het rapport een stappenplan opgenomen.

De infiltratie van nitraathoudend water is zonder grote problemen verlopen. Voor het dimensioneren van een infiltratiesysteem voor het inbrengen van nitraat in de bodem, zijn aandachtspunten opgesteld.

Aanbevolen wordt om de haalbaarheid van de techniek op andere locaties te onderzoeken. Aanvullend wetenschappelijk onderzoek dient uit te wijzen welke bacteriën verantwoordelijk zijn voor de anaërobe afbraak van benzeen en onder welke omstandigheden deze bacteriën optimaal functioneren.

SUMMARY

Demonstration of anaerobic benzene bio-remediation

Natural aromas and flavourings were extracted and processed at the former 'Flebo' chemical factory in Hoogezand. These activities caused the soil and groundwater at the site to become seriously contaminated with solvents, aromas and flavourings. The soil at the site can be described as 'deeply anaerobic'.

After the factory ceased operating in the early nineteen eighties, the buildings were demolished and the contaminated ground was excavated. This was followed by groundwater remediation based on the 'pump and treat' principle. This involved filtration of a portion of the effluent and drainage of the remainder into the sewers.

The groundwater at the site contains a high level of hydrogen sulphide. Emissions from the water purification at the site and from the effluent released into the sewers caused noxious smells to pervade the vicinity. This eventually led to premature termination of the groundwater remediation. The groundwater at the site is still highly contaminated with benzene.

A research consortium consisting of the Provincie Groningen (Groningen provincial government), Ingenieursbureau Oranjewoud B.V., TNO-NITG, TNO-MEP and Oosterhof-Holman Milieutechniek was created in order to investigate options for an approach to this remnant contamination using anaerobic degradation.

The preliminary study [NOBIS report 96-3-05 "Benzeenaafbraak in een sterk reducerende bodem", 1999 (Benzene degradation in strongly reducing soil)] revealed that the environment at the site is sulphate reducing to methanogenic. Batch experiments with the soil and groundwater at the site revealed anaerobic degradation of benzene under the influence of nitrate. Degradation only began after a lag phase (adaptation period of micro-organisms) of 25 to 75 days. These results provided the basis for the execution of a practical test at the site.

The practical test investigated whether nitrate can be used to initiate anaerobic degradation of benzene in the soil. The project was also geared to gaining practical experience with the infiltration of water containing nitrate into an anaerobic package and the monitoring of stimulated anaerobic benzene degradation in contaminated groundwater.

The results of the research revealed that the anaerobic degradation of benzene occurs in groundwater in which nitrate has been present for an extended period of time. The measured rate of degradation is comparable to that specified in the literature. No degradation of benzene was detected in groundwater that contains high levels of sulphides, and therefore no nitrate. This confirms the conclusions of the prior laboratory research.

A new remediation technique for the remediation of the Flebo site and similar sites has therefore become available. According to current insights, the technique can be used at sites with anaerobic soil environments. This concerns a large part of the western and northern provinces of the Netherlands. The technique can also be used to tackle contamination that is located e.g. under buildings.

The technique must be compared with the available alternatives prior to its application at all or part of a site. This could be carried out during the remediation study for the site. A follow-up study can be carried out if the technique appears to be interesting. A phased plan for this is included in the report.

The infiltration of water containing nitrate occurred without any major problems. Points of attention have been drawn up for the dimensioning of an infiltration system for the introduction of nitrate into the soil.

We recommend investigating the feasibility of the technique at other locations. Additional scientific research must indicate which bacteria are responsible for the anaerobic degradation of benzene and under what circumstances these bacteria function optimally.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

In Nederland is een groot aantal locaties verontreinigd met vluchtige aromaten. Van deze stoffen is benzeen het meest mobiel in het milieu en bovendien carcinogeen. Benzeen wordt daarom als een probleemstof ervaren bij bodem- en grondwaterverontreiniging. Doordat de aromaten onder natuurlijke condities in het grondwater niet of slechts langzaam worden omgezet leidt dit in vele gevallen tot omvangrijke verontreinigingen in het grondwater.

De locatie van de voormalige chemische fabriek 'Flebo' in Hoogezand is hier een voorbeeld van. In deze fabriek zijn natuurlijke geur- en smaakstoffen geëxtraheerd en verwerkt tot andere verbindingen. Nadat de activiteiten van de fabriek begin jaren tachtig zijn beëindigd, zijn de opstallen gesloopt en is de verontreinigde grond ontgraven. Aansluitend is een grondwatersanering opgestart volgens het principe 'pump and treat'. Het effluent is daarbij deels geïnfilterd en deels op het riool geloosd.

Het grondwater op de locatie bevat veel waterstofsulfide. Emissies vanuit de waterzuivering op de locatie en vanuit het effluent dat op de riolering werd geloosd veroorzaakten stankoverlast voor de omgeving. Uiteindelijk heeft dit er toe geleid dat de sanering voortijdig is beëindigd. Op de locatie resteert momenteel nog een omvangrijke verontreiniging met benzeen in het grondwater.

Vooronderzoek

Om de mogelijkheden voor aanpak van de restverontreiniging via anaërobe afbraak te onderzoeken, is in het kader van het NOBIS-programma een onderzoeksconsortium opgericht, bestaande uit de provincie Groningen, TNO-MEP, TNO-NITG, Oosterhof-Holman Milieutechniek en Ingenieursbureau Oranjewoud.

Tijdens het vooronderzoek (NOBIS-rapport 96-3-05 "Benzeenafbraak in een sterk reducerende bodem", [J. Griffioen et al., 1999]) is vastgesteld dat op de locatie sprake is van een sulfaatreducerend tot methanogeen milieu, met gemiddelde sulfaatconcentraties van rond de 100 mg/l. Uit batchexperimenten met grond en grondwater van de locatie bleek dat onder de huidige omstandigheden én in aanwezigheid van sulfaat binnen de meetperiode (125 dagen) geen anaërobe afbraak van benzeen plaatsvond. Het toedienen van nitraat in het laboratorium leidde echter tot de (volledige) afbraak van benzeen. Afbraak trad daarbij pas op na een lagfase (adaptatietijd micro-organismen) van 25 tot 75 dagen. Met deze resultaten was de basis aanwezig voor het uitvoeren van een praktijkproef op de locatie.

Doelstelling

Voor de praktijkproef zijn de volgende onderzoeksdoelen geformuleerd:

1. Aantonen of de anaërobe afbraak van benzeen in de bodem met nitraat op gang kan worden gebracht;
2. Het verzamelen en beschrijven van praktijkervaring met de infiltratie van nitraathoudend water in een anaëroob pakket;
3. Het verzamelen en beschrijven van praktijkervaring met het monitoren van anaërobe benzeen afbrekende activiteit in het grondwater.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is informatie opgenomen over de projectlocatie en het uitgevoerde vooronderzoek. In de hoofdstukken 3 en 4 wordt respectievelijk ingegaan op het ontwerp van het systeem en het verloop van de infiltratie. In de hoofdstukken 5 en 6 wordt verslag gedaan van de resultaten van de uitgevoerde monitoring in het veld en in het laboratorium. Op basis van de ervaringen is in hoofdstuk 7 een stappenplan opgesteld met het oog op het toepassen van het saneringsconcept op andere locaties. Tot slot volgen in hoofdstuk 8 de algemene conclusies en aanbevelingen.

HOOFDSTUK 2

UITGANGSSITUATIE

2.1 Terreinbeschrijving en historie

De voormalige chemische fabriek 'Flebo' ligt aan de Mient Veningastraat te Hoogezand. De regionale ligging van de onderzoekslocatie is opgenomen in figuur 1.

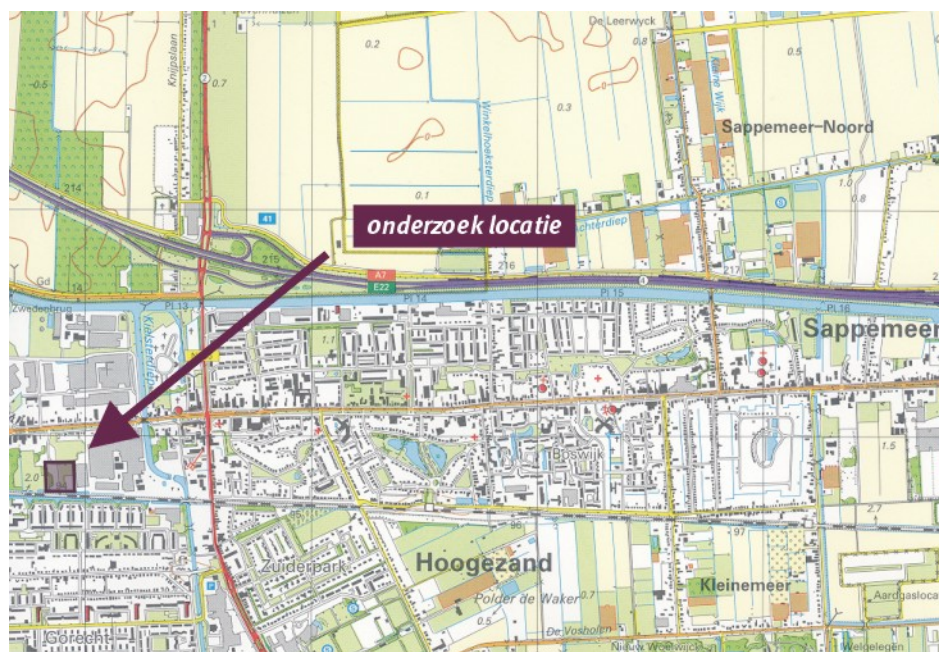


Fig. 1. Regionale ligging onderzoekslocatie.

In de fabriek zijn natuurlijke geur- en smaakstoffen geëxtraheerd en verwerkt. Door de activiteiten op het terrein is een verontreiniging achtergebleven met oplosmiddelen. Deze zijn gemorst en gestort op diverse locaties op het terrein. Het betreft benzeen, toluen en dichloormethaan, waarbij benzeen als maatgevend is beschouwd vanwege de omvang van de verontreiniging.

De activiteiten van de fabriek zijn begin jaren tachtig beëindigd. Nadat de opstallen van de fabriek zijn gesloopt, is in 1989 circa 3.400 ton verontreinigde grond ontgraven en afgevoerd. Daarbij is tevens circa 50.000 m³ grondwater onttrokken, gezuiverd en deels weer geïnfiltrerd. Aansluitend is de grondwatersanering uitgebreid met 5 extra deepwells. Van juni 1992 tot februari 1994 is met een totaal debiet van circa 60 m³/uur onttrokken.

Het onttrokken water is deels gezuiverd via een stripinstallatie met zuivering van de striplucht op actief kool. De zuiveringsinstallatie is na een aantal maanden afgekoppeld, omdat de gehalten aan verontreiniging in het onttrokken water het lozen op de riolering mogelijk maakten.

Het grondwater bevat veel waterstofsulfide. De zuivering op de locatie en de lozing van het effluent veroorzaakten een zodanige stankoverlast voor de omgeving, dat besloten is om de sanering voortijdig te beëindigen. Daarmee is nog een aanzienlijke restverontreiniging in het grondwater achter gebleven.

De locatie is eigendom van een kartonfabriek. Momenteel ligt het terrein braak. De aangrenzende percelen worden gebruikt als grasveld of parkeerplaats voor vrachtwagens.

2.2 Verontreinigingssituatie

Nadat de grondwatersanering is beëindigd, is de verontreinigingssituatie in 1994 vastgelegd. Daaruit bleek dat de grondwatersanering effectief was geweest, maar dat nog een aanzienlijke restverontreiniging in het grondwater resteert. De gehalten aan benzeen zijn maatgevend voor zowel de ernst als de omvang van de restverontreiniging in het grondwater. Toluëen en dichloormethaan werden nog slechts lokaal aangetroffen in lage concentraties.

Voorafgaand aan het dimensioneren van de praktijkproef is de verontreinigingssituatie van het grondwater in januari 2000 geactualiseerd. Hieruit bleek dat de totale omvang van de verontreiniging vergelijkbaar is met de situatie van 1994. De verontreiniging is aanwezig op een diepte van circa 7 tot 21 meter beneden maaiveld, waarbij de hoogste gehalten benzeen tussen 10 en 15 meter beneden maaiveld zijn gemeten. Het gaat daarbij om concentraties tot circa 500 µg/l. Tijdens het onderzoek zijn enkele filters bijgeplaatst om de kern van de verontreiniging (is locatie proefgebied) beter in beeld te brengen. Lokaal zijn in enkele filters verhoogde gehalten toluëen aangetroffen. De verontreinigingssituatie is weergegeven op de tekeningen in bijlage A. Op deze tekeningen is tevens de locatie van de praktijkproef weergegeven.

2.3 Bodemopbouw en hydrologie

Flebo locatie

Op de Flebo locatie worden vanaf maaiveld de volgende formaties aangetroffen (zie tabel 1). De gegevens zijn ontleend aan het Grondwaterplan van de Provincie Groningen. Van de bovenste 25 meter van de locatie zijn daarnaast boorstaten en sondeerdiagrammen beschikbaar.

De hoogte van het maaiveld is gemiddeld circa N.A.P. +2,0 m. De grondwaterstand varieert tussen N.A.P. + 0,2 en N.A.P.-0,5 m.

Tabel 1. Geologische indeling en samenstelling bodem.

Diepte in m –mv.	Diepte in m t.o.v. N.A.P.	Dikte in m	Formatie	Samenstelling
0 tot 0,5 à 2	+ 1,5 tot + 1,0 a - 0,5	0,5 tot 2	-	Ophooglaag (zandig)
0,5 a 2 tot 7	+ 1,0 a - 0,5 tot – 5	5	Twente / Griendtsveen	Dekzand
7 tot 25	- 5 tot – 23	18	Twente	Fluvioperiglaciale afzettingen
25 tot 35	- 23 tot – 33	10	Eem	Slibhoudend zeezand en klei
35 tot 45	- 33 tot – 43	10	Drente	Grove smeltwaterafzettingen
45 tot 145	- 43 tot – 143	100	Urk en Harderwijk	Rivierafzettingen

Voor de praktijkproef is met name de formatie van Twente van belang. De afzettingen van deze formatie zijn gevormd uit materiaal van lokale herkomst (keileem, smeltwaterafzettingen en mariene afzettingen). De afzettingen bestaan uit matig fijn tot matig grof zand met lokale insluitingen van laagjes slibhoudend zand, leem en veen.

Op de Flebo locatie worden tussen 7 en 12 m –mv. fijnzandige afzettingen aangetroffen met plaatselijk kleilaagjes met een dikte van maximaal enkele centimeters.

Locatie praktijkproef

Tijdens de praktijkproef is een gering bodemvolume doorspoeld met nitraathoudend grondwater. Op een cirkelsegment (105°) met een straal van 10 meter zijn in totaal 6 infiltratiefilters en 2 ont-trekkingsfilters geplaatst. Uit de boorbeschrijvingen van de geplaatste infiltratiefilters is een dwarsprofiel van de bodemopbouw opgesteld. Deze is weergegeven als figuur 2.

INFILTRATIEFILTERS

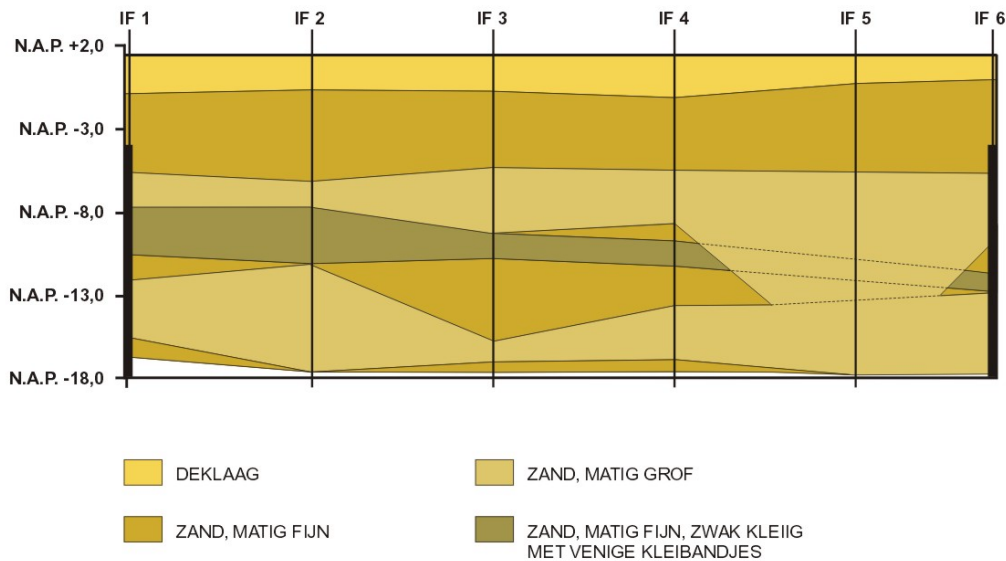


Fig. 2. Dwarsprofiel bodemopbouw ter plaatse van proeflocatie.

Uit figuur 2 blijkt dat de bodem tussen 9 en 12 m –mv. plaatselijk minder goed doorlatend is vanwege de aanwezigheid van zwak kleiig, matig fijn zand, waarin venige kleibandjes aanwezig zijn. Daarnaast is de bodemopbouw niet homogeen.

2.4 Resultaten voorgaand onderzoek

In NOBIS-verband is gezocht naar een alternatief voor het saneren van de achtergebleven restverontreiniging in het grondwater. In het eindrapport (NOBIS-rapport 96-3-05 "Benzeenaafbraak in een sterk reducerende bodem" [J. Griffioen et al., 1999]) zijn de resultaten vastgelegd. De volgende werkzaamheden zijn destijds verricht.

Veldkarakterisatie

In het NOBIS-project is de bodem op de projectlocatie nader gekarakteriseerd. Uit de bemonstering van grond en grondwater op de locatie blijkt dat sprake is van een sulfaatreducerend tot mogelijk methanogeen milieu. In de kern van de verontreiniging zijn hoge gehalten sulfide aangetoond. Op basis van de veldkarakterisatie is voorgesteld om tijdens de praktijkproef 200 mg/l nitraat te infiltreren.

Laboratoriumonderzoek

Door middel van batchexperimenten met grond en grondwater van de locatie is onderzocht of in de huidige situatie op de locatie reeds anaërobie afbraak van benzeen plaatsvindt en of deze afbraak kan worden gestimuleerd door het toedienen van minimale hoeveelheden zuurstof en/of de elektronenacceptoren nitraat en sulfaat [NOBIS-rapport 96-3-05 Griffioen et al., 1999].

Uit de resultaten blijkt dat in de huidige situatie geen anaërobie afbraak van benzeen plaatsvindt. Verder leidt het toedienen van sulfaat als elektronenacceptor binnen de meetperiode (125 dagen) niet tot de afbraak van benzeen. Geconcludeerd is dat in het onderhavige materiaal geen sulfaatreducerende micro-organismen aanwezig zijn die benzeen onder de gegeven omstandigheden kunnen omzetten. Dit correspondeert met de veldgegevens, waaruit blijkt dat in het grondwater reeds sulfaat aanwezig is.

Het toedienen van nitraat als elektronenacceptor leidt in het laboratorium wel tot de (volledige) afbraak van benzeen. Het nitraat wordt tevens verbruikt voor de afbraak van bulk organisch materiaal en de oxydatie van ijzer en sulfiden. Nitraat is in het grondwater van de projectlocatie niet of nauwelijks aanwezig.

In de batchexperimenten zijn concentraties nitraat van 50 mg/l, 100 mg/l en 200 mg/l toegevoegd. Een concentratie nitraat van 50 mg/l gaf in deze proeven de meest volledige afbraak (mineralisatie) te zien bij een lagfase van 25 tot 75 dagen.

Uit de batchexperimenten blijkt verder dat het reducerend vermogen van de grond beperkt is, maar wel langdurig heerst.

Er is in het vooronderzoek ook afbraak van benzeen vastgesteld in monsters, waaraan een geringe hoeveelheid zuurstof is toegevoegd (circa 20% van de totale zuurstofbehoefte). Door het toedienen van zuurstof vindt mogelijk een initiële oxidatie van benzeen plaats. Hierbij worden catecholen gevormd, die onder anaërobe omstandigheden afbreekbaar zijn met bijvoorbeeld nitraat als elektronenacceptor.

Bovenstaande resultaten zijn zowel in batchexperimenten als fluidized bedexperimenten aangetoond. Al met al voldoende resultaat om de haalbaarheid tijdens een praktijkproef nader te onderzoeken.

2.5 Afbraak van benzeen

Bij bodemsaneringen wordt voor benzeenafbraak veelal gebruik gemaakt van aërobe afbraak (reactie 1). Vooral in diepe bodemsystemen met een complexe opbouw is zuurstofintroductie duur, inefficiënt en moeilijk toepasbaar en is er een behoefte aan alternatieve methoden.

In anaërobe bodems wordt de biologische afbraak van benzeenverontreiniging beperkt door het gebrek aan geschikte elektronenacceptoren. Anaërobe benzeenafbraak met sulfaat, ijzer of nitraat als elektronenacceptor (reactie 2, 3 & 4) is aangetoond [Coates et al., 2002, Edwards en Grbic-Galic, 1992, Kazumi et al., 1997, Lovley et al., 1995], echter op veel locaties blijkt deze afbraakcapaciteit niet aanwezig te zijn. Afbraak is vooral aangetoond op locaties waar benzeen reeds lange tijd aanwezig is.

Tabel 2. Netto reactievergelijkingen voor microbiologische benzeenafbraak met verschillende elektronenacceptoren.

1.	$C_6H_6 + 7,5 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 3 H_2O$
2.	$C_6H_6 + 6 HNO_3 \rightarrow 6 CO_2 + 3 N_2 + 5 H_2O + 2 H^+$
3.	$C_6H_6 + 30 Fe(OH)_3 \rightarrow 6 CO_2 + 30 FeO + 24 H_2O + 42 H^+$
4.	$C_6H_6 + 3,75 H_2SO_4 \rightarrow 6 CO_2 + 3,75 H_2S + 3 H_2O$

Op locaties waar de anaërobe benzeenafbraak wel optreedt, verloopt het proces met snelheden die orden van grootte lager zijn dan de aërobe afbraak (reactie 1). De waargenomen degradatieconstanten voor de aërobe afbraak van benzeen [Suarez et al., 1999] variëren van 0 tot 2,5 d-1 (gemiddeld 0,335 d-1) en onder nitraatreducerende omstandigheden van 0 tot 0,089 d-1 (gemiddeld 0,008 d-1).

Inmiddels zijn 2 bacteriën geïsoleerd die benzeen met nitraat als elektronenacceptor kunnen omzetten [Coates et al., 2001]. Er is nog maar weinig bekend omtrent de mechanismen van anaërobe afbraak van benzeen en de bacteriën die bij dit proces betrokken zijn. Hierdoor ontbreken technieken, waarmee reproduceerbaar een snelle en stabiele anaërobe benzeenafbraak verkree-

gen kan worden, hetgeen een belangrijke bottleneck vormt voor de ontwikkeling van de biologische bodemsanering van met benzeen (en andere koolwaterstoffen) verontreinigde locaties.

2.6 Nitraatinjectie als mogelijk nieuwe saneringstechniek

De injectie van nitraat in watervoerende pakketten is in potentie een zeer aantrekkelijke saneringsvariant.

Grote voordelen van deze techniek zijn dat:

1. nitraat goed oplosbaar is en in hoge concentraties aan het grondwater kan worden toegevoegd;
2. er niet tot nauwelijks sprake is van het lozen van bemalingswater (gesloten systeem);
3. de bovengrondse voorzieningen eenvoudig van opzet zijn;
4. het risico van verstopping van infiltratiefilters beperkt is onder anaërobe condities;
5. ten opzichte van het gebruik van zuurstof minder verzuring optreedt in de bodem;
6. verontreiniging onder bebouwing relatief eenvoudig kan worden aangepakt;
7. de bodem in principe slechts éénmaal hoeft te worden doorspoeld om het grondwater van nitraat te voorzien.

Nadelen van de techniek kunnen zijn dat:

1. afbraak onder anaërobe omstandigheden minder snel verloopt dan onder aërobe omstandigheden;
2. er nog kennis ontbreekt over de achterliggende biologische processen.

In het huidige bodemsaneringsbeleid, waarin gestreefd wordt naar saneren binnen een periode van 30 jaar hoeft de, ten opzichte van aërobe afbraak, lagere afbraaksnelheid geen probleem te zijn.

ONTWERP EN AANLEG VAN HET INFILTRATIESYSTEEM

3.1 Ontwerp van het systeem

Het dimensioneren en het uitvoeren van de praktijkproef is in twee aparte deelprojecten uitgevoerd. Dit vanwege het belang dat aan een goed ontwerp werd gesteld. Het infiltratiesysteem is in nauw overleg met de consortiumleden ontworpen. Het concept ontwerp is vervolgens voorgelegd aan en besproken met het 'infiltratieconsortium' [NOBIS-project 96-3-05 J. Griffioen et al., 1999].

Om de onderzoekshypothese (afbraak van benzeen onder invloed van nitraat onder anaërobe omstandigheden) in het veld vast te kunnen stellen, dienen ter plaatse van de monitoringsfilters gedurende enkele maanden zowel nitraat als benzeen aanwezig te zijn. De tijdsduur van enkele maanden is ingeschat op basis van de in het vooronderzoek vastgestelde lagfase. In tabel 3 zijn de uitgangspunten opgenomen die vooraf aan het ontwerp zijn gesteld met daarbij de consequenties voor het ontwerp.

Om het systeem te kunnen dimensioneren is een grondwatermodel opgesteld met Micro-FEM. Daarmee zijn de volgende varianten doorgerekend:

1. één infiltratieput;
2. één infiltratieput en één onttrekkingsput;
3. onttrekkingsputten in cirkelconfiguratie en één infiltratiebron in het midden;
4. infiltratieputten in cirkelconfiguratie en één onttrekkingsbron in het midden.

In alle varianten wordt een bepaald bodemvolume doorspoeld met nitraat. In dit volume zijn de monitoringsfilters geprojecteerd.

Op basis van mogelijke faalrisico's van het ontwerp (storingsgevoeligheid), het effectief doorspoe-len van een bepaald bodemvolume en de kosten, is uiteindelijk gekozen voor variant 2, maar dan in aangepaste vorm (meer infiltratiefilters). Dit om de kans op storingen te verkleinen en de monito-ringszone te vergroten.

Een tekening van het uiteindelijke ontwerp van de proef is opgenomen in bijlage B. De daarbij be-horende locatie van de monitoringsfilters is opgenomen in bijlage C. Een grafische schematisatie is opgenomen als figuur 3.

Tabel 3. Uitgangspunten die aan het ontwerp van het systeem zijn gesteld.

Uitgangspunten	Belangrijk voor:	Gerealiseerd door:
Proef uitvoeren in de kern van de verontreiniging.	Een afname van benzeen is bij hoge concentraties beter te volgen.	Actualiseren verontreinigingssituatie, bijplaatsen filters om de exacte locatie van de verontreinigingskern vast te stellen.
Zuurstofloos houden van de proef.	Toetsen onderzoekshypothese (afbraak van benzeen onder anaërobe condities).	Gesloten infiltratie- en onttrekkingsstelsel. Doorblazen werkwater tijdens en na het plaatsen van infiltratie- en onttrekkingsfilters met stikstof. Schoonpompen filters na het plaatsen. Doseervat nitraat en bromide onder stikstofdruk houden.
Voorkomen ontgassing bovengronds.	Voorkomen aanzuigen lucht of verdampen van benzeen.	Systeem continu onder druk te houden door middel van drukkleppe.
Effectief doorspoelen monitoringsgebied met nitraathoudend water.	Toetsen onderzoekshypothese.	Korte afstand van de infiltratiefilters. Proef uitvoeren op beperkt gebied.
Flexibiliteit van het systeem.	Een eventuele nieuwe applicatie van nitraat moet mogelijk zijn (dit is het geval wanneer het nitraatverbruik van de bodem hoger is dan verwacht).	Uit te gaan van een infiltratiesysteem in plaats van een éénmalige injectie van nitraatoplossing.
Mengen water met ijzer en water met sulfiden tegengaan.	Voorkomen verstopping van infiltratiefilters door neerslag van ijzersulfiden.	Gescheiden onttrekking ondiep en diep grondwater, waarbij alleen het diepe water van nitraat is voorzien en geïnfiltreerd.
Kleinschalig karakter van de proef.	Effectieve doorspoeling bodem (monitoringsgebied) in korte tijd.	Beperkte afstand infiltratiefilters tot onttrekkingsfilters (10 meter).
Voorkomen putverstopping.	Effectieve infiltratie.	Ontworpen snelheid water op overgang tussen filteromstorting en boorgatwand minder dan 1,0 m per uur.
Voorkomen adsorptie van benzeen aan monitoringsfilters.	Voorkomen van storing in resultaten monitoring.	Minifilters van HDPE toegepast welke zijn voorzien van een teflon slang.

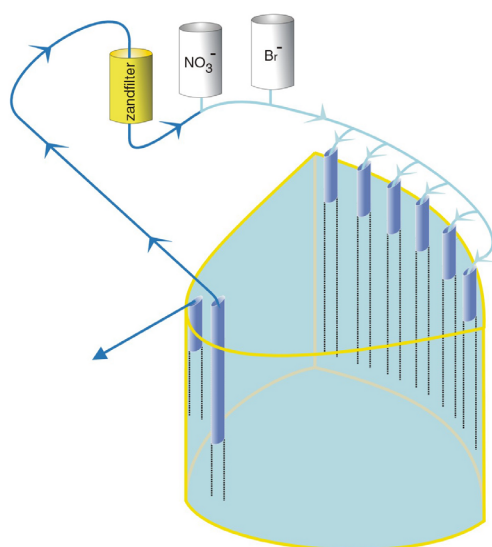


Fig. 3. Schematisatie proefopstelling.

Het voordeel van een systeem in de vorm van een 'taartpunt' is dat een redelijk groot bodemvolume effectief kan worden doorspoeld, waarbij door variaties aan te brengen in het infiltratie-debiet per filter het optreden van stagnante zones kan worden voorkomen. Bovendien kan het uitvallen van één van de infiltratiefilters deels worden opgevangen door de andere filters.

Er is gekozen voor een gesloten systeem om het toetreden van zuurstof te voorkomen. Het bemalingswater wordt daarbij over een statisch zandfilter geleid, van nitraat voorzien en weer anaëroob geïnfilterd. In principe verplaatst nitraat zich even snel door de bodem als het geïnfilterde water. Als tracer is tijdens de proef bromide toegevoegd in een concentratie van 10 mg/l.

Tijdens het NOBIS-onderzoek is het grondwater nabij het proefgebied onderzocht op de diepten 7-8 m-mv., 14-15 m -mv. en 20-21 m-mv. Uit de gegevens blijkt dat het water op 7-8 m -mv. relatief veel sulfiden bevat en weinig ijzer, terwijl dit op 14-15 m-mv. en 20-21 m -mv. juist andersom was. Het mengen van beide grondwatertypen tijdens de proef moest worden voorkomen om het risico op putverstopping door gevormde ijzersulfiden te verkleinen. Besloten is dan ook om de onttrekking op te splitsen in een ondiepe onttrekking (3-8 m -mv.) en een diepe onttrekking (10-15 m -mv.). Het water uit het diepe filter is geïnfilterd, dat van het ondiepe water geloosd op een bestaande deepwell elders op het terrein (buiten de proeflocatie).

Begin jaren negentig zijn in putten elders op de Flebo-locatie pompproeven uitgevoerd. Tijdens die proeven is een spreiding in het doorlaatvermogen van de bodem vastgesteld van 34 tot 149 m²/dag. Bij het dimensioneren van de praktijkproef is voor het bodempakket tot 25 m -mv. een gemiddelde kD-waarde van 125 m²/dag aangehouden.

Berekend is dat bij een debiet van 5 m³ per uur het nitraatfront na circa 6,7 dagen bij de onttrekkingsbron zou arriveren. Voor de duur van de infiltratie is uitgegaan van 14 dagen om daarmee de bodem effectief te doorspoelen.

Voor de infiltratiefilters is gebruik gemaakt van pulsboringen. Ten opzichte van een (goedkopere) zuigboring wordt daarmee voorkomen dat een 'smeerlaagje' op de wand van de boring ontstaat. Voor de onttrekking is dit geen probleem, waardoor de zuigboring alleen voor de beide onttrekkingsfilters is toegepast.

Een installatietekening van het ontworpen systeem is opgenomen in bijlage B. Het gehele systeem is aangestuurd door middel van een PLC. Een overzichtsfoto van het systeem is opgenomen in figuur 4.

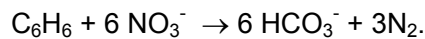


Fig. 4. Overzichtsfoto van het systeem.

Op figuur 4 is links nog net een deel van het (statische) zandfilter te zien en de container met de meet- en regeltechniek. Op de vlonders staan de drukmeters en regelbare motorgestuurde kleppen.

3.2 Nitraatdosering

Afbraak van benzeen onder de invloed van nitraat vindt plaats volgens de volgende route:



Voor het omzetten van 1 mg/l benzeen is in theorie slechts 4,8 mg/l nitraat nodig. Een groot deel van het nitraat, dat in de bodem wordt geïnfiltreerd, wordt echter verbruikt voor de oxidatie van bodemcomponenten, zoals organisch materiaal, Fe^{2+} , sulfiden en dergelijke. Hierdoor kan ingebracht nitraat snel verdwijnen uit de bodem zonder dat de bacteriën de gelegenheid hebben gehad om zich aan de nieuwe situatie aan te passen en over te gaan tot de afbraak van benzeen.

Om de consumptie van nitraat, en daarmee de in te brengen hoeveelheid te bepalen, waren uit het vooronderzoek de volgende gegevens voorhanden:

1. de resultaten van de veldkarakterisatie;
2. de resultaten van de micro-oxymax experimenten;
3. de resultaten van de batchexperimenten.

Genoemde gegevens zijn alle tijdens het NOBIS-onderzoek verzameld.

Resultaten veldkarakterisatie

Op basis van de veldkarakterisatie is vastgesteld dat de hoeveelheid organische stof in de bodem verreweg de grootste elektronendonor is. De nauwkeurigheid, waarmee kan worden geschat welk deel van de organische stof door nitraat zal worden geoxideerd, is zo gering, dat de overige elektronendonoren nauwelijks relevantie hebben.

Organische stof wordt in een volledig aëroob milieu langzaam geoxideerd. Deze oxidatie is in veel gevallen afhankelijk van pH, zuurstofgehalte, stikstofgehalte van de organische stof en ook van de 'ouderdom' van het materiaal. De oxidatie van organisch materiaal in een bouwvoor kan

worden beschreven als een eerste-orde reactie met een afbraakconstante van circa 0,02 tot 0,05 per jaar.

Het materiaal in een watervoerend pakket is aanzienlijk ouder dan in een bouwvoor en bevat vermoedelijk minder stikstof. De afbraakconstante van dit materiaal in grondwatercondities zou nog veel lager kunnen zijn. Een veilige aanname gaat uit van een afbraaksnelheid van organische stof van 1% per jaar. Op basis van deze aanname is voorgesteld om voor de laboratoriumproeven en de praktijkproef uit te gaan van een in te brengen concentratie nitraat van 200 mg/l. Achteraf is vastgesteld dat deze hoeveelheid te laag was voor de locatie waar de proef is uitgevoerd.

Resultaten van micro-oxymaxexperimenten

Het zuurstofverbruik van de grond is tijdens het vooronderzoek bepaald in micro-oxymaxexperimenten. De micro-oxymax is een instrument dat, volledig automatisch, het zuurstofverbruik en de koolzuurproductie in de tijd meet van een bodemmonster dat wordt belucht.

Op basis van de extrapolatie van meetgegevens (gemeten is gedurende een periode van 30 dagen) en een 'gemiddelde' bodemopbouw (1.850 kg/ m³, porositeit van 33%), is de totale zuurstofbehoefte van de bodem berekend op circa 1.850 mg zuurstof per liter bodem.

De molaire verhouding tussen NO₃⁻ consumptie en O₂ consumptie als elektronenacceptor in een redoxreactie is 4 staat tot 5. Een zuurstofbehoefte van 1.850 mg/l bodem (57,8 mmol) komt dus overeen met een nitraatbehoefte van 2.870 mg/l bodem (46,25 mmol).

Grote vraag is hoe de micro-oxymaxsnelheden met zuurstof (bij 25°C en geschud) zich verhouden tot de veldsnelheden (bij 10-15°C) met nitraat. Een eerste inschatting is dat de snelheden minimaal twee keer lager zijn (temperatuureffect). Daarnaast is de snelheid als gevolg van het ontbreken van het schud (meng) effect 2 tot 3 keer lager ingeschat.

Zo komen we op basis van de micro-oxymaxexperimenten tot een behoefte van circa 475 mg NO₃ per liter bodem. Bij een porositeit van 33% bedraagt de in te brengen concentratie nitraat in het grondwater derhalve 1.440 mg/l.

Resultaten batchexperimenten

Tijdens de batchexperimenten is 30 gram grond vermengd met 90 ml water. De batches zijn bij een temperatuur van 12°C geïncubeerd. Tijdens de proeven is een significante afbraak van nitraat vastgesteld (15-20 mg/l), met name in de eerste 20 dagen. De totale afbraak van nitraat bedraagt circa 30 mg/l over een periode van circa 120 dagen. Dit komt overeen met circa 3 mg per batch, ofwel 0,1 mg per gram grond. Bij een 'gemiddelde' bodemopbouw komt dit overeen met een nitraatbehoefte van 185 mg nitraat per liter bodem. Bij een porositeit van 33% bedraagt de in te brengen concentratie 560 mg/l.

Vanwege het ontbreken van het mengeffect in de veldsituatie, wordt de daadwerkelijke snelheid tenminste een factor 2 tot 3 lager ingeschat. Op deze wijze komen we tot een nitraatbehoefte van 185 tot 280 mg per liter.

Ingebrachte concentratie

Op basis van het bovenstaande is voorgesteld om tijdens de praktijkproef uit te gaan van een concentratie van 200 mg nitraat per liter grondwater. Deze concentratie sloot aan op het (maximale) gehalte dat tijdens de batchexperimenten is gebruikt en waarbij afbraak van benzeen is aangetoond.

De gebruikte concentratie nitraat van 200 mg/l is achteraf te laag gebleken (zie paragraaf 3.5). Dit komt doordat de inschatting van de nitraatconsumptie was gebaseerd op bodemmateriaal van buiten het proefgebied. De proef is echter uitgevoerd in de kern van verontreiniging waar de bodem sterker was gereduceerd. Uiteindelijk zijn 3 applicaties met nitraat toegevoegd in concentraties van 200 mg/l (1^e infiltratie), 300 mg/l (2^e infiltratie) en 500 mg/l (3^e infiltratie). Bovendien zijn de gemaakte berekeningen deels gebaseerd op aannames.

Nitraat is in de vorm van natriumnitraat toegevoegd. Dit omdat dit product zuiverder was dan calciumnitraat. Een geconcentreerde oplossing is aangemaakt in een mengvat. Vanuit dit vat is met een doseerpomp nitraat aan het bemalingswater toegevoegd. Het mengvat en de doseerpomp zijn weergegeven op figuur 5.



Fig. 5. Doseervat en doseerpomp voor de nitraatoplossing.

Naast nitraat als elektronenacceptor is bromide als tracer toegevoegd. Hiervoor is een tweede mengvat gebruikt waarin kaliumbromide is opgelost. Bromide is als concentratie van rond de 10 mg/l aan het bemalingswater toegevoegd. Dit is alleen tijdens de eerste infiltratie uitgevoerd.

3.3 Aanleg van het systeem

Aanbrengen infiltratie- en onttrekkingsfilters

Het systeem is in april 2001 aangelegd. Het opgeboorde materiaal bij aanleg van de filters is geclassificeerd op basis waarvan de boorprofielen zijn opgesteld. Deze zijn opgenomen in bijlage D. De profielbeschrijvingen zijn vergelijkbaar met het bodemprofiel op basis waarvan het systeem is gedimensioneerd. Een dwarsdoorsnede van de bodemopbouw ter plaatse van de infiltratiefilters is opgenomen als figuur 2 (zie hoofdstuk 2).

Het systeem is verder conform het ontwerp aangelegd. Gebruikt werkwater bij de aanleg van de filters is regelmatig doorgeblazen met stikstof. Ook zijn alle filters na aanleg grondig afgepompt, waarbij het water op een bestaande deepwell elders binnen het verontreinigde gebied is geloosd. Tijdens het afpompen is het vrijgekomen water doorgemeten op zuurstof, zuurgraad (pH), elektrisch geleidingsvermogen (EC) en de redoxpotentiaal. De resultaten van deze metingen zijn opgenomen in tabel 4.

Tabel 4. Resultaten controle afgepompt water.

filter	debiet [l/min]	Redox1) [mV]	Zuurstof [mg/l]	EC [μ S/cm]	pH	tijd [minuten]
IF1	25	-291	0,75	1200	6,9	58
IF2	25	-233	0,25	1600	6,9	55
IF3	25	-258	0,30	1000	6,9	40
IF4	25	-268	0,20	900	6,9	45
IF5	25	-284	0,30	1400	6,9	40
IF6	25	-189	0,10	1000	6,9	45
OF1	25	-213	0,40	1400	6,9	40
OF2	25	-324	0,30	1500	6,8	40

1) Gecorrigeerd naar de waterstofpotentiaal

Uit de resultaten blijkt, dat het opgepompte water na 45 tot 58 minuten nog steeds nagenoeg zuurstofvrij is (anaëroob).

Aanbrengen monitoringsfilters

De afstand tussen de diepe onttrekkingsfilters en de infiltratiefilters bedraagt 10 meter. In het tussenliggende gebied (monitoringszone) zijn de monitoringsfilters weggedrukt met een sondeerwagen. De locatie van de filters (lengte filters 2 m, HDPE, teflon slang) is weergegeven op een tekening bij bijlage C. De filters zijn geplaatst op 3 stroombanen op 2, 5 en 8 m afstand van de infiltratiefilters.

Er zijn filters van 2 meter gebruikt, omdat deze ruimtelijk meer representatief zijn. Verder is HDPE en teflon gebruikt om adsorptie van het benzeen te voorkomen. Buiten de infiltratiezone zijn twee filters geplaatst (M1 en M16) om eventuele verspreiding van nitraat naar buiten te volgen.

Capaciteitsproef op de infiltratiefilters

Na aanleg van het systeem is door Oranjewoud een capaciteitsproef op twee infiltratiefilters (IF1 en IF6) uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de kD-waarde ter plaatse van de filters IF1 en IF6 respectievelijk 35 m²/dag en 55 m²/dag bedraagt. Daarmee is de doorlatendheid aanmerkelijk lager dan waarmee tijdens het dimensioneren van het systeem is gerekend (kD-waarde van 125 m²/dag).

Uitgaande van de gemeten kD-waarden en de (fluctuerende) potentiaalverschillen op de locatie zou de gemiddelde stromingssnelheid van het water (poriesnelheid) circa 0,5 tot 1,5 m per jaar bedragen. Het water stroomt daarbij in noordelijke tot noordwestelijke richting.

De lagere kD-waarden worden vooral veroorzaakt door de aanwezigheid van lagen matig fijn (zwak kleilig) zand.

3.4 Vaststellen van de nulsituatie

Na de aanleg van het monitoringsnet, maar vóór de infiltratie, is de 'nulsituatie' vastgelegd (april 2001). Het water uit de minifilters (23 stuks) en beide onttrekkingen is daarbij onderzocht op nitraat, nitriet, ammonium-N, aromaten, zuurstof, elektrisch geleidingsvermogen (EC), sulfaat, sulfide en ijzer (filtreren, aanzuren en destructie). Van het water uit de onttrekking is tevens het gehalte fosfaat bepaald.

De resultaten van de nulmeting zijn opgenomen in bijlage E. In tabel 5 zijn gemiddelden en het hoogst en laagst gemeten gehalte van enkele redoxparameters weergegeven. Uit tabel 5 blijkt dat de gehalten aan benzeen tussen 11,0 en 13,0 m-mv. het hoogst zijn. Nitraat wordt in het grondwater van de 22 monitoringsfilters niet aangetroffen. In twee filters (M7 en M12) zijn spoor-

tjes nitraat aanwezig van respectievelijk 1,8 en 2,2 mg/l. In de diepwell (OF1) is 2,2 mg/l nitraat gemeten.

In tabel 5 zijn tevens de resultaten opgenomen, zoals ze voor de verschillende bodemlagen in het (NOBIS)vooronderzoek zijn vastgesteld. Vergelijking van beide resultaten laat zien dat het milieu in het proefgebied sterker gereduceerd is dan in het vooronderzoek is bepaald. De systeemkarakterisatie tijdens het NOBIS-onderzoek is uitgevoerd op filters en boringen die buiten de proeflocatie lagen (filters 101, 102 en 103).

In het proefgebied zijn de gehalten aan sulfiden uitzonderlijk hoog, met name in de filters van 11 tot 13 m –mv. Ondiep (van 5 tot 7 m –mv.) zijn de gehalten aan verontreiniging en sulfiden relatief laag. Hier wordt in het grondwater in de meeste meetpunten opgelost ijzer gevonden. In enkele ondiepe filters worden juist zeer lage ijzergehalten gevonden en hoge gehalten sulfide. Dit wijst op sterk wisselende redoxcondities op korte afstand in het profiel.

Tabel 5. Enkele redoxparameters in het grondwater van de proeflocatie en zoals gemeten in de systeemkarakterisatie van 1997.

Grondwater ¹⁾		Sulfide mg/l		Ijzer mg/l		Benzeen	
		0-situatie	syst. kar.	0-situatie	syst. kar.	0-situatie	syst. kar.
Ondiep	Gemiddeld	1,7	9,45	4,6	3,1	12,0	76,0
	Min	0,012	5,27	0,6	1,2	<0,2	1,9
	max	9,8	15,60	14,0	4,6	49,0	222,0
Middel	Gemiddeld	208	0,52	11,3	28,6	290,0	14,6
	Min	0,16	0,22	0,21	12,0	190,0	3,6
	max	700	1,08	51,00	46,0	440,0	34,0
Diep	Gemiddeld	0,07	0,11	26,0	24,0	20,0	1,75
	Min	0,02	0	21,0	20,0	14,0	0,5
	max	0,13	0,18	30,0	29,0	25,0	3,5

¹⁾ ondiep 5 – 7 m –mv, middel 11 – 13 tot 15 m – mv en diep 15 – 17 tot 22 m – mv.

De hoogste gehalten aan verontreiniging en sulfiden zijn aangetroffen op circa 11 tot 13 m -mv. In de meeste filters op deze diepte wordt (daarom) vrijwel geen ijzer gevonden. Toch wordt er ook op deze diepte in het grondwater plaatselijk juist geen sulfide, maar wel ijzer aangetroffen. Ook hier wisselen de redoxcondities sterk op korte afstand. Het is bij de uitvoering van de proef in de praktijk dan ook niet mogelijk gebleken ijzerhoudend en sulfidehoudend grondwater gescheiden te houden. Het onttrokken water bevatte daardoor, ook na het passeren van het zandfilter een zeer fijn verdeelde neerslag van hoofdzakelijk ijzersulfide. Dit ijzersulfide passeert bij bemonstering ook deels een filter van 0,45 µm.

Grondmonsters zijn in deze fase niet onderzocht. Op basis van de gehalten in het grondwater kan voorzichtig worden geconcludeerd dat het reducerend vermogen in bodem en grondwater in het proefgebied groter is dan aangetoond in het vooronderzoek.

3.5 Veldanalyses

Om het verloop van de infiltratie te kunnen volgen, zijn tijdens de infiltratie regelmatig watermonsters verzameld uit de monitoringsfilters, alsmede van het influent en effluent. Deze monsters zijn in het laboratorium van de eigenaar van de locatie (papierfabriek) onderzocht op nitraat. Voordeel hiervan was dat direct resultaat werd verkregen op basis waarvan de dosering van nitraat kon worden bijgesteld.

Voor de metingen is gebruik gemaakt van een spectrofotometer (zie figuur 6). Deze meter meet nitraat op basis van een kleurreactie.



Fig. 6. Gebruikte fotometer met cuvetten.

Voorafgaand aan de veldmetingen zijn enkele proeven gedaan met grondwater van de locatie. De kleurreactie voor nitraat is gevoelig voor tweewaardig ijzer in een hoeveelheid van meer dan 10 mg/l. De gehalten tweewaardig ijzer in het grondwater variëren van 1 tot 46 mg/l. Gezien de kleur van het water (helder tot zwart) is besloten om de monsters voor analyse met een factor 10 te verdunnen.

De nauwkeurigheid van de meting is onderzocht door duplomonsters naar een extern laboratorium te sturen. In het externe laboratorium wordt de bepaling op nitraat en nitriet ook met een spectrofotometer uitgevoerd. De resultaten van de vergelijking zijn weergegeven in figuur 7. Uit figuur 7 blijkt dat met de fotometer een betrouwbaar resultaat wordt verkregen.

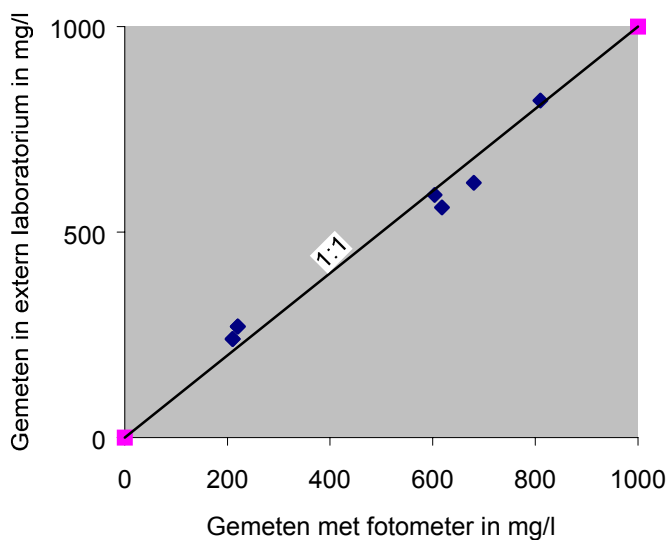


Fig. 7. Gemeten gehalten nitraat met fotometer en in extern laboratorium.

UITVOEREN VAN DE INFILTRATIE

4.1 Draaiuren van het systeem

In het ontwerp van de proef is uitgegaan van infiltratie van grondwater gedurende 14 dagen. Omdat het nitraatverbruik van de bodem op voorhand niet geheel zeker was, is er bij aanvang rekening mee gehouden dat mogelijk een tweede proef nodig zou zijn. Derhalve is in het ontwerp uitgegaan van een infiltratiesysteem en niet van een éénmalige injectie van nitraatoplossing. Uiteindelijk was de nitraatconsumptie van de bodem zodanig dat ook nog een derde infiltratieronde nodig was, waarbij hogere gehalten nitraat zijn toegevoegd. Infiltraties zijn uitgevoerd in de volgende perioden:

- Eerste infiltratie: van 24 april 2001 tot en met 8 mei 2001 met 200 mg/l;
- Tweede infiltratie: van 13 juli 2001 tot en met 31 juli 2001 met 300 mg/l;
- Derde infiltratie: van 28 november 2001 tot en met 14 december 2001 met 500 mg/l.

Tijdens de tweede infiltratie is op 15 juli 's avonds de stroom uitgevallen. Na het uitvallen van het systeem is door hevelwerking nitraatoplossing uit het mengvat in de leidingen en infiltratiefilters gestroomd. Na de storing zijn de leidingen doorgespoeld en de infiltratiefilters afgepompt, waarbij het water is afgevoerd van het proefgebied. Na het hervatten van de infiltratie op 17 juli zijn geen hoge concentraties nitraat in de monitoringsfilters gemeten. De microflora rond de monitoringsfilters is daarom niet door de hoge zoutgehalten beïnvloed. Om herhaling te voorkomen is in de doseerleiding vanaf het nitraatvat een drukklepje aangebracht.

Tijdens de overige dagen van infiltratie heeft het systeem goed gefunctioneerd. De frequentieregelaar op de deepwell maakte het mogelijk om het opgepompte debiet af te stemmen op de infiltratiecapaciteit. Vanwege de doorlatendheid van de bodem, die lager was dan vooraf aangehouden (zie paragraaf 3.3), kon minder water per tijdseenheid worden geïnfilteerd. Daarom is besloten om tijdens de infiltratie met alle 6 filters gelijktijdig te infiltreren. Dit om tijdens de afgesproken periode (14 dagen) genoeg water te infiltreren. Dit was in afwijking van het ontwerp, waarbij het de bedoeling was om slechts met 3 tot 4 filters gelijktijdig te infiltreren om daarmee stagnante zones in de bodem te voorkomen.

4.2 Controlemetingen aan het systeem

4.2.1 Gehalten nitraat, nitriet en bromide in de doseervaten

Na het aanmaken van de nitraatoplossing, zijn de gehalten nitraat en nitriet gecontroleerd. Daaruit bleek dat het gehalte nitriet in het doseervat 0,002 tot 0,006 % was van het gemeten gehalte nitraat. De oplossing in het vat was daarmee voldoende zuiver om te infiltreren. De ingebrachte concentratie nitriet in de bodem bedroeg gemiddeld 10 µg/l, waarvan geen schadelijke invloed op bacteriën is te verwachten. De nitraatoplossing is aangemaakt met leidingwater om neerslagreacties in het vat te voorkomen. Nitraatoplossing kan in hoge concentraties worden aangemaakt (de oplosbaarheid bij 20 graden Celsius is circa 900 kg/m³).

Voor het aanmaken van de bromide-oplossing is kaliumbromide opgelost in leidingwater. De oplosbaarheid van kaliumbromide bij 20 graden Celsius bedraagt circa 678 kg/m³. Uit analyse van de oplossing is de concentratie opgelost bromide vastgesteld op basis waarvan de dosering is ingesteld.

4.2.2 Gehalten benzeen in opgepompt water

Tijdens de proef is gecontroleerd in hoeverre de gehalten aan vluchtige aromaten aanwezig bleven in het opgepompte water. Dit om vast te stellen of mogelijk afbraak plaatsvond in het bovengrondse systeem (bijvoorbeeld in het zandfilter). Bemonsterd zijn het opgepompte water (monsterpunt MP1; zie bijlage B) en het water vlak voordat het in de bodem werd geïnfiltrerd (monsterpunt MP2). De resultaten zijn opgenomen in tabel 6.

Tabel 6. Gemeten gehalten aromaten in opgepompt en geïnfiltrerd water.

Stof	Gemeten gehalten in µg/l					
	27 april 2001		7 december 2001		13 december 2001	
	MP1	MP2	MP1	MP2	MP1	MP2
Benzeen	160	160	110	92	86	100
Tolueen	11	11	8,1	6,9	66	65
Ethylbenzeen	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 8 ¹	< 0,2
Xylenen	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 20 ¹	< 0,5

1) Detectiegrens is verhoogd vanwege de noodzakelijke verdunning.

Uit tabel 6 blijkt dat de gehalten aan aromaten in het opgepompte water vergelijkbaar zijn met de gehalten voorafgaand aan de infiltratie. Afbraak van aromaten in het bovengrondse systeem heeft dan ook niet aantoonbaar plaatsgevonden. Gezien de korte verblijftijd in het systeem (10 uur) werd dit op voorhand overigens ook niet verwacht.

4.2.3 Geïnfiltreerde debieten

Het ontwerp van de praktijkproef was doorgerekend op een te infiltreren debiet van 5 m³/uur. Daarbij zou de stijghoogte in de infiltratiefilters met circa 0,35 m toenemen.

Bij aanvang van de proef bleek dat de berekende debieten niet geïnfiltrerd konden worden. Dit hangt samen met de doorlatendheid van de bodem die ter plaatse van de proeflocatie lager is dan op voorhand aangehouden. Uit de capaciteitsproef (zie paragraaf 3.3) blijkt dat de kD-waarde circa 35 tot 55 m²/dag bedraagt. In het ontwerp werd nog uitgegaan van een kD-waarde van 125 m²/dag.

Om binnen circa 14 dagen toch voldoende water in de bodem in te brengen, zijn de debieten ingesteld op basis van de stijghoogte in de infiltratiefilters (maximaal rond maaiveldniveau). De stijghoogte werd daarbij met maximaal circa 1,8 meter verhoogd.

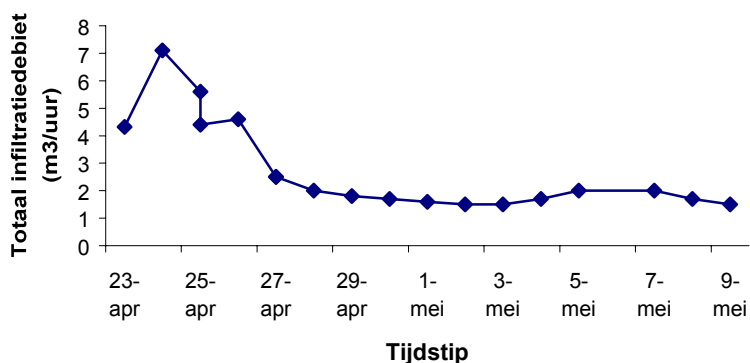


Fig. 8. Verloop in debiet tijdens de eerste infiltratie.

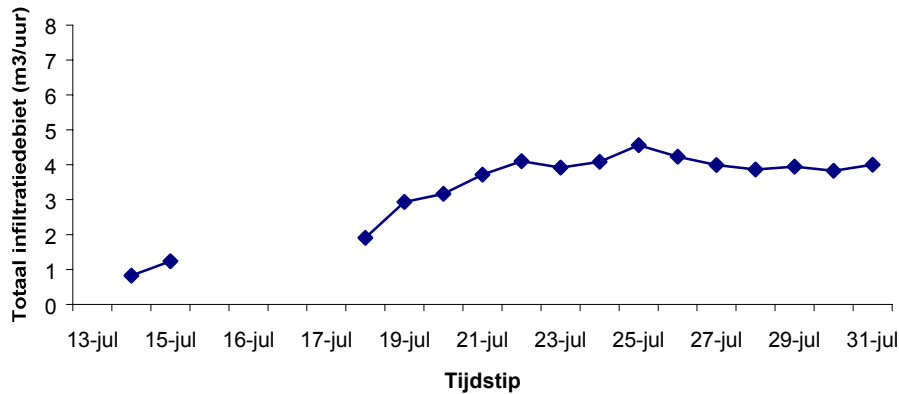


Fig. 9. Verloop in debiet tijdens de tweede infiltratie met storing op 15 juli.

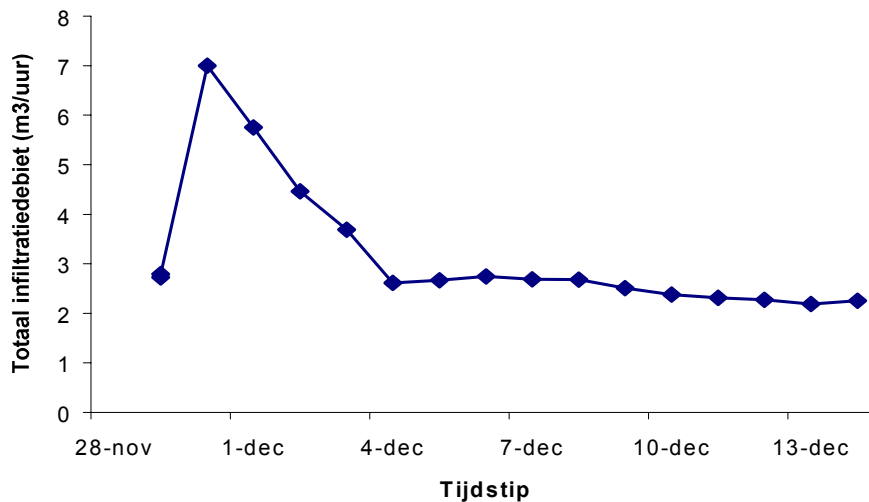


Fig. 10. Verloop in debiet tijdens de derde infiltratie.

Uit bovenstaande figuren blijkt dat het berekende infiltratiedebiet ($5 \text{ m}^3/\text{uur}$) tijdens geen van de proeven gehaald is. Na enkele dagen infiltreren is vrij snel een stationair debiet ingesteld. Wijzigingen in het debiet hadden overigens direct effect op de stijghoogte in de filters.

Tijdens de eerste en derde proef kon bij aanvang van de infiltratie relatief veel water worden geïnfiltreerd. Het maximale debiet nam echter snel af tot een min of meer stationair niveau van rond de respectievelijk $1,5$ en $2,5 \text{ m}^3/\text{uur}$. Tijdens de tweede proef is gestart met een laag debiet dat geleidelijk is opgevoerd naar een min of meer stationair niveau van circa $4 \text{ m}^3/\text{uur}$.

4.2.4 Zwevende stof in het bemalingswater

Tijdens de infiltratie zijn, in aanvulling op het programma, tweemaal de gehalten zwevende stof in het opgepompte water (MP1) en het geïnfiltreerde water gecontroleerd. De resultaten zijn opgenomen in tabel 7.

Tabel 7. Resultaten gehalten zwevende stof in opgepompt (MP1) en geïnfiltreerd water (MP2).

Periode	Tijdstip	Gemeten gehalten zwevende stof in mg/l	
		Opgepompt water (MP1)	Geïnfiltreerd water (MP2)
Eerste infiltratie	1 week na start	18	22
Derde infiltratie	2 weken na start	5,2	3,5

Hoewel het aantal waarnemingen zeer beperkt is, blijkt dat het zandfilter één week na de start van de infiltratie nog niet of nauwelijks zwevende stof afving. Dit blijkt ook uit het drukverschil over het zandfilter dat pas na 1,5 week begon op te lopen van circa 0,25 bar naar 0,5 bar.

Van de tweede infiltratie zijn geen resultaten op zwevende stof beschikbaar. Tijdens die infiltratie nam de druk over het zandfilter sterk toe (van 0,1 tot 2 bar). Op dat moment was het zandfilter waarschijnlijk zodanig ontwikkeld dat zwevende stof (ijzersulfide) effectief werd afgevangen. Voorafgaand aan de derde proef is het filter schoongemaakt. De zwevende stof bleek zich daarbij boven in het filter te hebben afgezet. Op basis van de analyseresultaten tijdens de derde proef kan voorzichtig worden gesteld dat het zandfilter heeft gefunctioneerd, alhoewel een drukverschil over het filter niet waarneembaar was.

Tijdens de proef bleek dat het opgepompte water zwart van kleur was, zoals weergegeven op figuur 11.

De aard van de zwevende stof is onderzocht door NITG-TNO. Watermonsters zijn daartoe gefilterd over twee verschillende filters; eerst een glaswol-filter en vervolgens een 0,45 micron hemicellulose-filter. Beide filters zijn gedroogd bij 40 graden Celsius en bestudeerd m.b.v. een SEM-Microprobe. Met een SEM-Microprobe kan op micron-schaal gekeken worden hoe het op het filter achtergebleven materiaal er uit ziet en kan de chemische samenstelling van afzonderlijke deeltjes semi-kwantitatief worden bepaald.

Het afgefilterde materiaal van Flebo-monsters bleek vooral te bestaan uit sulfides, in de eerste plaats pyriet (FeS_2) en/of ijzermonosulfides (FeS), maar daarnaast ook aanzienlijke hoeveelheden sphaleriet (ZnS), chalcopyriet (CuFeS_2) en een sulfide van Zn, Cu, Fe en Ni. Er is geen organisch materiaal waargenomen. Naast de sulfiden werd sporadisch een kleiplaatje of mica aangetroffen, organisch materiaal werd niet gevonden.

Het 0,45-micron hemicellulose-filter was te fijn om een SEM-Microprobe-analyse te doen. Het materiaal op dit filter bestond vooral uit kleimineralen en mogelijk kalk.

Vastgesteld is dat het zwarte zwevende materiaal in dit water voor een zeer groot deel bestaat uit (mono-)sulfides. Tijdens het vaststellen van de nulsituatie op de proeflocatie is al vastgesteld dat de redoxcondities sterk wisselen op korte afstand. Het is bij de uitvoering van de proef dan ook niet mogelijk gebleken ijzerhoudend en sulfidehoudend grondwater gescheiden te onttrekken.



Fig. 11. Opgepompt water op de proeflocatie.

4.2.5 *Verloop van de gehalten nitraat in de bodem*

Tijdens de eerste infiltratie in april / mei 2001 zijn alle geplaatste minifilters vrijwel elke dag bemonsterd om het gehalte nitraat in het grondwater vast te kunnen stellen. De analyses zijn uitgevoerd op de locatie met een fotometer (zie paragraaf 3.5). De resultaten zijn opgenomen in bijlage F.

Tijdens de eerste infiltratie is aangestuurd op een concentratie nitraat van 200 mg/l in de bodem. Uit bijlage F blijkt dat met name in de eerste dagen een hoog gehalte in de bodem is ingebracht (zie MP2). Dit hangt samen met de sterke terugloop van het infiltratiedebiet, waarbij de doseerpomp voor nitraat steeds handmatig moest worden bijgesteld. Met het constant worden van het infiltratiedebiet kon de dosering ook beter worden ingeregeld. Nadat in voldoende minifilters een concentratie nitraat van circa 200 mg/l werd aangetroffen, is de infiltratie beëindigd.

Aangezien na circa 2 maanden vrijwel alle nitraat in de bodem was omgezet, is in juli 2001 opnieuw geïnfiltreerd. Daarbij is een richtconcentratie van 300 mg/l aangehouden. De analyses zijn door een extern laboratorium uitgevoerd. Na de tweede infiltratie bleek dat het nitraat minder snel werd omgezet; na circa 3 maanden was het echter grotendeels uit de bodem verdwenen. Op basis van het vooronderzoek werd rekening gehouden met een lagfase. Aangezien verwacht werd dat nog nitraattekort in de bodem aanwezig was geweest om de afbraak van benzeen door geïnfiltreerde bacteriën op gang te brengen en benzeen nog niet was afgebroken, is besloten tot een derde infiltratie. Een inschatting van de toe te dienen concentratie nitraat is gemaakt aan de hand van de gemeten snelheid van omzetting in de bodem na de eerste twee infiltraties. Besloten is om een concentratie van 500 mg/l nitraat te infiltreren.

Op basis van het verloop van de gemeten gehalten nitraat in het grondwater (zie bijlage F) kan worden vastgesteld dat met name de minifilters nabij de infiltratiebronnen en de minifilters met het filter van 15-17 m –mv. goed zijn doorspoeld met nitraat. De bodem is op 15-17 m –mv. ook beter doorlatend dan op circa 9 tot 12 m –mv. (zie paragraaf 2.3). Filters die tijdens de laatste infiltratie goed zijn doorspoeld met nitraat zijn die filters M2, M3, M9, M10, M21 en in mindere mate (lagere gehalten) M7, M11, M13 en M23.

4.2.6 *Verloop van de gehalten bromide in de bodem*

Bromide is alleen tijdens de eerste infiltratie als tracer toegevoegd aan het te infiltreren grondwater. De gemeten gehalten staan in bijlage G. Wanneer de gemeten gehalten bromide in de filters worden vergeleken met de gemeten gehalten nitraat valt op dat tussen beide een relatie aanwezig is. Filters waarin veel bromide wordt aangetoond bevatten ook veel nitraat. Het omgekeerde is ook het geval. Een kwantitatieve relatie is echter minder goed aan te tonen. Dit komt doordat de ingebrachte gehalten nitraat tijdens de infiltratie niet constant zijn geweest.

4.3 **Evaluatie van de infiltratie en aandachtspunten**

In de voorbereiding van de proef is veel aandacht besteed aan het ontwerp van het infiltratiesysteem. Het systeem heeft naar tevredenheid gefunctioneerd. Er kon echter per tijdseenheid minder water worden geïnfiltreerd dan vooraf was berekend. Dit houdt verband met de lagere doorlatendheid van de bodem in het proefgebied dan elders op het terrein gemeten.

De frequentieregelaar op de deepwell maakte het mogelijk om het onttrekkingsdebiet af te stemmen op de infiltratiecapaciteit van de filters. Voor toekomstige proeven verdient het aanbeveling om een directe koppeling te maken tussen de nitraatgift en het infiltratiedebiet. Bij het ontwerp dient verder ook rekening te worden gehouden met de gevolgen van bijvoorbeeld een stroomstoring op het systeem.

Voor toekomstige situaties dient gelet te worden op de opbouw van het zandfilter in relatie tot de verwachte korrelgrootte van de zwevende delen. Daarnaast dient de veldkarakterisatie specifiek te worden uitgevoerd op de beoogde proeflocatie. Hierdoor kan de nitraatconsumptie van iedere bodemlaag afzonderlijk beter worden ingeschat. Bovendien kan de locatie van de onttrekkingsfilters beter bepaald worden, waarmee de kans op het mengen van water uit verschillende bodemlagen kleiner is (en daardoor het vormen van bijvoorbeeld ijzersulfiden).

Door het volgen van de gehalten nitraat in de monitoringsfilters kan een goed beeld worden verkregen van de verspreiding in de bodem. Het volgen van de gehalten bromide had voor deze proef weinig meerwaarde. Door regelmatig analyses uit te voeren op het gehalte zwevende stof in het bemalingswater wordt inzicht verkregen in de werking van het zandfilter.

RESULTATEN MONITORING IN HET VELD

5.1 Werkwijze

Nadat de infiltratie van nitraathoudend grondwater binnen het proefgebied was beëindigd, is na enkele dagen de eerste monitoringsronde uitgevoerd. Uit controlemetingen bleek dat de grondwaterstand zich binnen deze tijd weer op het oude niveau had ingesteld.

Voor elke monitoringsronde zijn twaalf minifilters geselecteerd op basis van de gehalten nitraat die tijdens de infiltratie in de filters zijn gemeten. Daarbij zijn zowel filters gekozen met hoge als met lage concentraties benzeen. Filter M1 ligt buiten het infiltratiegebied en is tijdens de monitoring als referentie aangehouden. Verder is het water uit de deepwell (OF1) steeds bemonsterd.

Voorafgaand aan de bemonstering zijn de filters grondig afgepompt. Daarbij is steeds minimaal 3 maal de inhoud van de filters afgepompt. Het water uit de filters is onderzocht op aromaten, nitraat en nitriet. Bij het bemonsteren zijn tevens het elektrisch geleidingsvermogen (EC), de zuurgraad (pH), het zuurstofgehalte en de redoxpotentiaal gemeten. Het water uit 4 geselecteerde filters (M10, M12, M14 en OF1) is tevens onderzocht op sulfaat, sulfide, ijzer en ammonium-N. Deze filters liggen langs één stromingsbaan op een diepte van 11-13 m –mv. Periodiek zijn enkele filters onderzocht op DOC (Opgeloste organische koolstof) en CZV (chemisch zuurstofverbruik). Dit laatste om inzicht te krijgen in de reducerende capaciteit van het grondwater. De analyses op aromaten zijn binnen 24 uur uitgevoerd.

Tijdens de monitoringsfase is niet gekeken naar gevormde intermediären. Middels laboratoriumexperimenten zijn slechts een paar verbindingen aangetoond die vanuit benzeen kunnen worden gevormd. Dit zijn onder andere fenol, catechol en benzoaat [Vogel et al., 1986]. In het veld zijn deze verbindingen wel waarneembaar, maar de verbindingen zijn niet specifiek: tijdens de (anaërobe) omzetting van meerdere aromaten (zoals toluen) kunnen ze gevormd worden [Baten et al., 1997].

5.2 Verloop van de gehalten nitraat en aromaten in de bodem

Aan het eind van elke infiltratieperiode zijn in een aantal filters nitraat en vluchtige aromaten (waaronder benzeen) gemeten. Een aantal van deze filters is geselecteerd voor opname in het monitoringsprogramma. Het resultaat van het verloop van de gemeten concentraties in het grondwater is grafisch weergegeven in bijlage H. In vrijwel alle filters zijn er fluctuaties in de gemeten gehalten. Dit komt deels door de geringe grondwaterstroming en is deels het gevolg van verschillen in concentraties op korte afstand.

Periode 1

Na de eerste periode van onttrekking en infiltratie in april 2001 is een snelle afname van de gehalten nitraat in de bodem vastgesteld. In twee maanden tijd was het nitraat in alle waarnemingsfilters vrijwel helemaal verbruikt voor de oxidatie van ijzer, sulfiden en organisch materiaal. Een voorbeeld is opgenomen in figuur 12 (filter M9). Een duidelijke afname van de gehalten aan benzeen is daarbij niet geconstateerd. In enkele filters is toluen aanwezig. Ethylbenzeen en xylene worden gedurende de monitoring niet aangetroffen.

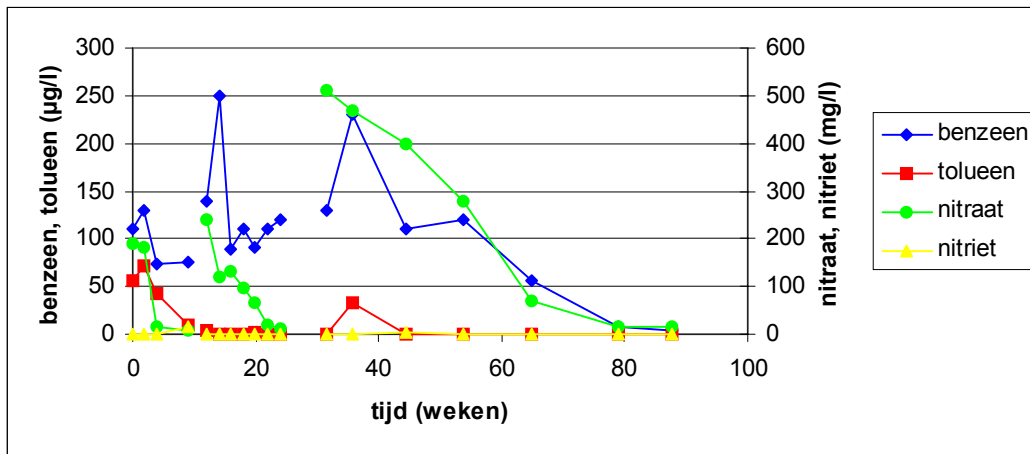


Fig. 12. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en toluen in filter M9.

Periode 2

Na de tweede onttrekkings- en infiltratieperiode wordt een vergelijkbaar beeld verkregen. De snelheid van nitraatverbruik is in deze periode iets geringer, want nitraat blijft langer in het grondwater aanwezig. Toluene, dat in een aantal filters naast benzeen in lagere gehalten aanwezig is, wordt afgebroken. De afbraak van toluene met nitraat als elektronenacceptor is bekend, bijvoorbeeld in de pluim van stortplaatsen.

Tijdens de eerste twee perioden is de afbraak van benzeen niet aangetoond, zodat besloten is tot een volgende infiltratie. Ook was de totale tijd, waarin nitraat in de bodem aanwezig was geweest, ten opzichte van de lagfase uit het laboratoriumonderzoek nog beperkt.

Periode 3

Op basis van het nitraatverbruik na de eerst 2 infiltratieronden, is de toe te passen concentratie nitraat aangepast. Het verbruik van nitraat na de eerste en de tweede infiltratie is daartoe geëxtrapoleerd (nulde- en eerste-orde reactie). Op basis van de extrapolaties is de in te brengen concentratie nitraat verhoogd tot 500 mg/l nitraat. De verwachte hoeveelheid nitriet zou daarbij niet te hoog worden.

Ook na de derde infiltratie met hogere nitraatconcentraties zijn er nog enkele filters, waarin het aanbod van reductoren zo groot is, dat nitraat hier nog steeds snel wordt verbruikt (bijvoorbeeld M11 en M13; zie figuur 13). In deze filters is nauwelijks nitraat aangetroffen, of is nitraat na enkele dagen al verbruikt. In de andere filters wordt wel nitraat aangetroffen.

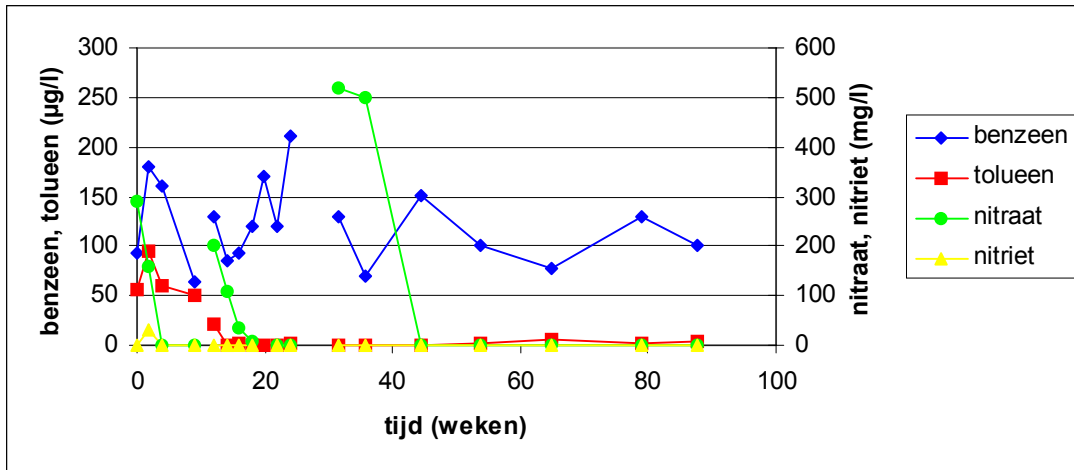


Fig. 13. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en tolueen in filter M13.

In de filters waar na de derde infiltratie langdurig nitraat aanwezig is verdwijnt benzeen volledig (M02; zie figuur 14, M09; zie figuur 12 en M21). Bij M9 volgen de benzeen- en nitraatconcentraties een gelijke trend, wat op verdunning zou kunnen wijzen. Bij de andere filters (M2 en M21) is dit niet het geval, zodat hier duidelijk de afbraak van benzeen uit volgt.

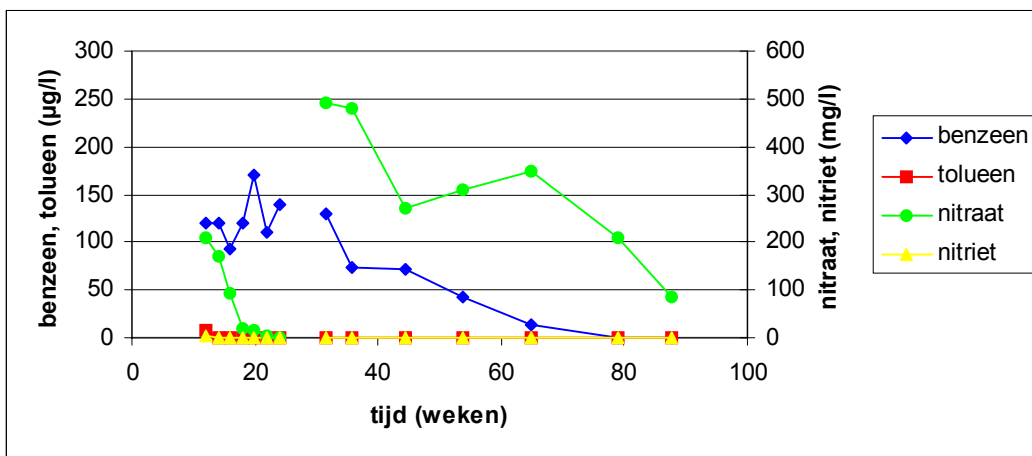


Fig. 14. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en tolueen in filter M2

In de filters M3 en M10 daalt de benzeenconcentratie ook (zie figuur 15). Het nitraatverbruik is echter groot, zodat het nitraat al is verbruikt, vóórdat al het benzeen is afgebroken. In deze filters vindt dan ook geen verdere afbraak van benzeen plaats.

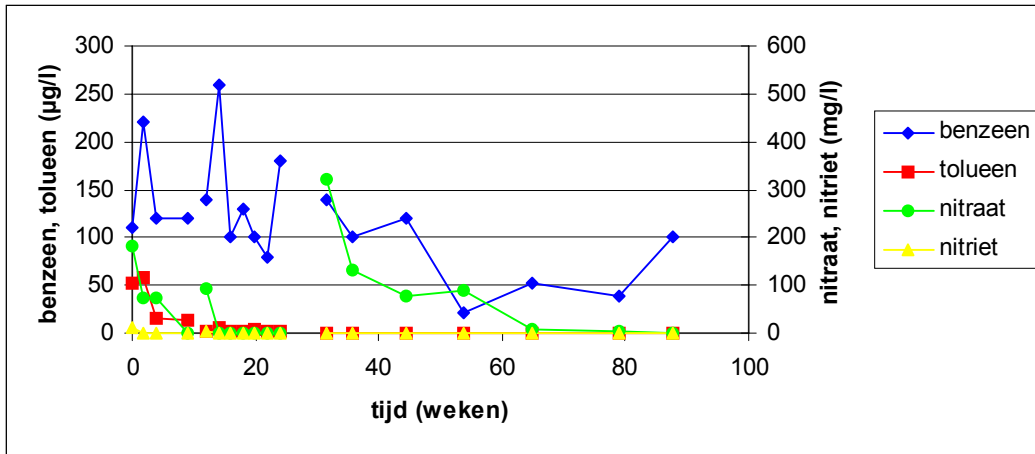


Fig. 15. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en tolueen in filter M10.

Ook in diepwell (OF1; zie figuur 16) is langdurig nitraat aanwezig. Er is sprake van een geleidelijke afname van benzeengehalten in deze diepwell. Mogelijk doordat het water uit een groter gebied hier gemengd is zijn de variaties in gehalten geringer dan in andere filters. Tijdens de laatste monitoringsronde van 13 januari 2003 is, bij afwezigheid van nitraat, weer een toename van het gehalte benzeen gemeten. Dit zou het gevolg kunnen zijn van nalevering of aanvoer van verontreinigd water.

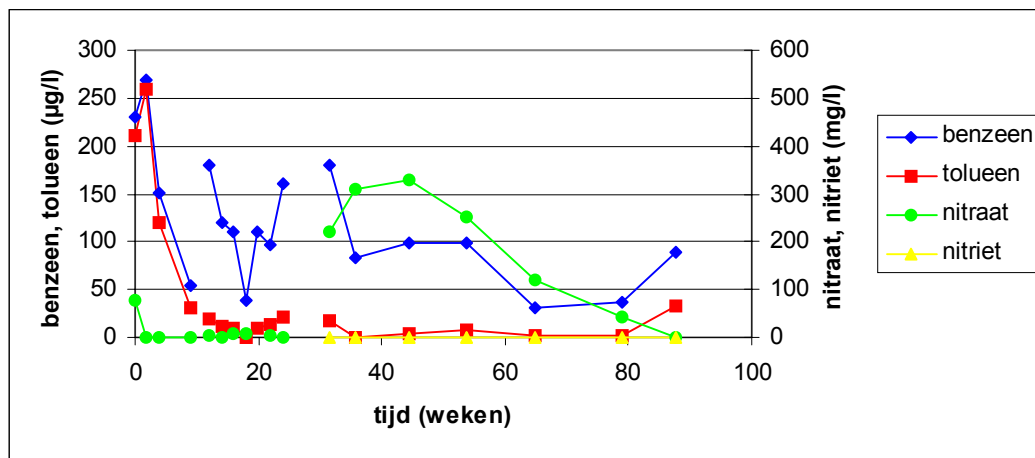


Fig. 16. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en tolueen in diepwell OF1.

In gedeelten van de bodem waar weinig nitraat kon worden aangebracht vanwege de plaatselijk minder goed doorlatende bodem (filters M12, M13, M14 en M22) en op plaatsen waar geen nitraat is aangebracht (referentiefilter M1; zie figuur 17) blijven hoge gehalten benzeen aanwezig. De daling in de filters M11 en M23 is onwaarschijnlijk snel. Mogelijk spelen verdunningseffecten hierbij een rol. Dit omdat naast nitraat ook het gehalte benzeen daalt.

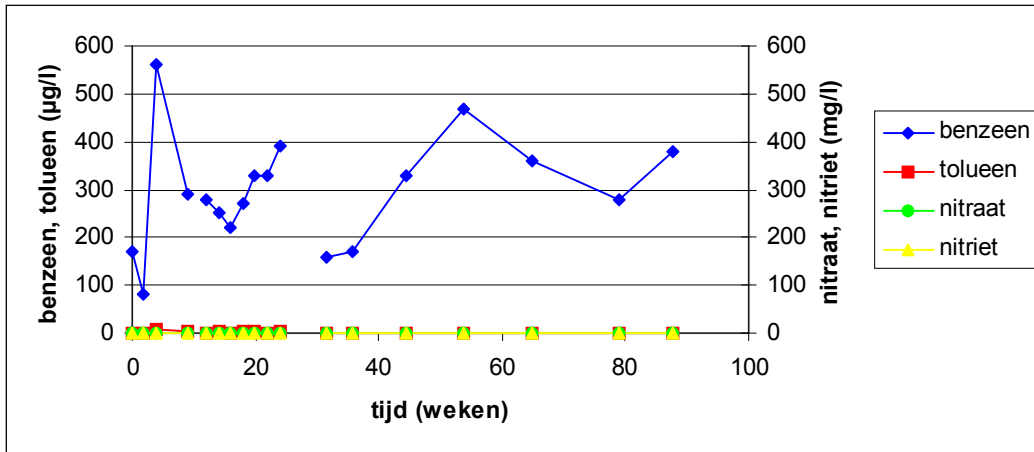


Fig. 17. Verloop van de gehalten nitraat, nitriet, benzeen en tolueen in referentiefilter M1.

De afbraak van benzeen, zoals gemeten in de minifilters, komt ongeveer na circa 40 weken op gang. Enerzijds is er sprake van een zekere adaptatie van de microbiële populatie in de bodem. Voordat begonnen werd met de infiltratie was er sprake van gereduceerde condities, terwijl na infiltratie met nitraat minder gereduceerde condities in de bodem zijn aangelegd. In laboratoriumonderzoek met materiaal van de locatie was er een lagfase van 25 tot 75 dagen. Adaptatie van bacteriën aan de nitraatreducerende condities treedt voornamelijk op in aanwezigheid van nitraat. Door het verbruik van nitraat waren er tijdens het onderzoek ook perioden dat er nauwelijks nitraat aanwezig was. In de praktijksituatie is de adaptatieperiode derhalve misschien niet zo heel veel langer dan in het laboratorium.

Naast de adaptatie aan nitraat is er ook concurrentie van allerlei bacteriën om het aanwezige nitraat. Nitraat wordt verbruikt als elektronenacceptor, waarbij allerlei andere verbindingen als elektronendonor c.q. als koolstofbron worden gebruikt. Hierbij zullen gemakkelijk afbreekbare verbindingen eerst worden gebruikt en omgezet, voordat een minder makkelijk afbreekbare verbinding als benzeen zal worden omgezet.

Deze substraatpreferentie en de adaptatieperiode (lagfase) hebben samen tot gevolg dat nitraat eerst voor de oxidatie van andere verbindingen wordt gebruikt, voordat de afbraak van benzeen goed op gang komt.

De afbraak kan worden beschreven als een lineaire afname, maar ook als een eerste-orde reactie. De eerste-orde reactie heeft een afbraakconstante van 0,003 (OF1), 0,004 (M10) tot 0,0075 d⁻¹ (M09). Deze afbraakconstanten zijn van een vergelijkbare orde grootte, zoals beschreven voor veld- en laboratoriumexperimenten in de literatuur [Suarez et al., 1999]. Overigens zijn in het NOBIS-vooronderzoek in het laboratorium eerste-orde afbraaksnelheden gemeten van 0,0024 d⁻¹ tot 0,0195 d⁻¹.

5.3 Redoxcondities in de bodem

De introductie van nitraat in het watervoerend pakket heeft in principe diverse redoxreacties tot gevolg. In de bodem aanwezige organische verbindingen, verontreinigingen, sulfiden en tweewaardig ijzer worden biogeochemisch geoxideerd. Om deze processen enigszins te kunnen volgen is tijdens en na de infiltraties van nitraathoudend grondwater een aantal redoxparameters gevolgd.

Het aanbrengen en het verbruik van nitraat kan in principe invloed hebben op de geleidbaarheid. In principe zijn er, als er biogeochemische reacties met nitraat optreden, ook effecten op de

zuurgraad. Het blijkt dat op de locatie Flebo de effecten van het aanbrengen van nitraat en de daaropvolgende biogeochemische reacties op pH en geleidbaarheid niet duidelijk meetbaar zijn.

De redoxpotentiaal, zoals die tijdens de bemonsteringen is gemeten, heeft een grote spreiding, die vooral tijdens en kort na infiltratie van nitraathoudend grondwater groot is. Na het stoppen van de infiltratie wordt de situatie stabiel. Tijdens de onttrekking en infiltratie treedt een sterke grondwaterstroming op. Eerst wordt het water rond het filter vervangen door water van buiten, daarna komt er nitraathoudend water het filter binnen. Naast nitraat is in het geïnfilterde water vers gevormd ijzersulfide aanwezig. Eén en ander heeft snel fluctuerende redoxcondities tot gevolg. Bij een stijgend nitraatgehalte is in enkele dagen ook een stijgende redoxpotentiaal waarneembaar. Naarmate het nitraat wordt verbruikt voor verschillende oxidatiereacties kan de redoxpotentiaal na een aanvankelijke stijging ook weer langzaam dalen. Een voorbeeld van het verloop van de redoxpotentiaal en nitraat in de filters M02, M03 en M09 is opgenomen in bijlage I). In de filters, waarin niet of nauwelijks nitraat verschijnt blijft de redoxpotentiaal op hetzelfde lage niveau als tijdens de nulsituatie.

De redoxtoestand van het grondwater in het proefgebied is nader gekarakteriseerd op basis van de metingen op Fe, SO_4 , H_2S , NH_4^+ en DOC, die zijn uitgevoerd voor een aantal filters tijdens de infiltratieproeven. De metingen zijn verricht langs een raai aan de filters M10, M12, M14, die allemaal op 11-13 m -mv liggen en OF1, de deepwell.

In het eerste filter dicht bij een infiltratiepunt (M10) is sulfide zeer dynamisch; het verschijnt en verdwijnt snel, terwijl, in tegenfase, ijzer verdwijnt en verschijnt. Mogelijk heeft één en ander te maken met het inbrengen van vers, fijnverdeeld ijzersulfide. Door oxidatie van het sulfide komt tweewaardig ijzer vrij; het gehalte ijzer daalt vervolgens naar een constant niveau van enkele milligrammen per liter. Sulfide is al kort na infiltratie afwezig en het sulfaatgehalte stijgt. Het milieu in M10 kan daarom worden beschreven als ijzer reducerend. In dit filter wordt waarschijnlijk benzeen afgebroken. De gehalten dalen na de laatste infiltratie in december 2001 van 140 $\mu\text{g/l}$ tot een concentratie van 38 $\mu\text{g/l}$ in november 2002. Het nitraat is dan inmiddels verbruikt.

In alle drie de filters, waarin het sulfidegehalte is gevolgd, vertoont het een dalende tendens, waarschijnlijk door oxidatie, maar mogelijk ook door grondwaterstroming. In de filters M12 en M14 daalt het sulfaatgehalte met het sulfidegehalte, maar enig sulfide blijft steeds aanwezig. IJzer wordt niet aangetroffen, het is kennelijk als sulfide vastgelegd. Mogelijk is het reactieproduct van oxidatie van sulfide in deze situatie niet sulfaat, maar deels vrij zwavel of een gedeeltelijk geoxideerde zwavelverbinding. Het milieu in deze filters blijft sulfaatreducerend en het gehalte benzeen blijft op een relatief hoog niveau van circa 250 $\mu\text{g/l}$.

In de deepwell zijn aanvankelijk zeer hoge sulfaat- en sulfidegehalten aanwezig, 1700 en 840 mg/l . Door de onttrekking dalen deze gehalten tot circa 500 en 250 mg/l . Na de tweede periode van onttrekking en infiltratie daalt het sulfidegehalte tot enkele tienden van milligrammen. Het gehalte sulfaat blijft van dezelfde orde van grootte en stijgt iets na de derde periode van onttrekking en infiltratie. IJzer is steeds in circa 1 mg/l aanwezig. Nitraat wordt aangetroffen kort na de eerste en tweede onttrekking en infiltratie. Na de derde onttrekkingsperiode blijft er nitraat in de deepwell aanwezig. Er worden zuurstofgehalten gemeten van enkele tienden van milligrammen per liter, na oktober zijn iets hogere gehalten gemeten, maximaal 1,7 mg/l . De redoxpotentiaal stijgt gestaag over de gehele periode van onderzoek.

In de deepwell nemen de benzeengehalten langzaam af, met name na de derde infiltratie. In de deepwell is er nauwelijks adaptatie of substraatpreferentie. Mogelijk is de afbraak hier onder invloed van enig zuurstof begonnen en kon deze vervolgens met sulfaat als electronacceptor

gaande worden gehouden, een afbraakroute die ook in het vooronderzoek in het laboratorium is gevonden.

Na de laatste periode van onttrekking en infiltratie zijn in een aantal filters ook DOC en CZV gemeten. In deze gehalten is geen trend waargenomen. Voor DOC worden gehalten aangetroffen van circa 70 tot 320 à 1.700 mg/l. Van het CZV worden gehalten gevonden van circa 230 tot 1.200 à 1.700 mg/l; hoge gehalten in vergelijking met de hoeveelheden toegevoegd nitraat. In de filters waar hoge gehalten van deze parameters worden gevonden wordt nitraat snel verbruikt. In de filters M03, M10 en M21, waar langduriger nitraat aanwezig is en waar een zekere mate van afbraak van benzeen optreedt, bedraagt het CZV 224 tot 360 mg/l. Beide parameters kunnen mogelijk zowel positief als negatief worden beïnvloed door bacteriegroei.

5.4 Evaluatie van de monitoringsresultaten

Op basis van het bovenstaande zijn de volgende conclusies en ervaringen geformuleerd:

- De biologische afbraak van benzeen onder nitraatreducerende omstandigheden is in de praktijkproef op de Flebo-locatie aangetoond. In de filters, waar na de derde infiltratie langdurig nitraat aanwezig is, verdwijnt benzeen geheel. Bij afwezigheid van nitraat treedt geen afbraak van benzeen op. In aanwezigheid van sulfiden komt de afbraak van benzeen niet duidelijk waarneembaar op gang.
- De afbraak kan worden beschreven als een lineaire afname, maar ook als een eerste-orde reactie. De eerste-orde reactie heeft een afbraakconstante van 0,003 (diepwell) à 0,004 (M10) tot 0,0075 d⁻¹ (M09). Daarmee is deze snelheid vergelijkbaar met hetgeen in de literatuur voor veld- en laboratoriumexperimenten wordt vermeld.
- De redoxtoestand op het terrein verschilt aanmerkelijk, ook binnen betrekkelijk korte afstanden van 5 tot 10 meter. De metingen van de nulsituatie verschillen aanzienlijk van de metingen, zoals ze in 1997 tijdens het NOBIS-onderzoek in peilbuizen buiten het proefgebied zijn vastgesteld. Achteraf hadden de resultaten van de nulmetingen aanleiding kunnen zijn om de vastgestelde nitraatgift hoger in te stellen. In de nulsituatie zijn echter alleen parameters in het grondwater onderzocht. Een volledig beeld van de redoxsituatie in de grond binnen het proefgebied was niet voorhanden, zodat besloten is om de vooraf vastgestelde concentratie nitraat van 200 mg/l te handhaven.
- Voor andere locaties geldt dat van lokale verschillen in redoxtoestand en de variatie in bodemopbouw en doorlatendheid op een terrein een indruk moet worden verkregen. Op basis daarvan kan de infiltratie worden ontworpen en de nitraatdosering worden bepaald. Het nitraatverbruik van de bodem kan het best in beeld worden gebracht aan de hand van de gehalten organische stof, sulfiden, tweewaardig ijzer en verontreinigingen, zowel in grond als in grondwater. Op basis van informatie uit bodemonderzoek kan hiervan wel al een indruk worden verkregen. Enige overdimensionering van de nitraatgift kan plaatsvinden wanneer de bodem nitraat verbruikt bij het omzetten van bodemeigen stoffen.
- Bij het vaststellen van de nitraatgift zal rekening moeten worden gehouden met de mogelijkheid van het ontstaan van nitriet. Nitriet werkt remmend op de groei van bacteriën. Globaal kan gesteld worden dat het gehalte nitriet in de bodem lager moet zijn dan 10 mg/l.
- In praktijksituaties, waarbij de haalbaarheid van afbraak van aromaten met nitraat is aangetoond, kan voor wat het monitoren betreft worden volstaan met de gehalten verontreiniging, nitraat en de redoxpotentiaal. Tegelijk met de meting van de redoxpotentiaal kunnen ook het elektrisch geleidingsvermogen en de zuurgraad worden gemeten.
- De afbraaksnelheid, zoals die hier is gemeten, komt overeen met een halfwaardetijd van 80 tot 200 dagen. Dit betekent dat een monitoringsfrequentie van eens per twee maanden ruim voldoende is. Op plaatsen, waar het nitraatverbruik hoog blijkt te zijn, moet worden bijgestuurd met extra nitraatdosering of door het incidenteel toedienen van zuurstof (de meeste nitraatreduceerders zijn zuurstoftolerant). Bij het toedienen van zuurstof bestaat er echter een grotere kans op het verstoppelen van infiltratieputten.

- In het huidige onderzoek is natriumnitrat gebruikt bij de infiltratie. Gezien de gehalten aan CZV en DOC in het grondwater kan bij sanering van de locatie de toepassing van calciumnitrat worden overwogen. Door de aanwezigheid van hoge concentraties calcium zou DOC kunnen uitvlokken met als gevolg mogelijk een geringere beschikbaarheid voor biochemische oxidatie. Zo nodig zouden ook andere calciumzouten kunnen worden toegevoegd. De effecten van calcium in een dergelijke situatie zouden in het vooronderzoek onder laboratoriumcondities moeten worden onderzocht.

HOOFDSTUK 6

BATCHEXPERIMENTEN

6.1 Doel van het onderzoek

De biologische activiteit van het grondwater op de locatie is in batchexperimenten gevolgd. Het betreft het monitoren van de ontwikkeling van de microbiële populatie in de tijd. Tijdens de pilot-proef zijn op verschillende tijdstippen grondwatermonsters uit een aantal monitoringsfilters genomen en getest op microbiologische activiteit.

Deze testen moeten antwoord geven op de volgende vragen:

- Is anaërobe benzeenafbrekende activiteit aanwezig in de bodem?
- Neemt de benzeenafbrekende activiteit toe in de tijd?
- Neemt de benzeenafbrekende activiteit toe in de ruimte, oftewel vindt bacteriegroei en /of transport van bacteriën plaats in de bodem?

Deze informatie is aanvullend op de macrochemische karakterisatie en levert onafhankelijke informatie over het biologische proces van anaërobe benzeenafbraak op de Flebo-locatie.

6.2 Uitvoering van het onderzoek

De methode is in duplo uitgevoerd met anaëroob grondwater afkomstig van de locatie. Benzeen en nitraat zijn, indien nodig, toegevoegd waarbij de afbraak van benzeen, toluen en nitraat in de tijd is gevolgd. Per tijdstip zijn 5 monitoringsfilters bemonsterd. Gedurende het veldexperiment zijn op 3 verschillende tijdstippen batches ingezet (zie tabel 8).

De batchtesten zijn uitgevoerd in 250 ml serumflesjes. Deze zijn in een anaërobe handschoenenkast gevuld met 160 ml grondwater uit de gebruikte peilbuizen. Aan de batches is een anaërobe oplossing van benzeen en nitraat toegevoegd.

Van elke incubatieserie (per peilbuis per tijdstip) zijn in duplo de afbraak van benzeen en toluen en het verloop van de nitraat- en nitrietconcentraties gevolgd. Per tijdstip is ook een steriele controle meegenomen. De serumflesjes zijn afgesloten met een viton stop en aluminium afsluiting. Door het toevoegen van extra stikstofgas stonden de flesjes onder een lichte overdruk, zodat het inleken van lucht is voorkomen en anaërobe condities werden gewaarborgd. De flesjes zijn schuddend geïncubeerd bij 14°C. Op verschillende tijden zijn vloeistofmonsters genomen en geanalyseerd op benzeen, toluen, nitraat en nitriet.

De concentraties benzeen en toluen zijn bepaald na het bemonsteren van de waterfase (1 ml) met een glazen 1 ml spuit met Solid Phase Micro Extraction (SPME) gaschromatografische analyse. Een vergelijkbaar monster is gebruikt voor het bepalen van de nitraat- en nitrietconcentraties via Dionex anionen analyse.

De batches zijn in de eerste weken gedurende de incubatie regelmatig geanalyseerd, afhankelijk van het verloop van de afbraakprocessen. De tijdsduur van de batch-testen is afhankelijk van de snelheid van de biologische processen.

Tabel 8. Overzicht van de ingezette batches (nummers per tijdstip).

	Tijdstip 1; 25-4-01	Tijdstip 2; 3-9-01	Tijdstip 3; 11-1-02
Peilbuis 3	1-2	13-14	35-36
Peilbuis 10	3-4	15-16	37-38
Peilbuis 12	5-6	17-18	39-40
Peilbuis 14	7-8	19-20	41-42
Peilbuis 22	9-10	21-22	43-44
Peilbuis 3 (steriel)	11-12	23-24	45-46
Peilbuis 2		25-26	47-48
Peilbuis 9		27-28	49-50

Tijdstip 1: Eerste serie batchexperimenten

Enkele dagen voordat de eerste infiltratie met nitraat is gestart zijn de grondwatermonsters voor de eerste serie batchexperimenten genomen. De grondwatermonsters zijn van april 2001.

Tijdstip 2: Tweede serie batchexperimenten

Twee weken nadat de tweede infiltratie was beëindigd (juli 2001), zijn de grondwatermonsters voor deze serie genomen.

Tijdstip 3: Derde serie batchexperimenten

Drie weken nadat de derde infiltratie was beëindigd, zijn de grondwatermonsters voor deze serie genomen.

6.3 Resultaten batchexperimenten

6.3.1 Resultaten eerste serie batchexperimenten

De resultaten van de eerste serie batches staan weergegeven in figuur 18.

In de figuren is te zien dat er geen afbraak van benzeen is opgetreden gedurende 3 maanden incubatie. Tijdens eerdere batchexperimenten met grond en grondwater van de locatie (NOBIS-onderzoek) was een lagfase van 25 tot 75 dagen waargenomen, voordat benzeenafbraak optrad. Omdat nu alleen grondwater is gebruikt, zijn er minder bacteriën in de batches aanwezig in vergelijking met de eerder uitgevoerde experimenten. Hierdoor zal het in de huidige experimenten langer duren voordat de bacteriën het aanwezige substraat (benzeen) zullen afbreken. Van adaptatie aan nitraat was in de batches nog geen sprake, omdat de infiltratie in het veld nog niet was gestart. De verwachting is dat bij de serie batches van een later tijdstip, de bacteriën geïmproviseerd zijn aan nitraatreducerende condities.

De nitraatconcentraties in de batches nemen langzaam af, wat aangeeft dat er microbiële activiteit in de batches aanwezig is. Bij de omzetting van nitraat wordt nauwelijks nitriet gevormd (max. 1 mg/l), wat gunstig is, omdat nitriet in hogere concentraties een remmende werking kan hebben op bacteriën.

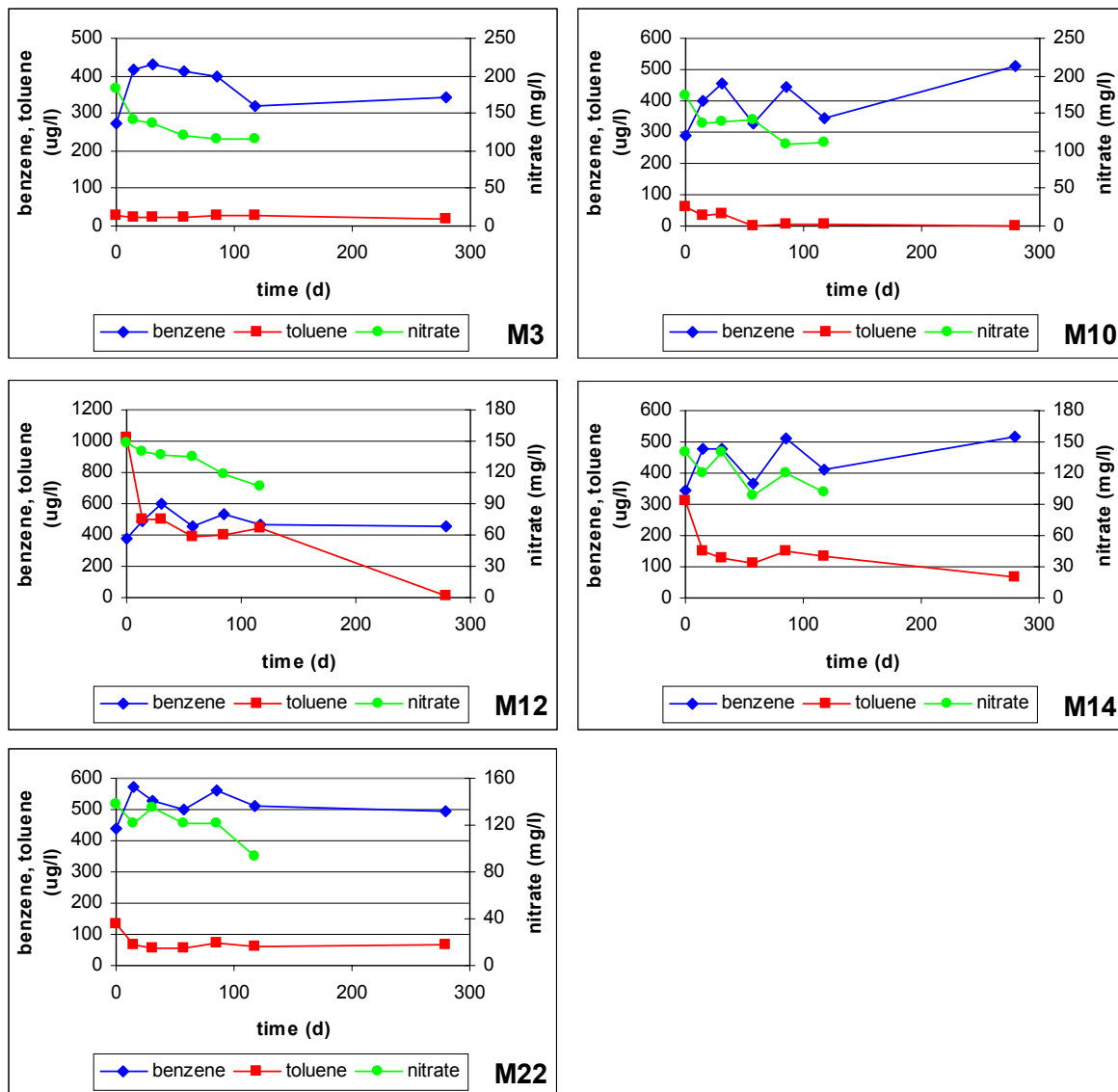


Fig. 18. Benzeen, toluen en nitraatconcentraties in incubaties met grondwater uit verschillende peilbuizen tijdens de eerste serie.

6.3.2 Resultaten tweede serie batchexperimenten

De resultaten van de tweede serie batchexperimenten zijn weergegeven in figuur 19. Naast de 5 minifilters uit de eerste serie zijn nu ook de minifilters M2 en M9 meegenomen voor de batchtesten. In het veld was in deze minifilters nog het meeste nitraat aanwezig na de tweede infiltratie.

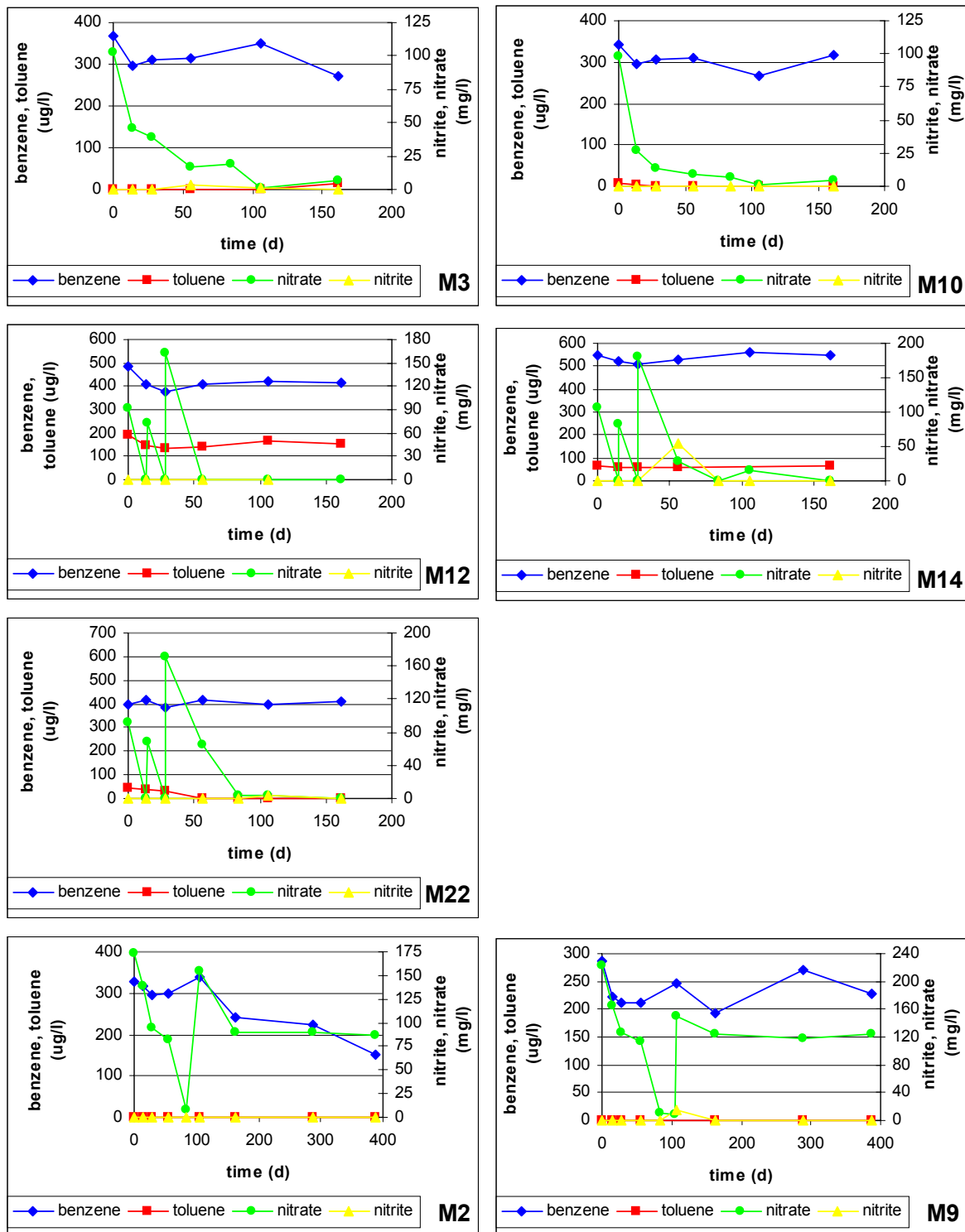


Fig. 19 Benzeen, toluen en nitraatconcentraties in incubaties met grondwater uit verschillende peilbuizen tijdens de tweede serie.

In de figuren is te zien dat de nitraatconcentratie erg snel daalt en dit is sneller dan in de batches van tijdstip 1. Het materiaal in de batches van tijdstip 1 had nog geen nitraat in het veld gezien, terwijl dat bij het materiaal van tijdstip 2 wel het geval is. Dit heeft duidelijk tot een adaptatie van de aanwezige bacteriën geleid, die nitraat inmiddels erg snel omzetten (300 mg/l in 10 tot 70 dagen). In enkele batches is er voor gekozen om extra nitraat toe te voegen, omdat we verwachtten dat dit nodig is voor de omzetting van benzeen en toluen. In andere batches is geen extra nitraat toegevoegd om te kijken of er toch benzeenafbraak op gang wilde komen.

Uit de figuren valt af te lezen dat benzeen in geen van de batches wordt omgezet, zelfs niet na een jaar incubatie (minifilters M2 en M9). Toluene is in vrijwel alle batches omgezet, behalve in minifilters M12 en M14, maar in die batches was vrijwel geen nitraat meer aanwezig.

6.3.3 Resultaten derde serie batchexperimenten

De resultaten van de derde serie batches zijn weergegeven in figuur 20. Ook tijdens deze serie zijn naast de 5 standaard minifilters ook de filters M2 en M9 meegenomen voor de batchtesten.

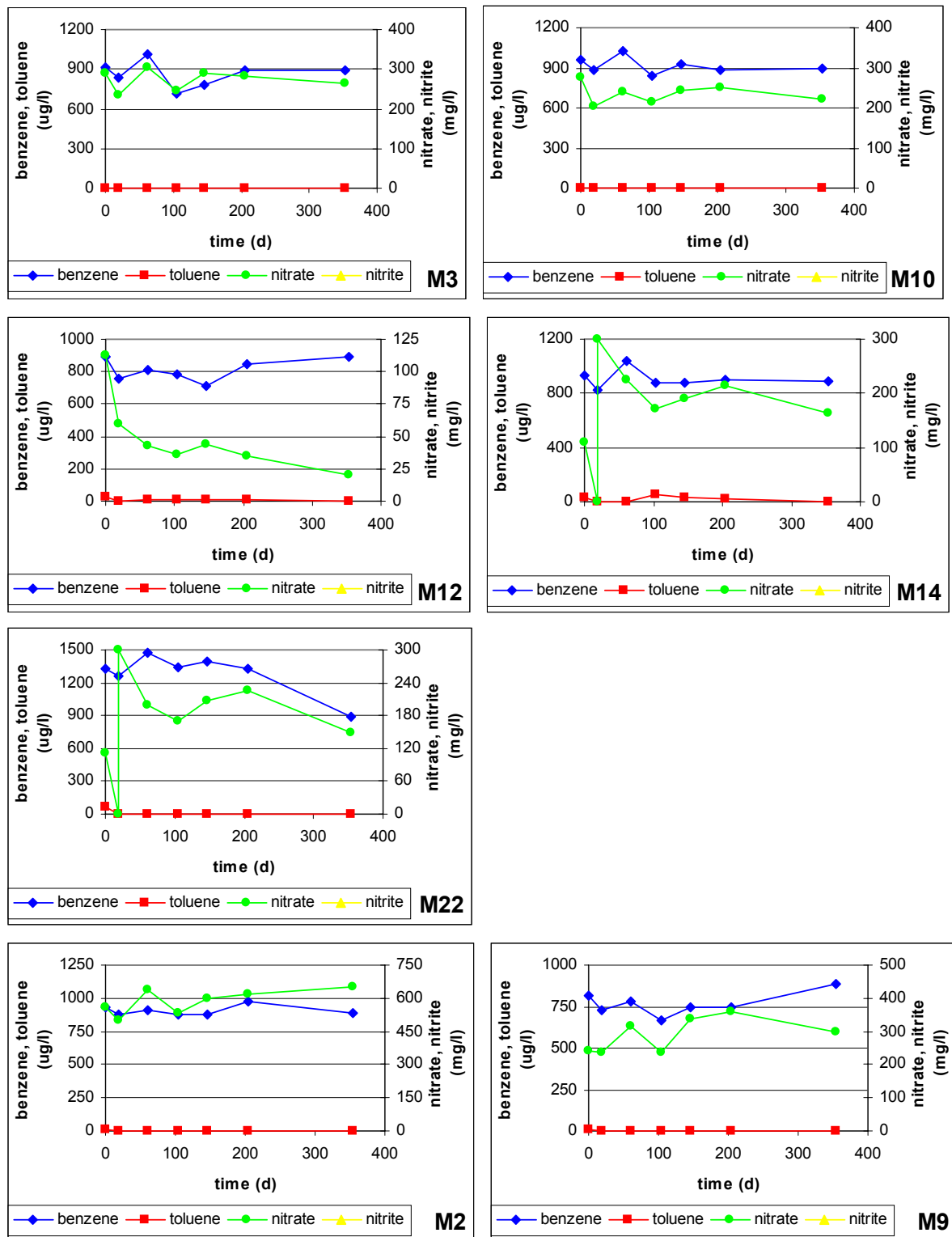


Fig. 20. Benzeen, toluene en nitraatconcentraties in incubaties met grondwater uit verschillende peilbuizen tijdens de derde serie.

In de figuren is te zien dat de afbraak van benzeen na 200 dagen incubatie nog niet op gang is gekomen. De benzeenconcentraties zijn nog op het oorspronkelijke niveau en nemen niet af. Het gebruikte grondwater verbruikt nu veel minder nitraat dan tijdens de tweede serie, slechts in de batch uit de filters M14 en M22 is extra nitraat toegevoegd. In alle overige gevallen is nog voldoende nitraat aanwezig. De tolueenconcentratie is in alle batches verwaarloosbaar.

6.4 Discussie

Bij het vergelijken van de resultaten uit de batches en het veld, is in het veld een daling van de benzeenconcentratie gevonden in filters M2, M3, M9 en M10 na de derde infiltratie. De daling in het veld is na 3 tot 4 maanden zichtbaar, gerekend vanaf de derde infiltratie. Het materiaal uit deze filters is ook gebruikt voor de batchexperimenten welke 6 maanden zijn geïncubeerd.

De grondwaterbatches zijn gebruikt om de toename in bacteriële activiteit te bepalen. Hiervoor zijn batches ingezet vóórdat is begonnen met de infiltratie en twee maal na de infiltratie. Door het verloop van de benzeenafname in de batches te volgen kan tussen de 3 verschillende tijdstippen een stijging in de benzeenafbrekende activiteit worden gezien. Dit is in dit geval niet gelukt, omdat in geen van de batches afname van benzeen is aangetoond.

Enkele oorzaken voor het afwezig zijn van benzeenafbraak in batchexperimenten kunnen zijn:

- Het is bekend dat de bacteriën zich voornamelijk aan het grondmateriaal hechten en minder vrij aanwezig zijn in het grondwater. Hierdoor is de hoeveelheid bacteriën, die in de batches gebruikt wordt, veel minder in vergelijking met de hoeveelheid in het veld. Hierdoor zal de lagfase in de batches naar verwachting veel langer zijn dan in het veld. Tijdens eerdere batchexperimenten, waarbij alleen de waterfase is gebruikt, is overigens wel bacteriële activiteit aangetoond. In dat geval ging het om de omzetting van PCE en grondwater van de Rade Markt in Groningen [Nipshagen et al., 2000]. Verder weten we dat er wel bacteriën in het grondwater van de Flebo-locatie aanwezig zijn (en niet alleen aan de bodemdeeltjes zijn geadsorbeerd), omdat bij de Wageningse Universiteit met hetzelfde grondwater de afname van benzeen is aangetoond na een concentratiestap door centrifugeren en onder veel optimalere condities (zie paragraaf 7.3).
- Het veldexperiment is met een eerste infiltratie gestart in april 2001. De toegevoegde hoeveelheid nitraat was in het veld snel uitgeput, zodat nog 2 extra nitraattoevoegingen zijn uitgevoerd. Al met al is in het veld sprake van een veel langere periode waarin nitraat in het grondwater aanwezig is geweest dan in de batches. Hierdoor kan in het veld de lagfase al lang zijn overwonnen, terwijl de batches nog steeds in deze lagfase zijn.
- In het veld zijn bepaalde componenten aanwezig die nodig zijn voor de omzetting van benzeen. Aangezien in de batches geen bodemmateriaal wordt gebruikt kan er iets in het bodemmateriaal aanwezig zijn dat bijvoorbeeld als sporenelement van belang is voor de omzetting van benzeen, óf de aanwezige bacteriën missen een vaste fase als hechtingsoppervlak.
- De bacteriepopulatie in het laboratorium is anders dan die in de ondergrond, mede door bemonsterings- en conserveringsartefacten.

De vraag verdient aandacht in hoeverre de benzeen-afbrekende activiteit op de Flebo-locatie overgebracht kan worden naar andere locaties. Op locaties waar geen benzeenafbraak is aangetoond, zou grondwater van de Flebo-locatie kunnen worden gebruikt als entmateriaal, maar de batchexperimenten brengen naar voren dat de hoeveelheid aanwezige bacteriën in het grondwater te weinig lijkt te zijn. In een TNO-experiment op de NAM-locatie te Slochteren, waar bij een pushpull experiment grondwater van de Flebo-locatie is gebruikt als entmateriaal, werd geen verhoogde afname van de benzeenconcentratie gevonden.

De bacteriën in het grondwater van de Flebo-locatie kunnen ook in een laboratorium, of in een reactor on site worden opgekweekt. Of de op deze wijze gekweekte bacteriën op een andere locatie actief zullen zijn, weten we niet. Verder is het natuurlijk ook belangrijk dat de geënte bacteriën zich in de bodem zullen verspreiden en niet alleen rond het infiltratiefilter blijven. In het laatste geval zal de benzeenafbraak slechts op een klein gedeelte van de beënte locatie plaatsvinden.

TOEPASSEN VAN DE TECHNIEK EN VERVOLGONDERZOEK

7.1 Huidige stand van zaken

Het voorgaande (NOBIS) onderzoek én de praktijkproef op de Flebo-locatie hebben nieuwe mogelijkheden voor de in situ sanering van met benzeen verontreinigde locaties zichtbaar gemaakt. De resultaten vormen op technisch en wetenschappelijk gebied een doorbraak en zijn ook internationaal opmerkelijk, omdat anaërobe afbraak van benzeen slechts door enkele onderzoeksgroepen overtuigend is aangetoond [Coates, 2001, Coates, 2002, Nales et al., 1998, Burland en Edwards, 1999].

Vervolgonderzoek dient uit te wijzen wat de achterliggende omstandigheden zijn waarbij afbraak plaatsvindt. Op dit moment is grondwater van de Flebo-locatie reeds geconcentreerd en geïncubeerd onder optimale omstandigheden. Dit is nader uitgewerkt in paragraaf 7.3.

7.2 Toepassen van de techniek op de Flebo-locatie

Met de resultaten van het onderzoek is een nieuwe techniek voor sanering van de locatie beschikbaar gekomen. Op basis van de ervaringen, die in het veld zijn opgedaan, is een ontwerp voor sanering te maken. Het principe van sanering is weergegeven in figuur 21.

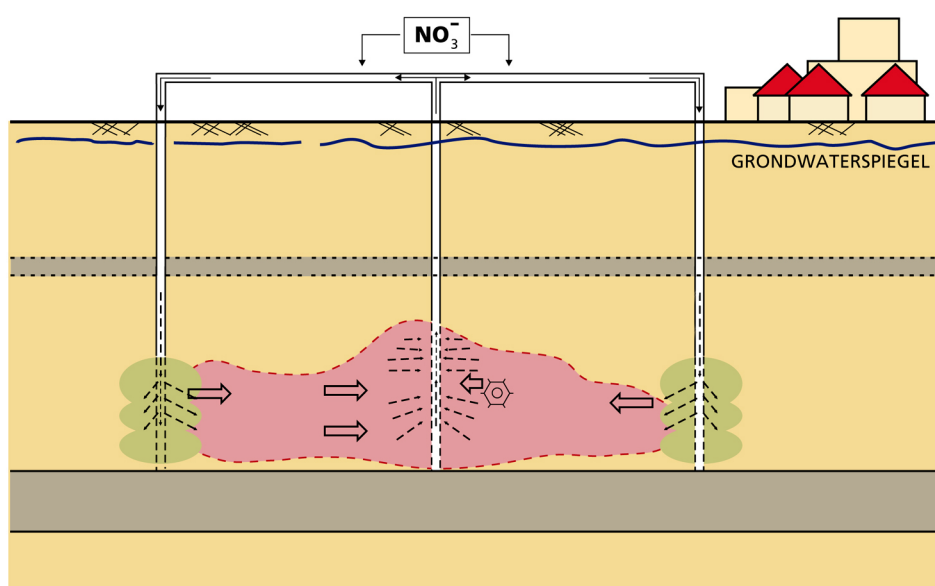


Fig. 21. Principe infiltratie nitraathoudend grondwater.

Met de techniek wordt grondwater opgepompt, van nitraat voorzien en langs de rand van de verontreiniging geïnfiltreerd. Binnen het te behandelen gebied worden monitoringsfilters geplaatst. Wanneer het bodemvolume van nitraat is voorzien, wordt de onttrekking stilgelegd en wordt overgegaan tot het monitoren van de gehalten nitraat, nitriet en benzeen in de monitoringsfilters.

De techniek lijkt op voorhand kosteneffectief voor de locatie. Voorafgaand aan de sanering van de gehele locatie of een deel daarvan, moet de techniek echter opnieuw worden afgewogen tegen de beschikbare alternatieven (zoals zuurstofinjectie). Dit zou plaats kunnen vinden in het saneringsonderzoek voor de locatie.

In het saneringsonderzoek wordt tevens de terugsaneerwaarde voor de locatie vastgelegd. Overwogen zou kunnen worden om niet de gehele verontreinigde bodem te doorspoelen, maar uit te gaan van een zone / scherm waarbinnen de biologie wordt gestimuleerd. Met een zone / scherm wordt voorkomen dat verdere verspreiding van verontreiniging plaatsvindt.

7.3 Toepassen van de techniek op andere locaties

Naar de huidige inzichten is de techniek inzetbaar op locaties waar sprake is van een anaëroob bodemmilieu. In Nederland betreft dit een groot deel van de westelijke en noordelijke provincies en de diepere ondergrond (>10-30 m –mv.) in de rest van Nederland. Met de techniek kan ook een verontreiniging worden aangepakt die bijvoorbeeld onder bebouwing aanwezig is.

Voor het toepassen van de techniek op andere locaties kan het onderstaande ‘stappenplan’ worden gevolgd.

Stap 1: Haalbaarheidsonderzoek

Door de techniek af te wegen tegen alternatieve saneringstechnieken, zoals ‘pump and treat’ en zuurstofdosering zal moeten blijken of sanering van een locatie volgens dit principe interessant is. Indien dit niet het geval is, heeft het uiteraard geen zin om vervolgonderzoek uit te voeren. Met het bevoegd gezag zal overleg plaatsvinden over de mogelijkheden van het infiltreren van nitraat in de bodem. In vele gevallen zal het ingebrachte nitraat zich na de sanering niet verspreiden naar de omgeving, aangezien het in reducerende bodems relatief vlot wordt verbruikt. Het verdient uiteraard aanbeveling om nitraat niet over te doseren, maar af te stemmen op het verbruik door de bodem.

Stap 2: Batchexperimenten

Indien de techniek mogelijkheden biedt voor de locatie, dient in batchexperimenten onderzocht te worden of in de huidige situatie afbraak van benzeen plaatsvindt en of deze afbraak onder anaërobe omstandigheden kan worden gestimuleerd door het toevoegen van een elektronendonor, zoals nitraat of sulfaat. Speciale zorg heeft hierbij het anaëroob houden van de genomen veldmonsters en ingezette batches. Op dit moment zijn batchproeven nog nodig om afbraak aan te tonen. Bijkomend voordeel van batchexperimenten is dat inzicht wordt verkregen in de nitraatconsumptie van de bodem over een langere periode (circa 4 maanden).

Stap 3: Veldkarakterisatie

Optioneel is om de redoxstatus van de bodem en de doorlatendheid nader te bepalen. Op basis van bodemonderzoek bestaat hierover veelal wel een indruk. In het NOBIS-vooronderzoek zijn werkvoorschriften opgenomen voor het bepalen van de redoxstatus in de veldkarakterisatie. Hieruit blijkt dat maatgevende componenten in grond en grondwater zijn: organische stof, sulfiden, tweewaardig ijzer en de gehalten aan verontreinigingen. Op basis van deze parameters wordt een indruk verkregen van het totaal aan nitraatconsumerende stoffen in de bodem.

Een indruk van de biobeschikbaarheid (daadwerkelijke consumptie) van de nitraatconsumerende stoffen kan, naast de batchexperimenten, worden verkregen door het bepalen van het BZV (biologisch zuurstofverbruik; bijvoorbeeld BZV-40).

Opgemerkt wordt dat de bodem op vele locaties heterogeen van samenstelling is. Dit leidt tot locale (grote) verschillen in redoxreactiviteit en doorlatendheid. Om een indruk van de locale ver-

schillen te krijgen verdient het aanbeveling om van verschillende bodemlagen gegevens te verzamelen. Op basis van de gemeten extremen kan de uiteindelijke nitraatdosering worden vastgesteld.

Stap 4: Vaststellen dosering nitraat

Om anaërobe afbraak van benzeen te stimuleren, dient nitraat gedurende langere tijd in de bodem aanwezig te zijn. De dosering van nitraat wordt afgestemd op het verbruik van de bodem. Hiervoor zijn de resultaten van de veldkarakterisatie richtinggevend.

De meest betrouwbare inschatting van het nitraatverbruik kan echter worden gemaakt op basis van het gemeten nitraatverbruik tijdens de batchexperimenten. Bij de noodzakelijke langere verblijftijden van nitraat in de bodem dient het gemeten verbruik echter geëxtrapoleerd te worden.

De bepalingen met de micro-oxymax geven eveneens een indruk, maar zijn minder representatief vanwege de gebruikte oxydator (zuurstof in plaats van nitraat) en het optreden van een schudeffect. De bepaling met de micro-oxymax kan op bodemtemperatuur worden uitgevoerd.

Stap 5: Ontwerp van het systeem

In paragraaf 3.1 zijn aandachtspunten opgenomen voor het ontwerp van een infiltratiesysteem. Belangrijk voor een sanering volgens dit principe is dat de dosering van nitraat automatisch wordt gekoppeld aan het infiltratiedebiet. Hiermee wordt het handmatig bijstellen voorkomen. Verder dient aandacht te worden besteed aan de opbouw van het zandfilter (korrelgrootte) voor het afvangen van zwevende bestanddelen. Overwogen kan worden om het zandfilter eerst goed te laten ontwikkelen door het rondpompen van water, alvorens water te infiltreren. Bij het ontwerp dient men rekening te houden met het optreden van (stroom)storingen.

In het Flebo-project is uitgegaan van het volledig anaëroob houden van het infiltratiesysteem. Dit zou voor andere locaties minder of niet belangrijk zijn. Uit de literatuur is namelijk bekend dat de afbraak van benzeen onder aërobe omstandigheden (veel) sneller verloopt dan onder anaërobe omstandigheden. Enig zuurstof dat in de bodem wordt gebracht zou de afbraak dus alleen maar kunnen stimuleren. Bovendien zijn de meeste nitraatreduceerders zuurstoftolerant. Wel dient er rekening mee gehouden te worden dat het inbrengen van zuurstof kan leiden tot grotere risico's op het verstopping van de infiltratiefilters, alsmede tot mogelijke verzuring van de bodem.

In het huidige onderzoek is natriumnitraat gebruikt bij de infiltratie. Gebruik van calciumnitraat zou gunstig kunnen zijn, doordat calcium-ionen mogelijk DOC aan bodemdeeltjes bindt, waardoor DOC mogelijk minder snel wordt afgebroken en minder nitraat vraagt.

Stap 6: Monitoren van de afbraak

In praktijksituaties, waar de haalbaarheid van afbraak van aromaten met nitraat is aangetoond, kan voor wat betreft het monitoren worden volstaan met het volgen van de gehalten aan verontreiniging, nitraat en de redoxpotentiaal. Tegelijk met het meten van de redoxpotentiaal kunnen ook het elektrisch geleidingsvermogen en de zuurgraad worden gemeten. Het gehalte nitriet wordt periodiek gecontroleerd om na te gaan of de concentraties niet te hoog oplopen, omdat dit toxisch kan zijn voor bacteriën. Vanwege de vastgestelde halfwaardetijd van 80 tot 200 dagen voor benzeen volstaat een monitoringsfrequentie van eens per twee maanden.

7.4 Aanvullend wetenschappelijk onderzoek

Momenteel wordt in het Laboratorium voor Microbiologie van de Universiteit van Wageningen grondwater van de Flebo-locatie gebruikt voor batchexperimenten om hieruit benzeenafbrekende bacteriën te isoleren. Hiertoe is de biomassa uit grondwater van de Flebo-locatie onder anaërobe condities met behulp van een centrifuge geconcentreerd en in een anaëroob nitraatreducerend

medium geïncubeerd bij 30 °C. Doorenten in vers medium (al tweemaal op het moment van schrijven) van deze organismen heeft nog steeds benzeenafbraak opgeleverd. Het doel van deze experimenten is om uit deze batches een stabiele ophopings- of reïncultuur te isoleren voor vervolgonderzoek, zoals fysiologische en genetische karakterisatie.

Het verschil met de bij TNO uitgevoerde batchexperimenten is dat de aanwezige bacteriën zijn geconcentreerd en geïncubeerd onder optimale omstandigheden (in medium en bij 30 °C).

Op het moment dat het gelukt is om anaërobe benzeenafbrekende bacteriën te isoleren en te karakteriseren is het wellicht mogelijk om aan te tonen dat deze bacteriën een specifieke genetische signatuur bevatten. Mocht dit zo zijn, dan is in de toekomst gebruik te maken van moleculaire detectiemethodes om de aanwezigheid van deze bacteriën in het veld aan te tonen. Geschikte methodes hiervoor zijn de MPN-PCR, DGGE, TGGE, etc. Het grote voordeel van deze methodes is dat de resultaten binnen enkele dagen beschikbaar zijn, in tegenstelling tot conventionele methoden. Helaas is op dit moment nog niets bekend over het aanwezig zijn van een specifieke genetische signatuur van anaërobe benzeenafbrekende bacteriën.

HOOFDSTUK 8

ALGEMENE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het SKB-project is onderzocht of anaërobe afbraak van benzeen in de bodem met nitraat op gang kan worden gebracht. Daarnaast had het project tot doel om praktijkervaring op te doen met de infiltratie van nitraathoudend water in een anaëroob pakket, alsmede met het monitoren van anaërobe benzeenafbrekende activiteit in het grondwater.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat de anaërobe afbraak van benzeen plaatsvindt in grondwater, waarin gedurende langere tijd nitraat aanwezig is. De gemeten snelheid van afbraak is vergelijkbaar met hetgeen in de literatuur wordt genoemd. In grondwater, waarin hoge gehalten sulfiden en / of geen nitraat aanwezig is, kon geen afbraak van benzeen worden vastgesteld. Daarmee worden de conclusies uit het voorgaande laboratoriumonderzoek bevestigd door de praktijkproef. Voor het saneren van de locatie Flebo, alsmede voor soortgelijke locaties elders, is hiermee een nieuwe saneringstechniek beschikbaar gekomen.

De ontwikkeling en toename van de benzeenafbrekende activiteit is niet waargenomen in grondwater van de locatie die in het laboratorium is ingezet in batchexperimenten. Zowel in de grondwatermonsters die zijn genomen voordat de infiltratie is gestart als in grondwatermonsters die na de infiltratie zijn genomen, is geen benzeenafbrekende activiteit aangetoond, laat staan een toename in deze activiteit. Doordat alleen grondwater is ingezet en geen grond, is de hoeveelheid bacteriën en hun activiteit in de watermonsters kennelijk te gering geweest om afbraak te krijgen binnen de gemeten periode. De verwachting is dat de lagfase voor grondwater alléén (veel) langer is dan wanneer grond én grondwater samen worden ingezet.

De infiltratie van nitraathoudend water is zonder grote problemen verlopen. Voor het opschalen van het systeem naar een saneringssituatie zijn aandachtspunten geformuleerd.

Aanbevolen wordt om de haalbaarheid van de techniek op andere locaties te onderzoeken. Aanvullend wetenschappelijk onderzoek dient uit te wijzen welke bacteriën verantwoordelijk zijn voor de anaërobe afbraak van benzeen en onder welke omstandigheden deze bacteriën optimaal functioneren. Mogelijk leidt het onderzoek tot een detectiemethode voor bacteriën die verantwoordelijk zijn voor de anaërobe afbraak van benzeen.

LITERATUUR

Baten, H.H.M., P. Doelman, J. Griffioen, R.H.B. Kersten, S. Keuning, A.A.M. Nipshagen en H.H.M. Rijnaarts, 1997, Anaërobe afbraak van BTEX op locaties Slochteren en Schoonebeek 107. CUR/NOBIS rapport 95-1-43.

Burland, S.M., and E.A. Edwards, 1999. Anaerobic benzene biodegradation linked to nitrate reduction. *Applied and Environmental Microbiology* 65: 529-533.

Coates, J. D., R. Chakraborty, J. G. Lack, S. M. O'Connor, K. A. Cole, K. S. Bender, and L. A. Achenbach 2001. Anaerobic benzene oxidation coupled to nitrate reduction in pure culture by two strains of *Dechloromonas* Nature. 411:1039-1043.

Coates, J. D., R. Chakraborty, and M. J. McInerney 2002. Anaerobic benzene biodegradation - a new era *Research in Microbiology*. 153:621-628.

Edwards, E. A., and D. Grbic-Galic 1992. Complete mineralization of benzene by aquifer microorganisms under strictly anaerobic conditions *Appl. Environ. Microbiol.* 58:2663-2666.

Griffioen, J., Hidding, H., Slik, P.C., Heiningen, W.N.M., Langenhoff, A.A.M. and Rijnaarts, H.H.M., 1999. Benzeenafbraak in een sterk reducerende bodem. CUR/NOBIS rapport 96-3-05.

Kazumi, J., M. E. Caldwell, J. M. Suflita, D. R. Lovley, and L. Y. Young 1997. Anaerobic degradation of benzene in diverse anoxic environments *Environ. Sci. Technol.* 31:813-818.

Lovley, D. R., J. D. Coates, J. C. Woodward, and E. J. P. Phillips 1995. Benzene oxidation coupled to sulfate reduction *Appl. Environ. Microbiol.* 61:953-958.

Nales, M., B.J. Butler and E.A. Edwards, 1998. Anaerobic benzene biodegradation: a microcosm survey. *Bioremediation Journal* 2: 125-144.

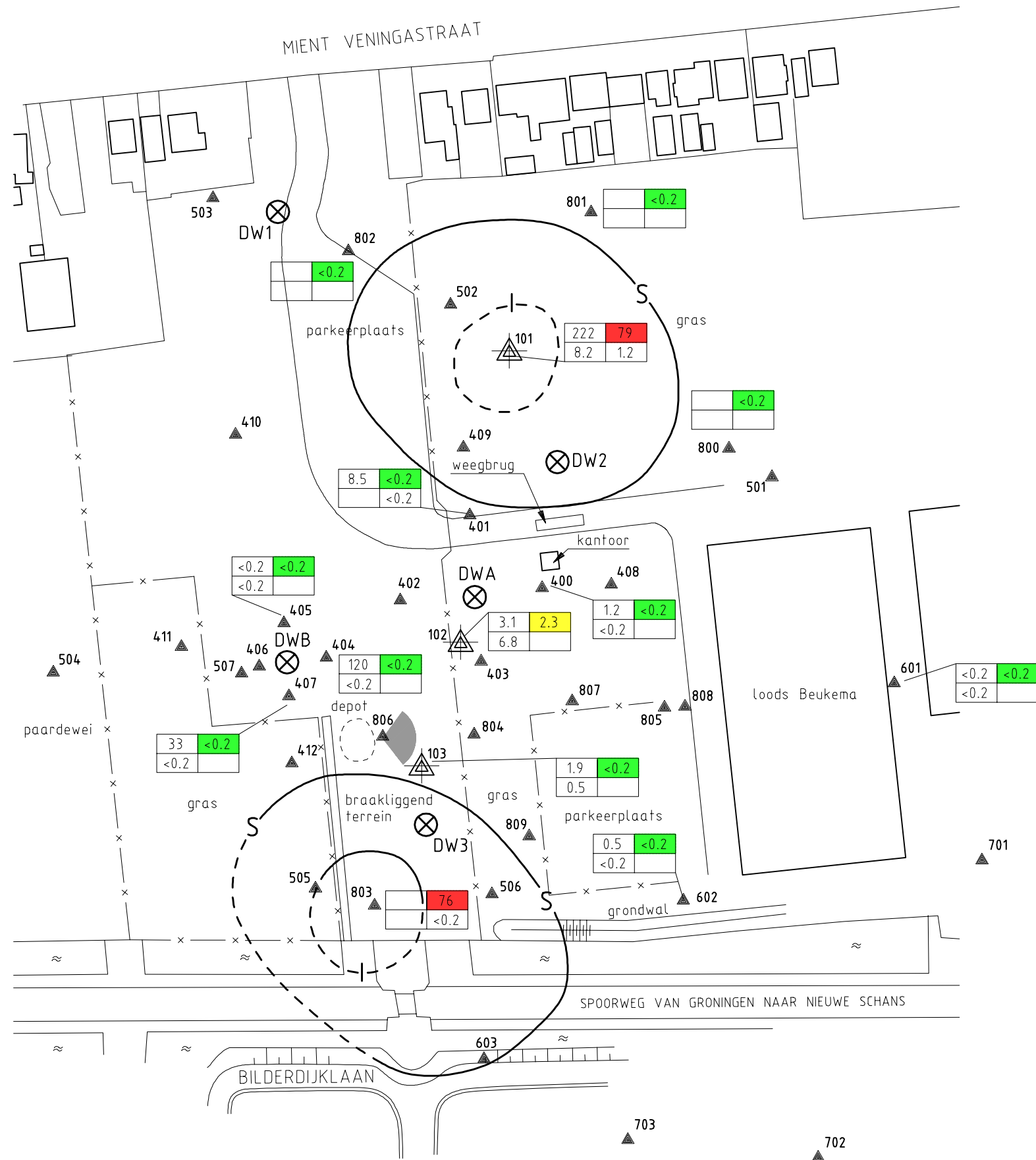
Nipshagen, A. A. M., J. Krooneman, A. A. M. Langenhoff, A. van Smaalen, and G. Visscher. 2000. Nobis project Rademarkt fase 3 full scale implementatie 98-1-22. CUR/SKB.

Suarez, M. P. and H.S. Rifai, 1999. Biodegradation Rates for Fuel Hydrocarbons and Chlorinated Solvents in Groundwater, *Bioremediation Journal*, 3(4):337-362.

Vogel, T. M., and D. Grbic-Galic. 1986. Incorporation of oxygen from water into toluene and benzene during anaerobic fermentative transformation. *Applied and Environmental Microbiology*. 52(1):200-202.

BIJLAGE A

VERONTREINIGINGSSITUATIE GRONDWATER LOCATIE FLEBO
(tekeningen 101078-V1 t/m 101078-V3)



VERKLARING:

- DW3 DEEPWELL MET NUMMER
- 809 MINIFILTER MET NUMMER
- 103 BORING MET PEILFILTER

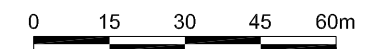
- GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN MEI 1994 (IN µg/L)
(filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)
- GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN JAN. 2000 (IN µg/L)
- GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN JAN. 2000 (IN µg/L)
- GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN MEI 1994 (IN µg/L)
(filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)

VERONTREINIGING GRONDWATER MET GEHALTE AAN BENZEEN

- GEHALTE ≤S-WAARDE (0.2 µg/L)
- GEHALTE >S-WAARDE EN ≤T-WAARDE (15 µg/L)
- GEHALTE >T-WAARDE EN ≤I-WAARDE (30 µg/L)
- GEHALTE >I-WAARDE

VERSPREIDING VAN DE VERONTREINIGING IN HET GRONDWATER

- S CONTOURLIJN STREEFWAARDE
- T CONTOURLIJN TUSSENWAARDE
- I CONTOURLIJN INTERVENTIEWAARDE
- GRENZ VERONTREINIGING GRONDWATER NIET BEKEND
- LOCATIE PRAKTIJKPROEF



DO	24-01-2003	DEFINITIEF	A.T.
NR	DATUM	WIJZIGING	GET.

PROVINCIE GRONINGEN

TEKENAAR: A. TOUSSAINT
PROJECTLEIDER: N. SLIK

SCHAAL: 1:1500
FORMAAT: A3

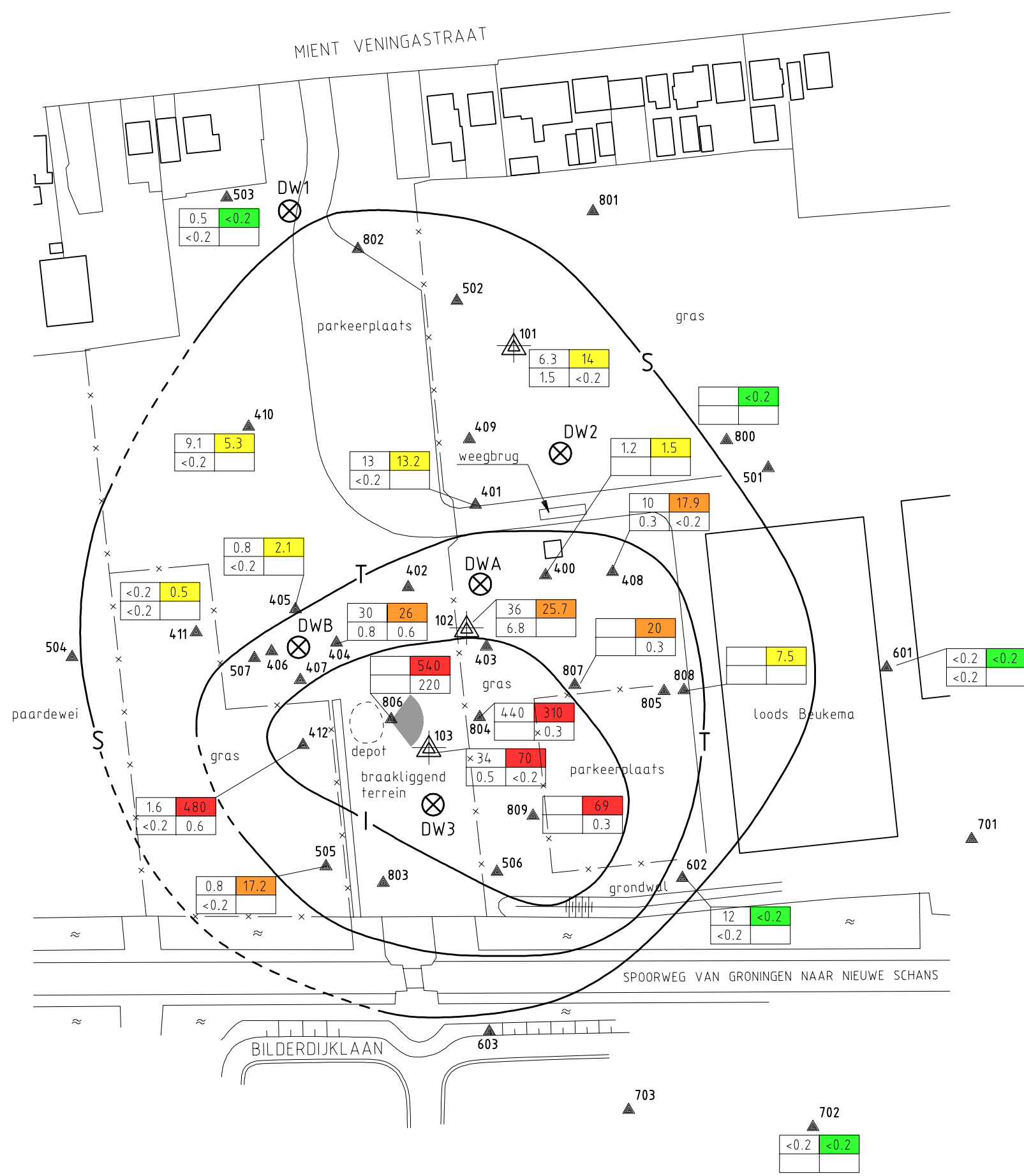
ACTUALISATIE
VERONTREINIGINGSSITUATIE GRONDWATER
LOCATIE FLEBO TE HOOGEZAND

TEKENINGNUMMER: 101078-V1
WIJZ.NR: DO

GEHALTEN BENZEEN
op 7-8m. -mv.

DEFINITIEF

ONDERGROND OVERGEGENOMEN VAN
TEKENING 46833-V1



VERKLARING:

- DEEPWELL MET NUMMER
- MINIFILTER MET NUMMER
- BORING MET PEILFILTER

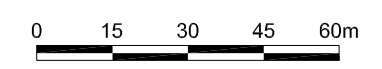
GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN MEI 1994 (IN $\mu\text{g/L}$) (filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)	
33	<0.2
<0.2	1.2
GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN JAN. 2000 (IN $\mu\text{g/L}$)	
GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN JAN. 2000 (IN $\mu\text{g/L}$)	
GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN MEI 1994 (IN $\mu\text{g/L}$) (filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)	

VERONTREINIGING GRONDWATER MET GEHALTE AAN BENZEEN

- GEHALTE \leq S-WAARDE (0.2 $\mu\text{g/L}$)
- GEHALTE $>$ S-WAARDE EN \leq T-WAARDE (15 $\mu\text{g/L}$)
- GEHALTE $>$ T-WAARDE EN \leq I-WAARDE (30 $\mu\text{g/L}$)
- GEHALTE $>$ I-WAARDE

VERSPREIDING VAN DE VERONTREINIGING IN HET GRONDWATER

- CONTOURLIJN STREEFWAARDE
- CONTOURLIJN TUSSENWAARDE
- CONTOURLIJN INTERVENTIEWAARDE
- GRENS VERONTREINIGING GRONDWATER NIET BEKEND
- LOCATIE PRAKTIJKPROEF



DO	24-01-2003	DEFINITIEF	A.T.
NR	DATUM	WIJZIGING	GET.

PROVINCIE GRONINGEN

TEKENAAR: A. TOUSSAINT
 PROJECTLEIDER: N. SLIK
 SCHAAL: 1:1500
 FORMAAT: A3

ACTUALISATIE VERONTREINIGINGSSITUATIE GRONDWATER
 LOCATIE FLEBO TE HOOGEZAND

TEKENINGNUMMER: 101078-V2
 WIJZ.NR: DO

GEHALTEN BENZEEN op 11-16m. -mv.

DEFINITIEF

ONDERGROND OVERGEGENOMEN VAN
TEKENING 46833-V2



VERKLARING:

- DEEPWELL MET NUMMER
- MINIFILTER MET NUMMER
- BORING MET PEILFILTER

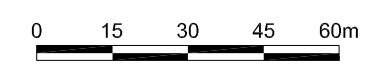
- GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN MEI 1994 (IN µg/L)
(filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)
- GEMETEN GEHALTE BENZEEN IN JAN. 2000 (IN µg/L)
- GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN JAN. 2000 (IN µg/L)
- GEMETEN GEHALTE TOLUEEN IN MEI 1994 (IN µg/L)
(filters 101, 102 en 103 gemeten in 1997)

VERONTREINIGING GRONDWATER MET GEHALTE AAN BENZEEN

- GEHALTE ≤ S-WAARDE (0.2 µg/L)
- GEHALTE > S-WAARDE EN ≤ T-WAARDE (15 µg/L)
- GEHALTE > T-WAARDE EN ≤ I-WAARDE (30 µg/L)
- GEHALTE > I-WAARDE

VERSPREIDING VAN DE VERONTREINIGING IN HET GRONDWATER

- CONTOURLIJN STREEFWAARDE
- CONTOURLIJN TUSSENWAARDE
- CONTOURLIJN INTERVENTIEWAARDE
- GRENS VERONTREINIGING GRONDWATER NIET BEKEND
- LOCATIE PRAKTIJKPROEF



DO	24-01-2003	DEFINITIEF		A.T.
NR			WIJZIGING	GET.

PROVINCIE GRONINGEN

TEKENAAR: A. TOUSSAINT
 PROJECTLEIDER: N. SLIK
 SCHAAL: 1:1500
 FORMAAT: A3

ACTUALISATIE
 VERONTREINIGINGSSITUATIE GRONDWATER
 LOCATIE FLEBO TE HOOGEZAND

TEKENINGNUMMER: 101078-V3
 WIJZ.NR: DO

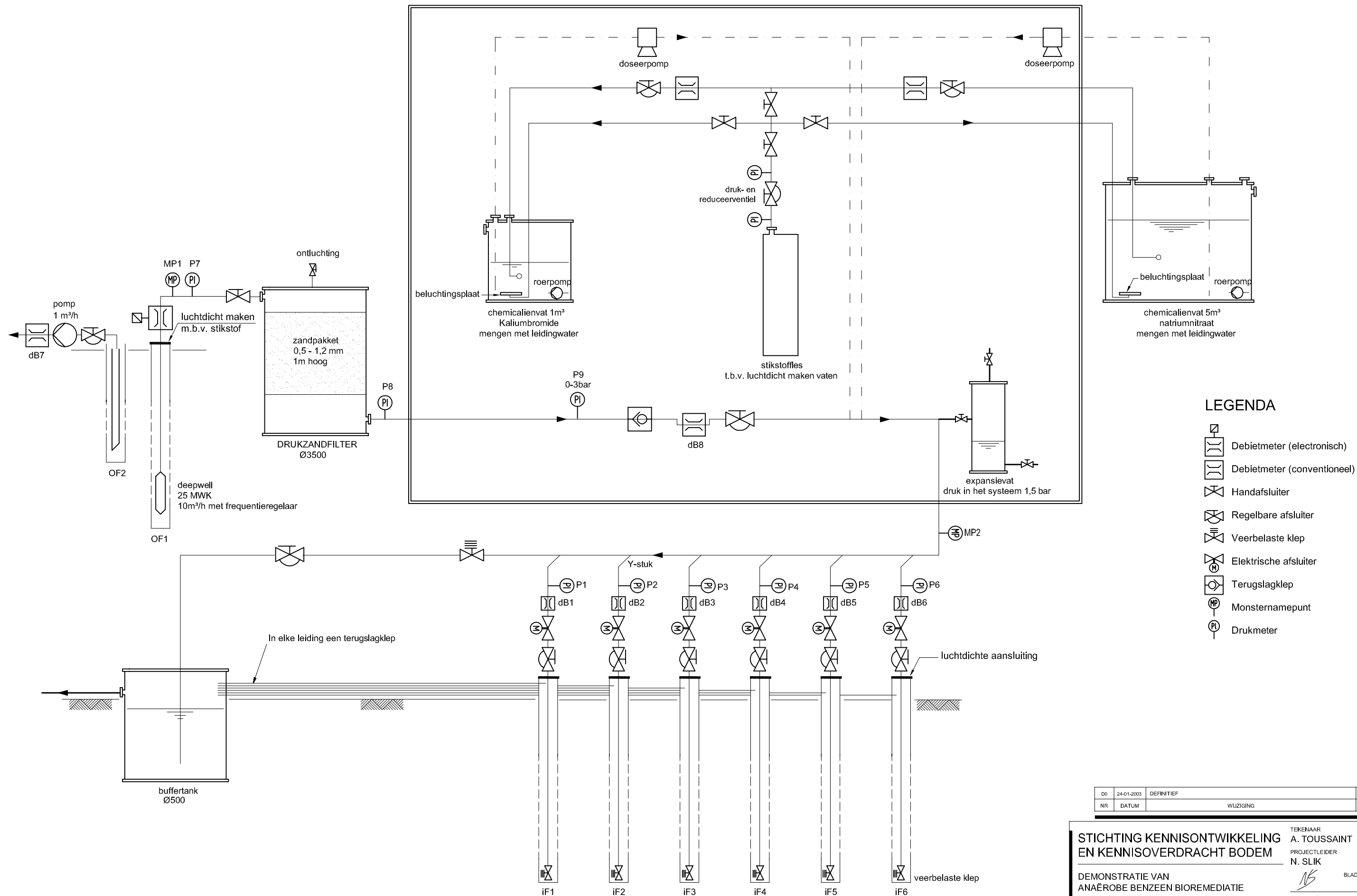
GEHALTEN BENZEEN
 op 20-21m. -mv.

DEFINITIEF

ONDERGROND OVERGEGENOMEN VAN
 TEKENING 46833-V3

BIJLAGE B

ONTWERP VAN DE PRAKTIJKPROEF
(tekening 101078-S3)



- LEGENDA**
- Debietmeter (electronisch)
 - Debietmeter (conventioneel)
 - Handafsluiter
 - Regelbare afsluiter
 - Veerbelaste klep
 - Elektrische afsluiter
 - Terugslagklep
 - Monsternamepunt
 - Drukmeter

DO	24-01-2003	DEFINITIEF	A.T.
NR		WIJZIGING	GET.

STICHTING KENNISONTWIKKELING EN KENNISOVERDRACHT BODEM
 DEMONSTRATIE VAN ANAÉROBE BENZEEN BIOREMEDIATIE
 ONTWERP PRAKTIJKPROEF

TEKENAAR: A. TOUSSAINT
 PROJECTLEIDER: N. SLIK
 TEKENINGNUMMER: 101078-S3

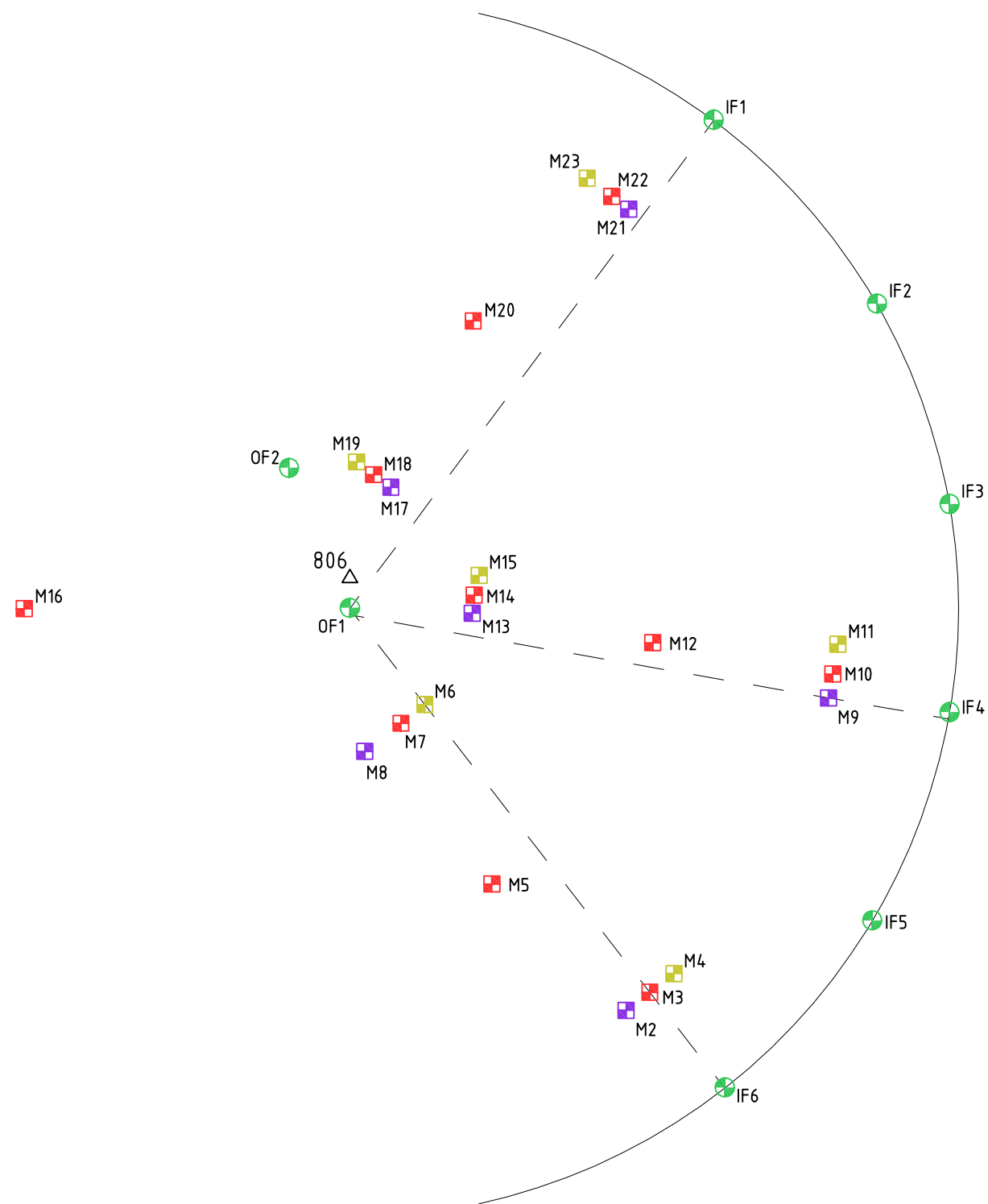
SCHAAAL: n.v.t.
 FORMAAT: A3
 BLAD IN BLADEN: -IN-
 WIJZ.NR: DO

ONDERGROND DIGITAAL AANGELEVERD
DOOR OOSTERHOF-HOLMAN MILIEUTECHNIEK B.V.

DEFINITIEF

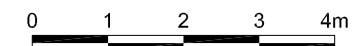
BIJLAGE C

LOCATIE MONITORINGSFILTERS
(tekening 10178-S2)



VERKLARING:

- △ 806 BESTAAND MINIFILTER (filter 11.5-12m.-mv.)
- ⊕ IF6 INFILTRATIEFILTER (filter 5-18m.-mv.)
- ⊕ OF1 ONTTREKKINGSFILTER (filter 10-15m.-mv.)
- ⊕ OF2 ONTTREKKINGSFILTER (filter 3-8m.-mv.)
- ⊕ M11 MINIFILTER MET NUMMER (filter 5-7m. -mv.)
- ⊕ M10 MINIFILTER MET NUMMER (filter 11-13m. -mv.)
- ⊕ M9 MINIFILTER MET NUMMER (filter 15-17m. -mv.)



DO	24-01-2003	DEFINITIEF		A.T.
NR	DATUM	WIJZIGING		GET.

STICHTING KENNISONTWIKKELING EN KENNISOVERDRACHT BODEM	TEKENAAR A. TOUSSAINT	SCHAAL 1:100
DEMONSTRATIE VAN ANAÉROBE BENZEEN BIOREMEDIATIE	PROJECTLEIDER N. SLIK	FORMAAT A3
SITUATIE	TEKENINGNUMMER 101078-S2	BLAD IN BLADEN -IN- WIJZ.NR D0

ONDERGROND GEDIGITALISEERD
VAN SCHETS

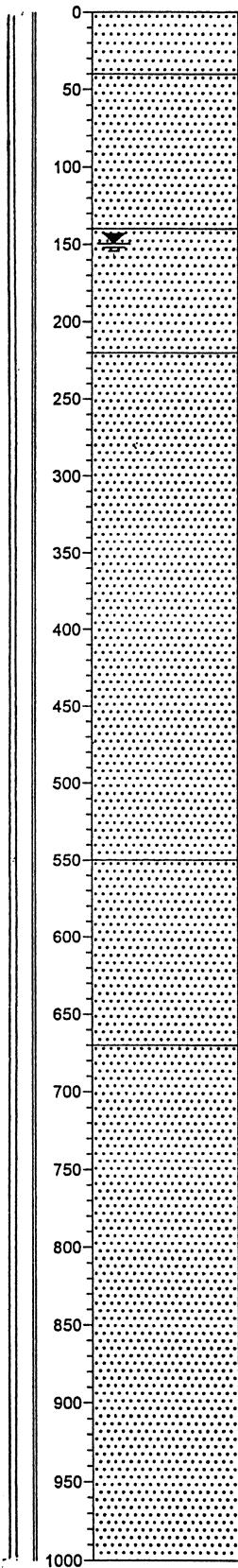
DEFINITIEF



BIJLAGE D

BOORPROFIELEN

OF1. 11-4-01
Diepte: 1650 cm.



▲ Zand, matig fijn. Bruingrijs-bruin, resten hout, resten puin, resten ijzer.

▲ Zand, matig fijn. Bruin, resten puin; resten hout.

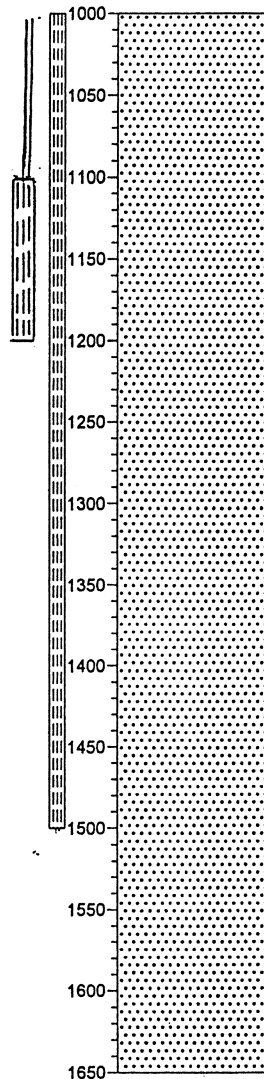
▲ Zand, matig fijn. Donkergrijs-donkerbruin, resten puin, resten hout, sterk slijmhoudend, sterke/matige olie-/teergeur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, matige/sterke olie-/teer-/H2S-geur.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, brokken klei, matige/lichte olie-/teer-/H2S-geur.

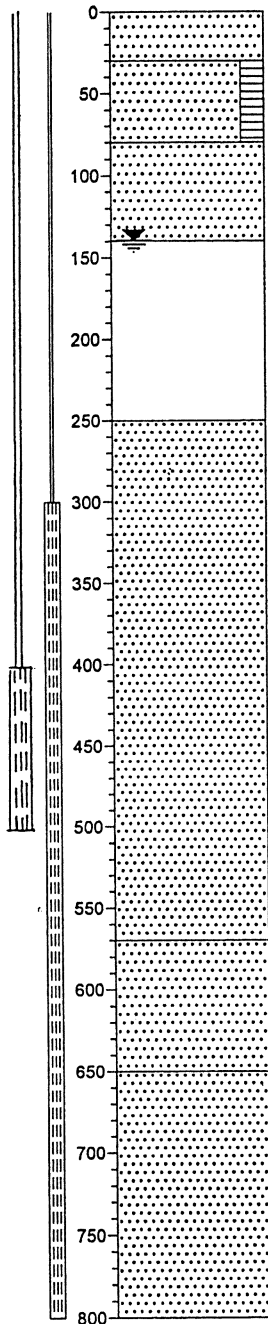
Zand, matig fijn. Lichtgrijs, lichte/matige olie-/teer-/H2S-geur.

OF1. 11-4-01
Diepte: 1650 cm.



Zand, matig fijn. Lichtgrijs, lichte/matige olie-/teer-/H2S-geur.

OF2. 10-4-01
Diepte: 800 cm.



▲ Zand, matig fijn. Bruingrijs-bruin, resten puin, resten hout.

▲ Zand, matig fijn, matig humeus. Donkergrijs, resten puin, resten hout.

▲ Zand, matig fijn. Bruin, resten puin, resten hout, resten ijzer, asresten.

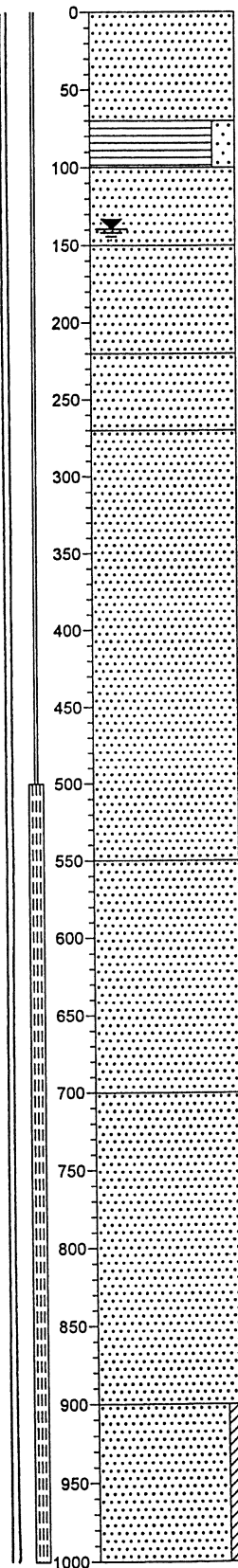
Stortmateriaal, st./m. olie-/teergeur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m/st. olie-/teer-/H₂S geur, gaslucht.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, brokken klei, m.l. olie-/teer-/H₂S-geur, gaslucht.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, l./m. olie-/teer-/H₂S-geur, gaslucht.

IF1. 4-4-01
Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn. Donkerbruin-donkergrijs, resten puin, resten ijzer, resten hout, gestort materiaal.

Veen, matig zandlg. Bruin, geroerd.

▲ Zand, matig fijn. Lichtbruin-bruin, resten puin, resten veen, geroerd.

▲ Zand, zeer fijn. Bruingrijs-bruin, resten puin, resten hout, resten ijzer, sterk slijhoudend, gestort materiaal, sterke oliegeur.

Zand, matig fijn. Lichtbruin-lichtgrijs, sterke/matige olie-/H₂S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, matige/sterke olie-/H₂S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, sterke/matige olie-/H₂S-geur.

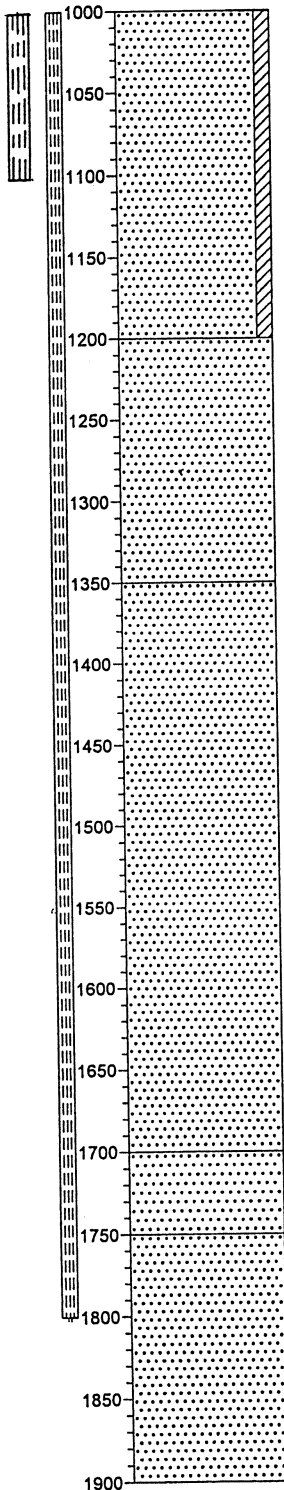
Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, matige/sterke olie-/H₂S-geur.

Zand, matig fijn, zwak kleifg. Lichtgrijs-grijs, st./m. olie-/H₂S-geur, venige kleibandjes.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

IF1. 4-4-01

Diepte: 1900 cm.



Zand, matig fijn, zwak kleiig.
Lichtgrijs-grijs, st./m. olie-/H₂S-geur
venige kleibandjes.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
matige/sterke olie-/H₂S-geur.

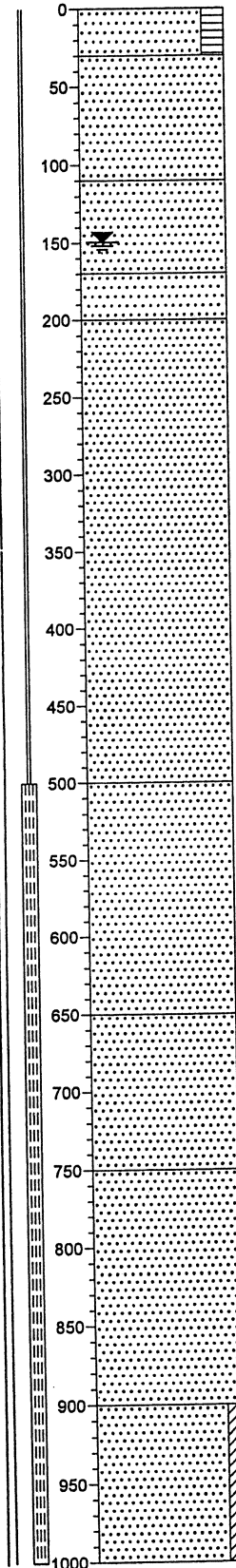
▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
resten hout, resten planten, matig
slibhoudend, lichte/matige olie-/H₂S-
geur.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
resten hout, m/l olie-/H₂S-geur,
kleibandjes.

▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
resten klei, resten hout, resten
planten, lichte/zeer lichte olie-/H₂S-
geur.

IF2. 5-4-01

Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn, matig humeus.
Donkergrijs-donkerbruin, resten
puin.

▲ Zand, matig fijn. Donkerbruin-
donkergrijs, resten puin, resten
hout, resten ijzer, asresten, gestort
materiaal.

▲ Zand, matig fijn. Donkerbruin-bruin,
resten puin, resten veen.

▲ Zand, zeer fijn. Donkergrijs-
donkerbruin, sterk slibhoudend,
resten puin, resten hout,
sterke/matige oliegeur.
Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
matige/sterke olie-/H₂S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m.
/st. olie-/H₂S-geur, beeklembandjes.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m./l.
olie-/H₂S-geur, beeklembandjes.

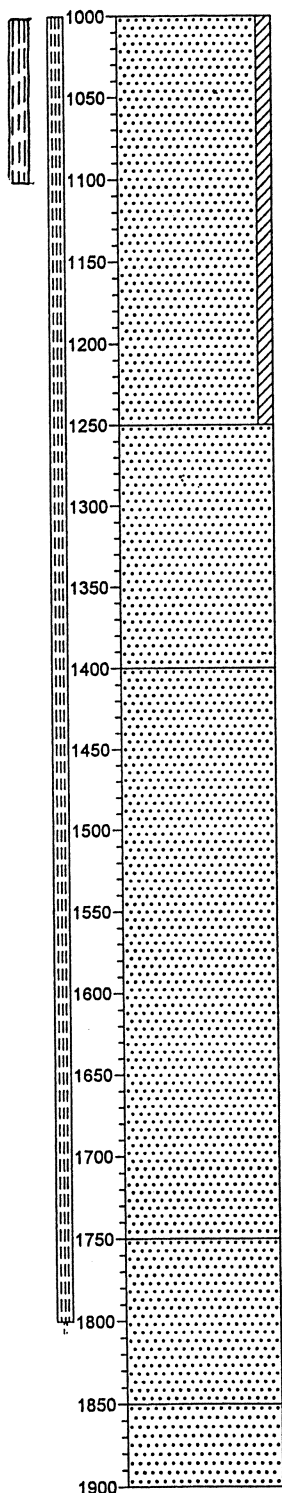
Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
matige/lichte olie-/H₂S-geur.

Zand, matig fijn, zwak kleiig.
Lichtgrijs-grijs, m./st. olie-/H₂S-geur
venige kleibandjes.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

IF2. 5-4-01

Diepte: 1900 cm.



Zand, matig fijn, zwak kleiïg.
Lichtgrijs-grijs, m./st. olie-/H2S-geur
venige kleibandjes.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
matige/lichte olie-/H2S-geur.

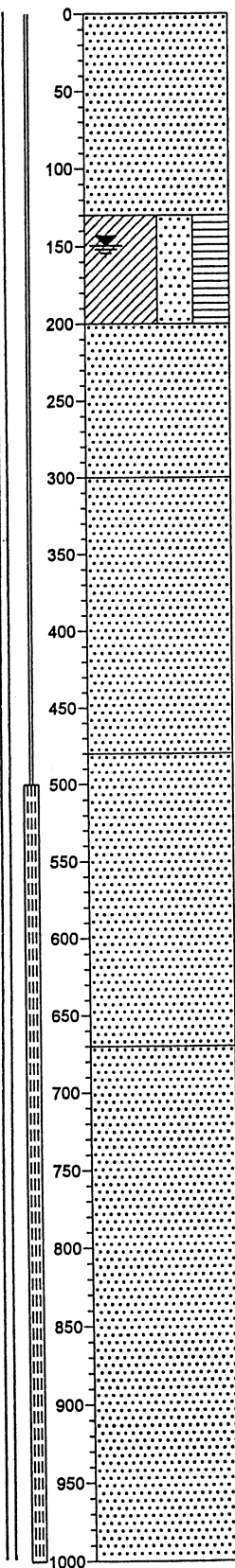
Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
lichte/matige olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
brokken klei, matig slibhoudend,
resten hout, lichte/zeer lichte olie-
/H2S-geur.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
zeer lichte/lichte olie-/H2S-geur.

IF3. 6-4-01

Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn. Donkerbruin-
donkergrijs, resten puin, resten
hout, geroerd.

▲ Klei, uiterst zandig, uiterst humeus.
Donkergrijs, uiterst veenhoudend,
resten puin, resten hout, sterk slib-
houdend, s/m ollegeur, plantenresten,
rietresten.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
matige/lichte olie-/H2S-geur.

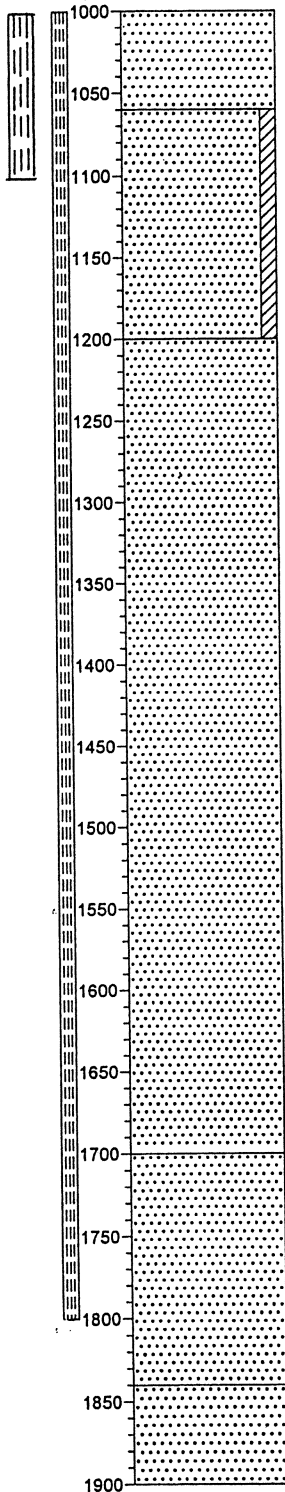
Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
lichte/matige olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m./l.
/olie-/H2S-geur, beekleemiaagjes.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
lichte/matige olie-/H2S-geur.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

IF3. 6-4-01
Diepte: 1900 cm.



Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, lichte-/matige olie-/H2S-geur.

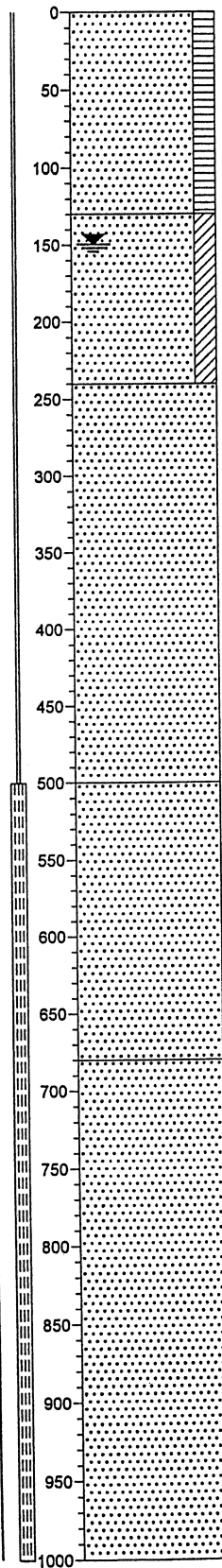
▲ Zand, matig fijn, zwak kleiig. Lichtgrijs-grijs, resten hout, resten planten, matige/lichte olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, lichte-/matige olie-/H2S-geur.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, brokken klei, resten hout, resten planten, lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

IF4. 10-4-01
Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn, matig humeus. Donkerbruin-donkergrijs, resten puin, resten hout.

▲ Zand, zeer fijn, matig kleiig. Donkergrijs, resten veen, resten hout, resten puin, sterk slijmhoudend, st/m ollegeur, gestort materiaal.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m./st. olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m./st. olie-/H2S-geur, beekleembandjes.

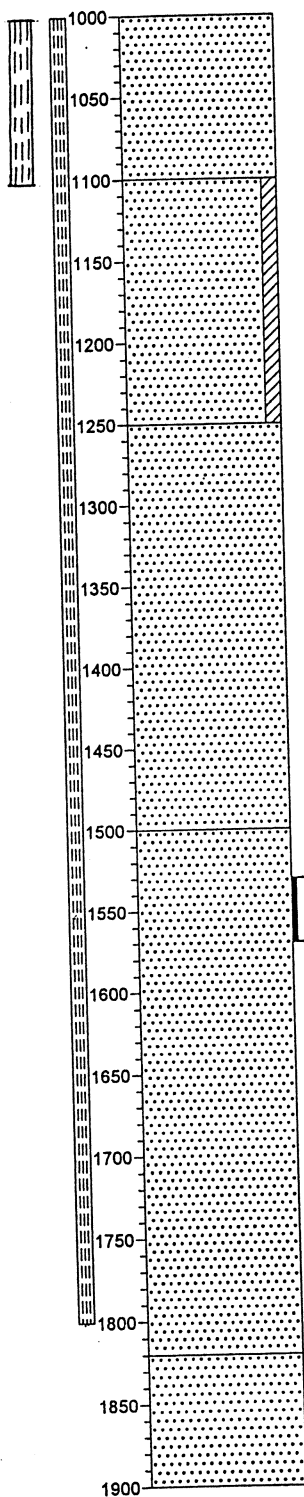
Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, matige/lichte olie-/H2S-geur.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

Boorstaten

IF4. 10-4-01

Diepte: 1900 cm.



Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, m.
/st. olie-/H2S-geur, met klei
gelaagd.

▲ Zand, matig fijn, zwak kleiig.
Lichtgrijs-grijs, brokken klei,
matige/lichte olie-/H2S-geur.

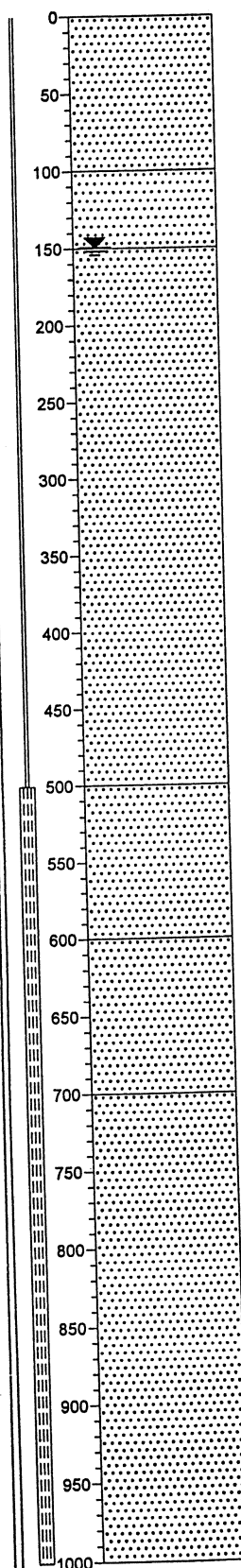
Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
lichte/matige olie-/H2S-geur.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
brokken klei, zeer lichte/lichte olie-
/H2S-geur.

IF5. 12-4-01

Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn. Donkerbruin-
donkergrijs, resten puin, resten
hout, resten ijzer, asresten.

▲ Zand, zeer fijn. Donkergrijs, matig
slibhoudend, resten puin,
sterke/matige ollegeur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
matige/lichte olie-/H2S geur.

▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
brokken klei, lichte/matige olie-/H2S-
geur.

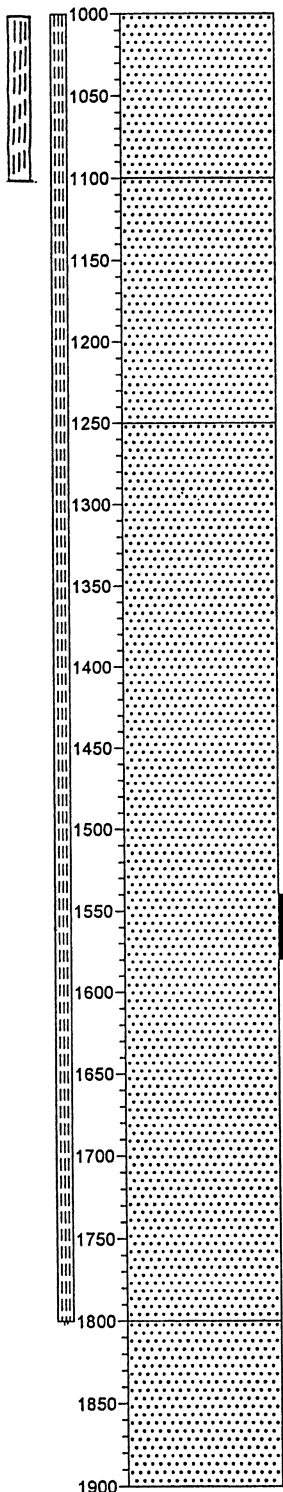
▲ Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
resten hout, resten planten,
beekleembandjes, m/l olie-/H2S-
geur.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

IF5. 12-4-01

Diepte: 1900 cm.



Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

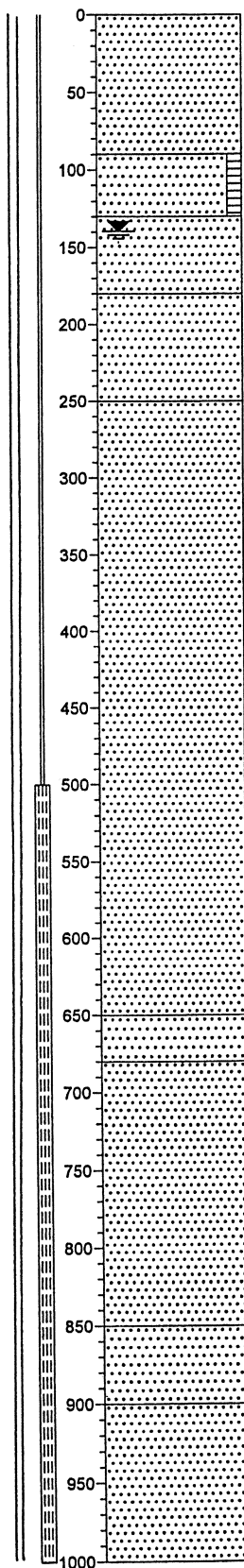
Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, klelbandjes, l/m olie-/H2S-geur.

Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, lichte/zeer lichte olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs, resten klei, zeer lichte/lichte olie-/H2S-geur.

IF6. 3-4-01

Diepte: 1900 cm.



▲ Zand, matig fijn. Donkergrijs-donkerbruin, resten puin, resten hout.

▲ Zand, matig fijn, zwak humeus. Donkergrijs, zwak veenhoudend.

Zand, matig fijn. Roodbruin-bruin, matige/lichte olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtbruin, matige/sterke olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, matige/sterke olie-/H2S-geur.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs, st./m. olie-/H2S-geur, beekleembandjes.

Zand, matig grof. Lichtgrijs, matige/lichte olie-/H2S-geur.

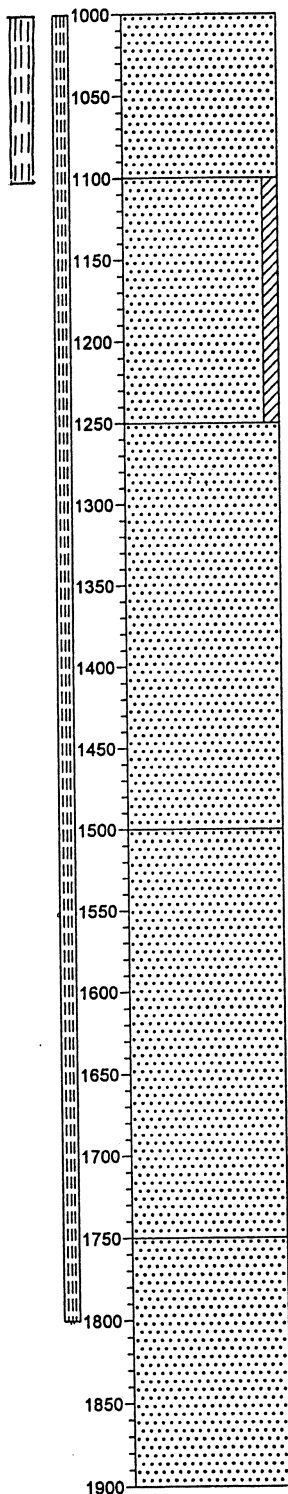
Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, st./m. olie-/H2S-geur, beekleembandjes.

Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs, matige/sterke olie-/H2S-geur.

Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

IF6. 3-4-01

Diepte: 1900 cm.



Zand, matig fijn. Lichtgrijs-grijs,
matige/sterke olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig fijn, zwak klei'g.
Lichtgrijs-grijs, resten planten,
resten hout, st/m. olie-/H2S-geur,
kleibandjes.

▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs-grijs,
matig slijmhoudend, matige/sterke
olie-/H2S-geur.

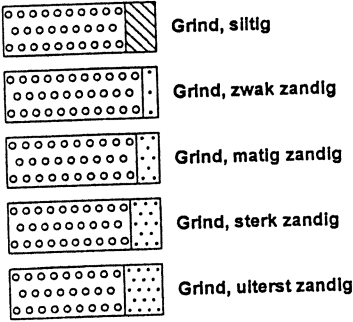
Zand, matig grof. Lichtgrijs,
lichte/matige olie-/H2S-geur.

▲ Zand, matig grof. Lichtgrijs, resten
hout, resten klei, lichte/zeer lichte
olie-/H2S-geur.

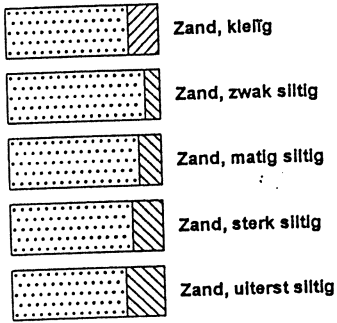
Projectnr: VN-22260 Locatie: Hoogezand

Legenda (conform NEN 5104)

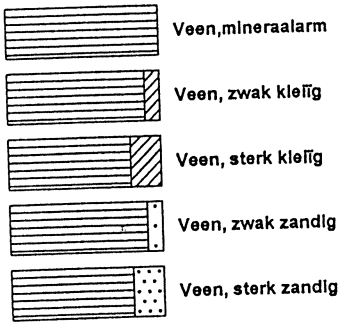
grind



zand



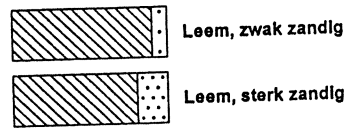
veen



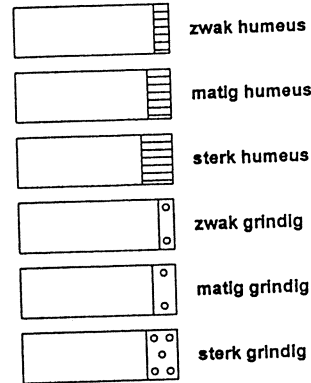
klei



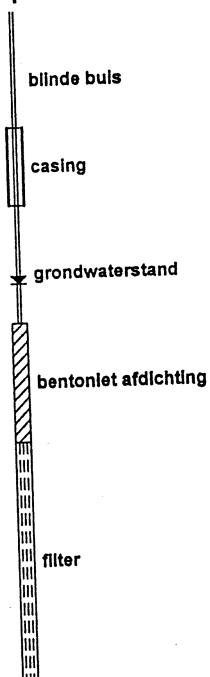
leem



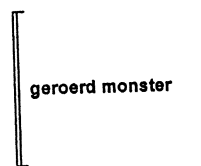
overige toevoegingen



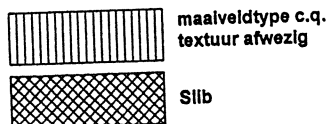
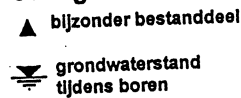
peilbuis



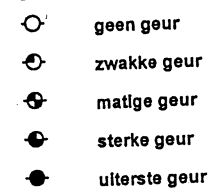
monsters



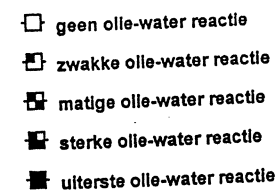
overig



geur



olie



BIJLAGE E

RESULTATEN NULSITUATIE

Bijlage e: Resultaten nulsituatie

Project : Flebo Hoogezand

Projectnummer : 101078

**Analyses peilbuizen**

Gehalten in µg/l, tenzij anders weergegeven

Peilbuis	Filterdiepte	Datum	Benzeen	Ethylbenzeen	Tolueen	Xylenen	Nitraat (mg/l)	Nitriet (mg/l)
M01	11,0 - 13,0	19-04-01	420,0	<2,0	2,1	<5,0	<0,44	<0,03
M02	15,0 - 17,0	19-04-01	16,0	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M03	11,0 - 13,0	18-04-01	220,0	<0,2	20,0	<0,5	<0,44	<0,1
M04	5,0 - 7,0	19-04-01	15,0	<0,2	2,5	0,5	<0,44	<0,1
M05	11,0 - 13,0	19-04-01	200,0	<40,0	180,0	<100,0	<0,44	<0,1
M06	5,0 - 7,0	18-04-01	0,5	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M07	11,0 - 13,0	18-04-01	310,0	<20,0	1000,0	<50,0	1,8	<0,1
M08	15,0 - 17,0	18-04-01	14,0	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M09	15,0 - 17,0	19-04-01					<0,44	<0,1
M10	11,0 - 13,0	18-04-01	240,0	<0,2	44,0	<0,5	<0,1	<0,1
M11	5,0 - 7,0	19-04-01	4,4	<0,2	<0,2	0,5	<0,44	<0,1
M12	11,0 - 13,0	18-04-01	300,0	<20,0	630,0	<50,0	1,4	<0,1
M13	15,0 - 17,0	18-04-01	19,0	<0,2	<0,2		<0,44	<0,1
M14	11,0 - 13,0	18-04-01	260,0	<20,0	160,0	<50,0	<0,44	<0,1
M15	5,0 - 7,0	18-04-01	2,0	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M16	11,0 - 13,0	19-04-01	190,0	<40,0	44,0	<100,0	<0,44	<0,1
M17	15,0 - 17,0	18-04-01	24,0	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M18	11,0 - 13,0	18-04-01	270,0	<20,0	36,0	<50,0	<0,44	<0,1
M19	5,0 - 7,0	18-04-01	0,8	<0,2	<0,2		<0,44	<0,1
		19-04-01	49,0	<0,2	<0,2	<0,5		
M20	11,0 - 13,0	19-04-01	340,0	<40,0	46,0	<100,0	<0,44	<0,1
M21	15,0 - 17,0	19-04-01	25,0	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
M22	11,0 - 13,0	18-04-01	440,0		94,0	<50,0	0,71	<0,1
M23	5,0 - 7,0	19-04-01	<0,2	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1
OF 1	11,0 - 12,0	19-04-01	280,0	<40,0	1200,0	<100,0	2,2	<0,1
OF 2	0,0 - 0,0	19-04-01	1,4	<0,2	<0,2	<0,5	<0,44	<0,1

Bijlage e: Resultaten nulsituatie

Project : Flebo Hoogezand

Projectnummer : 101078

**Analyses peilbuizen**

Gehalten in µg/l, tenzij anders weergegeven

Peilbuis	Filterdiepte	Datum	EC (µs/cm)	pH	Redox (mV)	ijzer (mg/l)	Ammonium (mg/l)	Sulfaat (mg/l)	Sulfide
M01	11,0 - 13,0	19-04-01	300,0	6,6	310,0	51,0	16,0	530,0	0,16
M02	15,0 - 17,0	19-04-01	500,0	6,6	62,0	21,0	11,0	35,0	0,02
M03	11,0 - 13,0	18-04-01	2200,0	6,6	256,0	6,7	12,0	250,0	0,64
M04	5,0 - 7,0	19-04-01	1100,0	6,7	179,0	14,0	14,0	160,0	0,024
M05	11,0 - 13,0	19-04-01	5300,0	6,9	317,0	2,7	0,57	910,0	220,0
M06	5,0 - 7,0	18-04-01	1300,0	6,6	275,0	2,2	4,7	51,0	0,045
M07	11,0 - 13,0	18-04-01	8400,0	7,1	397,0	7,7	<0,065	1600,0	700,0
M08	15,0 - 17,0	18-04-01	400,0	5,6	216,0	26,0	9,4	39,0	0,03
M09	15,0 - 17,0	19-04-01	700,0	6,6	249,0	29,0	12,0	86,0	0,032
M10	11,0 - 13,0	18-04-01	3100,0	6,4	367,0	20,0	14,0	470,0	15,0
M11	5,0 - 7,0	19-04-01	1000,0	7,1	316,0	0,62	14,0	94,0	9,8
M12	11,0 - 13,0	18-04-01	8500,0	7,1	362,0	16,0	48,0	1900,0	500,0
M13	15,0 - 17,0	18-04-01	700,0	6,5	140,0	28,0	8,2	54,0	0,092
M14	11,0 - 13,0	18-04-01	4800,0	6,8	364,0	5,6	25,0	1000,0	260,0
M15	5,0 - 7,0	18-04-01	500,0	6,6	263,0	3,6	12,0	73,0	0,089
M16	11,0 - 13,0	19-04-01	300,0	7,0	357,0	0,21	0,42	330,0	210,0
M17	15,0 - 17,0	18-04-01	500,0	6,2	187,0	30,0	8,0	57,0	0,13
M18	11,0 - 13,0	18-04-01	4200,0	6,6	350,0	2,0	16,0	550,0	170,0
M19	5,0 - 7,0	18-04-01	500,0	6,9	293,0	2,1	6,0	43,0	0,064
M20	11,0 - 13,0	19-04-01	4400,0	7,0	408,0	5,3	24,0	590,0	310,0
M21	15,0 - 17,0	19-04-01	500,0	6,5	87,0	23,0	9,5	69,0	0,13
M22	11,0 - 13,0	18-04-01	8400,0	7,0	363,0	7,5	31,0	220,0	
M23	5,0 - 7,0	19-04-01	700,0	6,8	146,0	5,3	2,7	79,0	0,012
OF 1	11,0 - 12,0	19-04-01				1,2	42,0	1700,0	840,0
OF 2	0,0 - 0,0	19-04-01				7,3	11,0	140,0	<0,01

BIJLAGE F

GEMETEN GEHALTEN NITRAAT TIJDENS DE INFILTRATIE

Gemeten gehalten nitraat tijdens de eerste infiltratieproef (gemeten op proeflocatie met fotometer)

Start infiltratie: 24-4-2001

Einde infiltratie: 8-5-2001

Gemeten gehalten nitraat tijdens de infiltratie (in mg/l)														
Monsterpunt	25-apr	26-apr	27-apr	28-apr	29-apr	30-apr	1-mei	2-mei	3-mei	4-mei	5-mei	6-mei	7-mei	8-mei
M1			6,2	0,2	1,6	1,5		7,3	3,3	4,6			4,0	6,0
M2	15,2	181,0	256,0	266,0	263,0		461,0	334,0	329,0	270,0			202,9	264,0
M3	6,6		58,0		308,0		213,0	259,0	253,0	241,0			197,1	186,0
M4	62,0	318,0	85,0		120,0		198,0	221,0	236,0	248,0			238,3	235,0
M5		39,2	57,0		21,0	1,9	13,7	56,6	54,9	46,5	23,0	42,7	57,1	70,4
M6	190,0	6,1	0,2	2	0,7	0,0	0,0	0,8	0,7	6,6			0,0	0,0
M7	215,0	81,5	7,0	19,2	16,9	13,7	60,3	79,8	106,0	193,0	205,0	151,0	178,9	233,0
M8	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M9	1,5	164,0	236,0				380,0	388,0	420,0	308,0			214,9	175,0
M10	11,3	50,9	48,0				74,9	216,0	258,0	307,0			290,2	262,0
M11	42,0	3,4	101,0				183,0	117,0	182,0	170,0			145,7	171,0
M12	0,0	2,1	180,0				93,5	186,0	193,0	167,0			167,0	159,0
M13		14,5	14,3	8,3	30,0	49,4	53,5	171,0	177,0	202,0			242,3	270,0
M14	41,2	78,4	16,7	5,5	7,5	10,0	15,6	27,8	50,1	88,6	18,7	28,8	41,8	68,2
M15	0,3	2,6	0,0	0,0	0,0	14,6	36,0	0,6	0,0	0,0		0,0	14,5	0,0
M16		76,2	37,6				26,4	42,7	43,4	38,8	33,0	21,3	40,7	21,4
M17	0,0	0,8	7,0			86,6	28,7	85,8	90,4	164,0	187,0	228,0	188,3	154,0
M18	43,1	36,1	22,4			0,9	40,8	30,1	28,3	30,0	26,6	29,7	26,8	29,1
M19	0,3	0,0	0,0			0,2	1,9	5,7	2,3	1,7	82,0	95,0	114,3	1,3
M20	41,0	3,5	72,2				51,7	67,0	65,1	70,4	100,0	153,0	77,1	76,0
M21	2,4		4,3				18,2	14,8	140,0	12,5			62,0	21,0
M22	69,1	102,8	91,7				138,0	88,0	73,5	103,0			72,2	77,0
M23	62,0	74,4	6,6				16,3	205,0	149,0	257,0			203,8	186,0
MP1	25,6	41,0	25,2	9,5	11,2	22,5	39,1	35,2	38,5	49,6	39,0	47,4	54,9	53,2
MP2	310,0	611,0	500,0	197,0	218,0	258,0	250,0	228,0	186,0	256,0	278,0	291,0	296,8	296,0

Gemeten gehalten nitraat tijdens de tweede infiltratieproef (gemeten in extern laboratorium)

Start infiltratie: 13-7-2001

Einde infiltratie: 31-7-2001

Gemeten gehalten nitaat tijdens de infiltratie (in mg/l)								
Monsterpunt	17-jul	18-jul	19-jul	20-jul	23-jul	25-jul	27-jul	30-jul
M1							< 0,44	< 0,44
M2		< 0,44		280,0	120,0	97,0	170,0	240
M3		< 0,44		17,0	53,0	55,0	68,0	130
M4		< 0,44		260,0	120,0	68,0	160,0	21
M5		< 0,44		< 0,44	33,0	2,6	0,7	5,2
M6		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M7		< 0,44		< 0,44	100,0	< 0,44	1,3	62,0
M8		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	7,5	12,0
M9		70		260,0	100,0	110,0	190,0	240
M10		0,97		97,0	100,0	1,8	13,0	180
M11		65		310,0	120,0	13,0	91,0	170
M12		< 0,44		< 0,44	< 0,44	4,4		1,3
M13		2,0		< 0,44	130,0	190,0	78,0	220
M14		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M15		< 0,44		8,0	15,0	45,0	53,0	60,0
M16							< 0,44	< 0,44
M17		5,6		< 0,44	70,0	51,0	59,0	23,0
M18		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M19		2,9		13,0	17,0	64,0	75,0	170,0
M20		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M21		< 0,44		80,0	150,0	110,0	110,0	110,0
M22		< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M23		< 0,44		93,0	190,0	120,0	150,0	170,0
OF1								
MP1	21,0	1,8	7,6	< 0,44	32,0	13,0	31,0	44,0
MP2	580,0	280,0	240,0	220,0	220,0	230,0	260,0	300,0

Gemeten gehalten nitraat tijdens de derde infiltratieproef (gemeten in extern Laboratorium)

Start infiltratie: 28-11-2001

Einde infiltratie: 14-12-2001

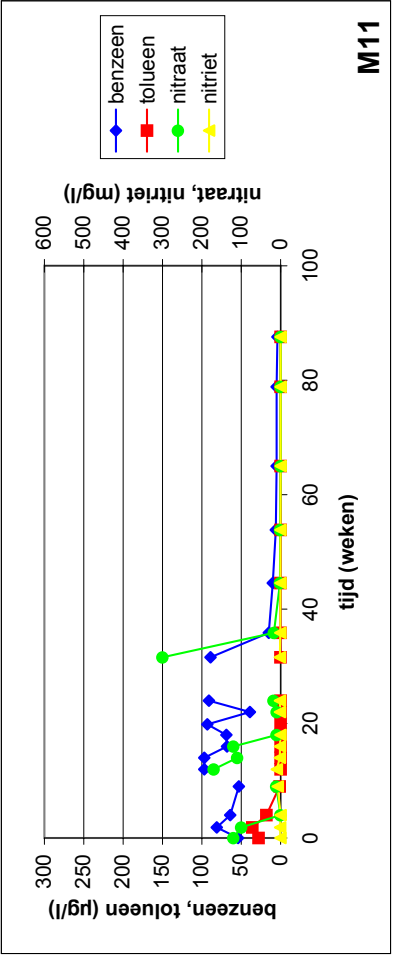
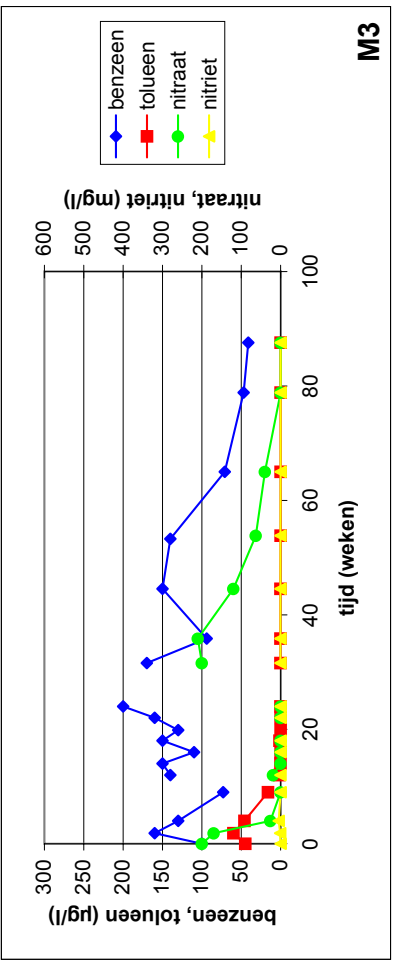
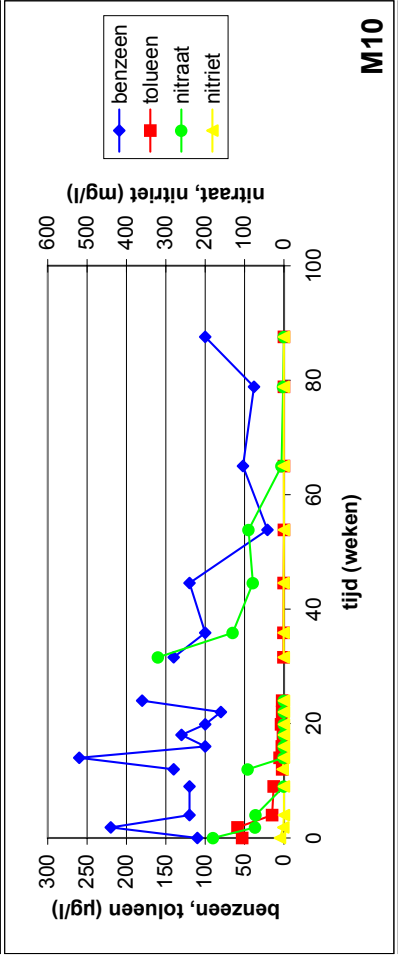
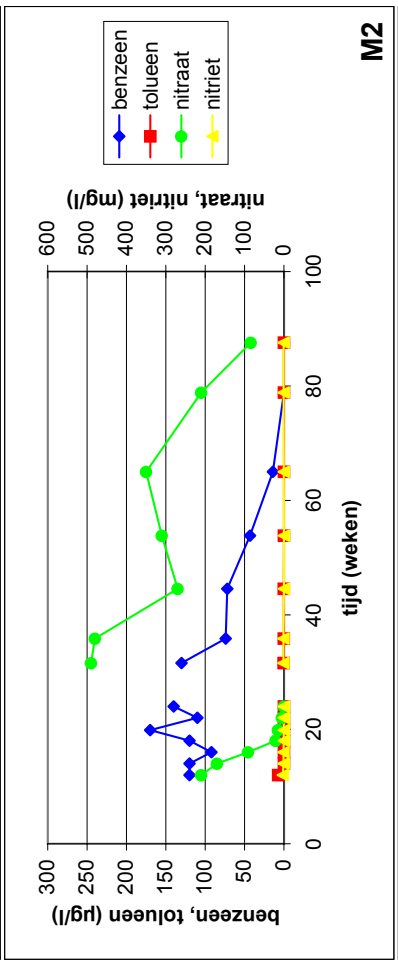
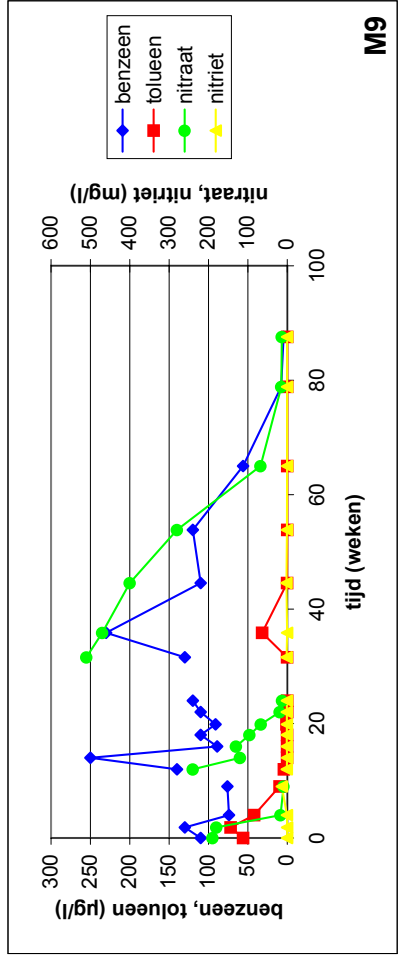
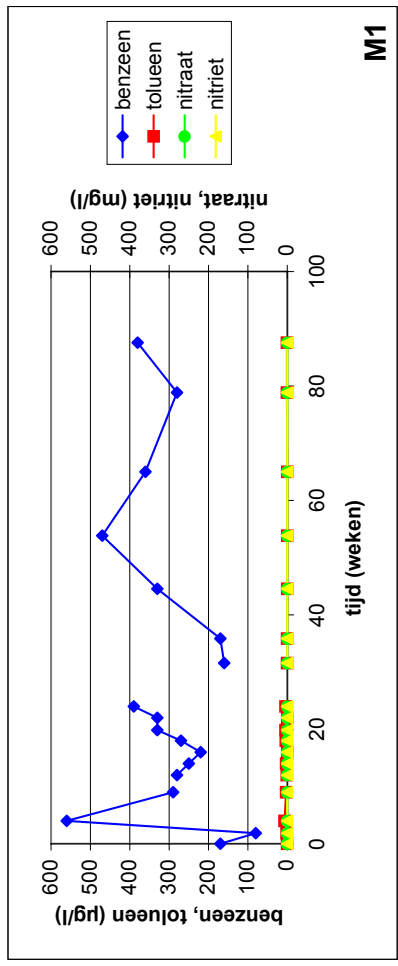
Gemeten gehalten nitraat tijdens infiltratie (in mg/l)								
Monsterpunt	29-nov	30-nov	3-dec	4-dec	5-dec	7-dec	10-dec	13-dec
M1			< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M2		430,0	550,0		440,0	570,0	500,0	
M3		300,0	520,0		680,0	550	490,0	
M4		< 0,44	< 0,44		< 0,44	< 0,44	15,0	
M5		< 0,44	27,0		12,0	280	42,0	
M6			< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M7		< 0,44	83,0		220,0	270	230,0	250,0
M8		< 0,44	< 0,44		15,0	22	22,0	140,0
M9		310,0	600,0		280,0	550	520	510
M10		94,0	380,0		500,0	470	430	460
M11		10,0	350,0		26,0	290	260	< 0,44
M12		< 0,44	0,8		98,0	140	30	61
M13		4,1	490,0		600,0	430,0	440,0	400,0
M14		< 0,44	0,5		< 0,44	0,9	140,0	99,0
M15		< 0,44	< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M16		< 0,44	< 0,44		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M17		< 0,44	130,0		87,0	210	33	160,0
M18		< 0,44	< 0,44		< 0,44	< 0,44	4,9	5,9
M19		< 0,44	1,4		0,7	5,7	< 0,44	4,0
M20		< 0,44	0,5		< 0,44	< 0,44	< 0,44	< 0,44
M21		< 0,44	530		690,0		400	490
M22		< 0,44	4,8		77,0	420	68	2,6
M23		20,0	280,0		310,0	260	290	220
OF1								
MP1 (opgepompt)		0,5	45,0		18,0	110,0		160,0
MP2 (ingebracht)	820	340,0	840,0	620,0	560,0	590,0	510,0	430,0

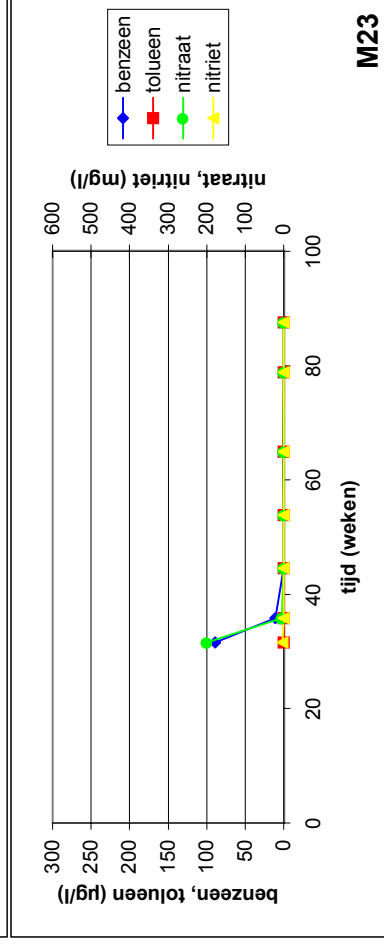
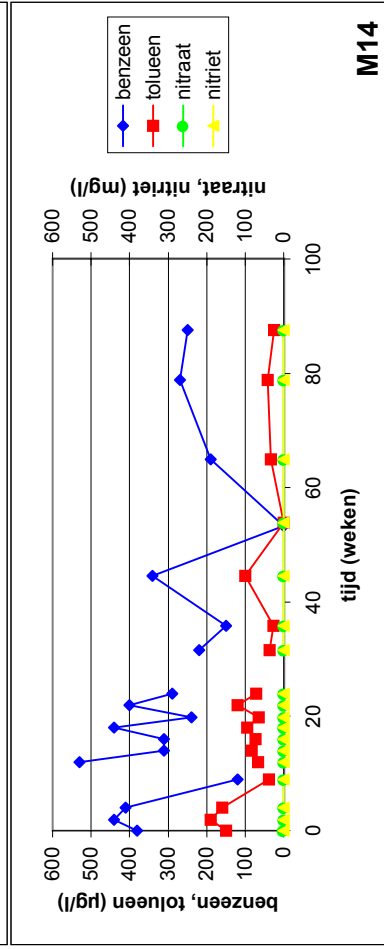
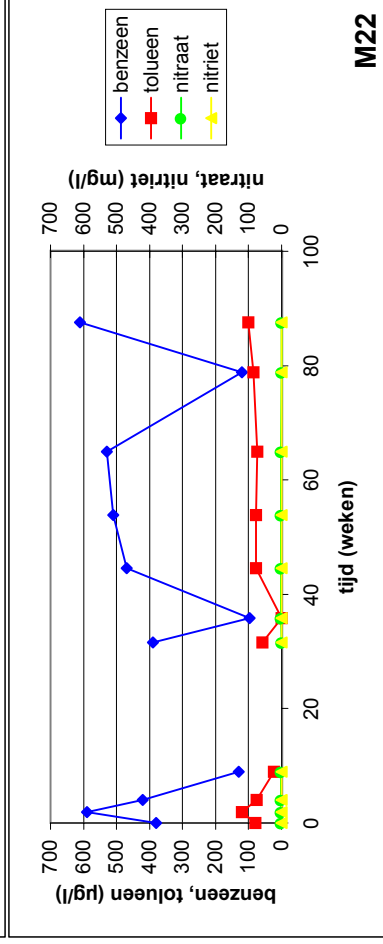
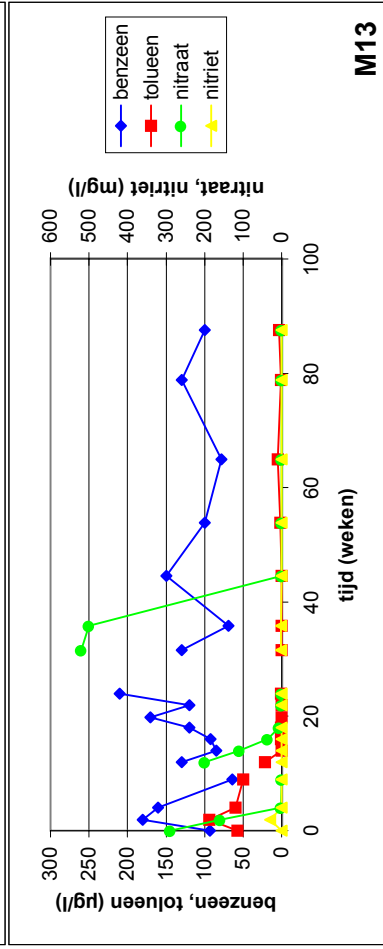
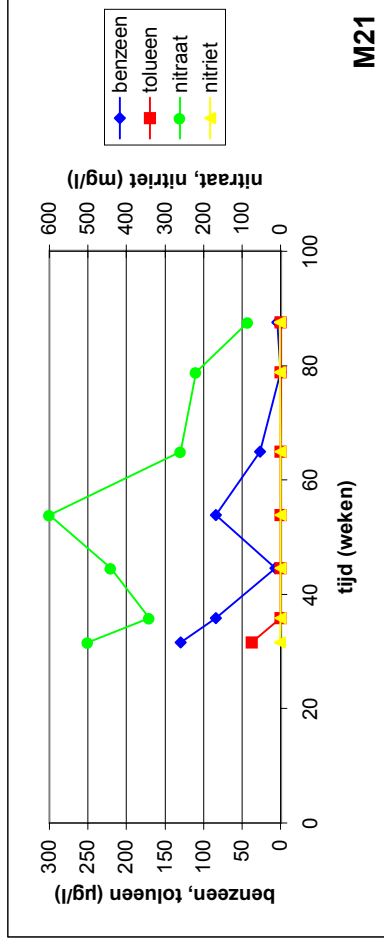
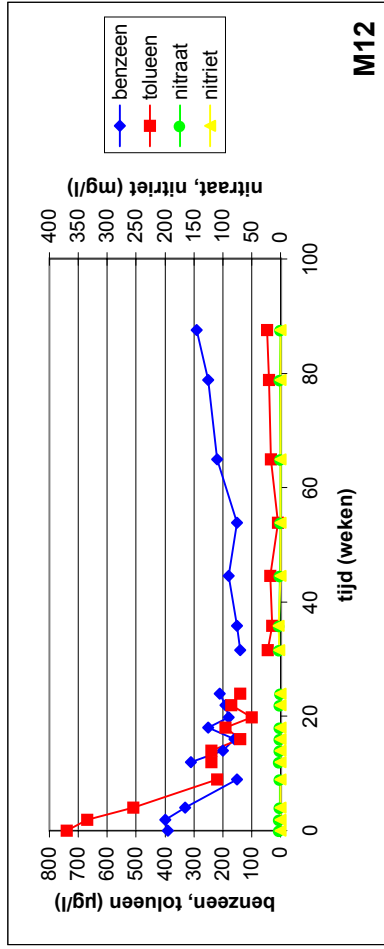
BIJLAGE G

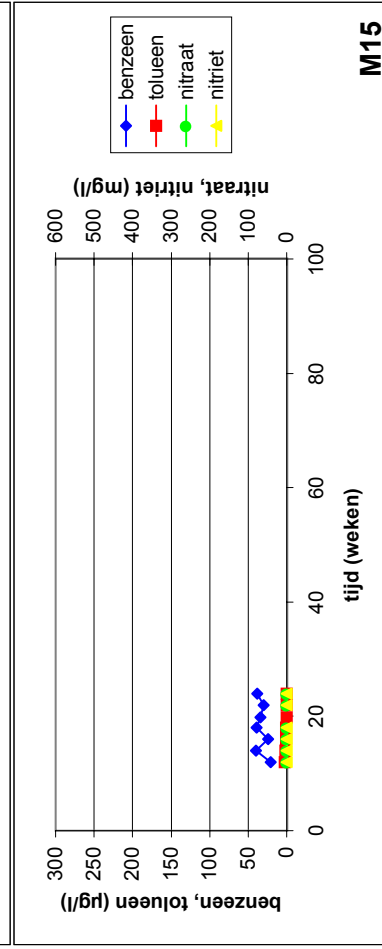
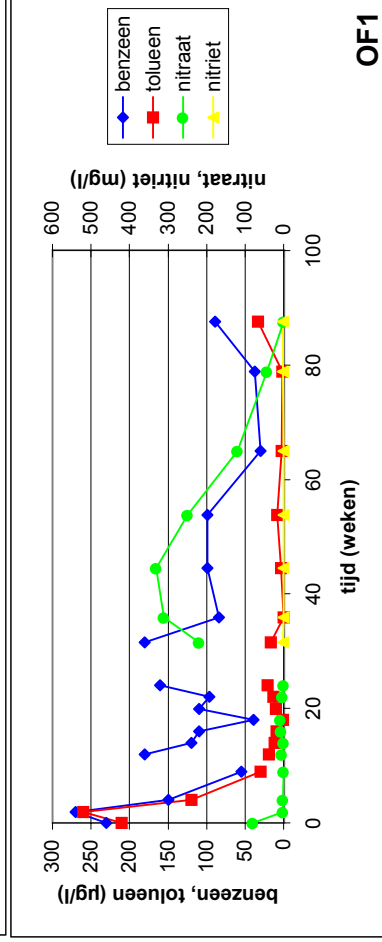
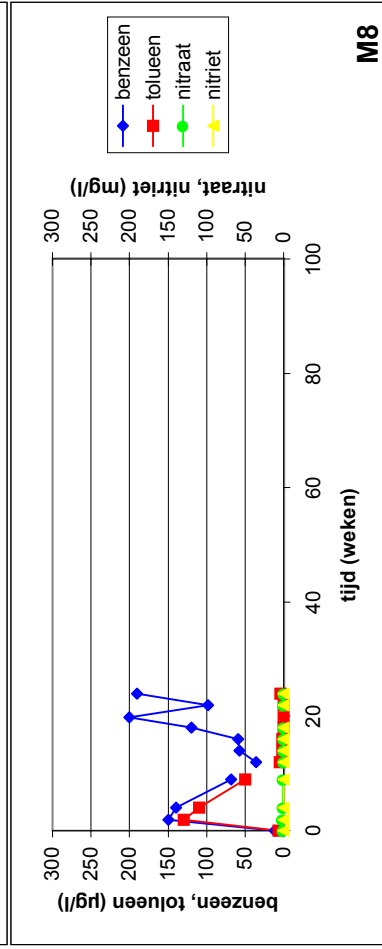
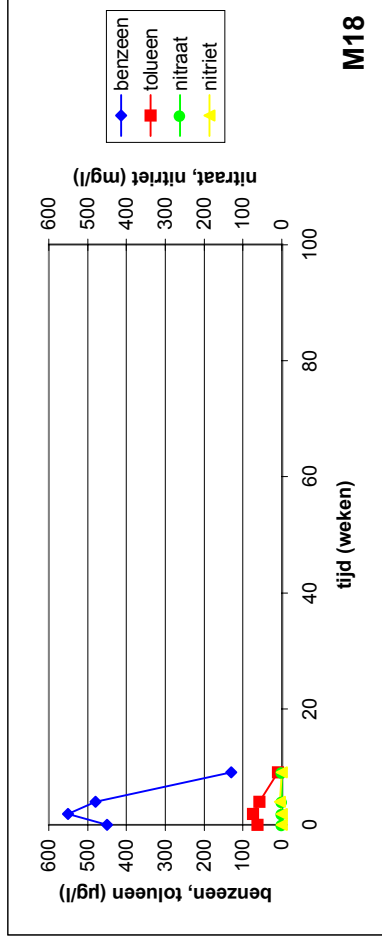
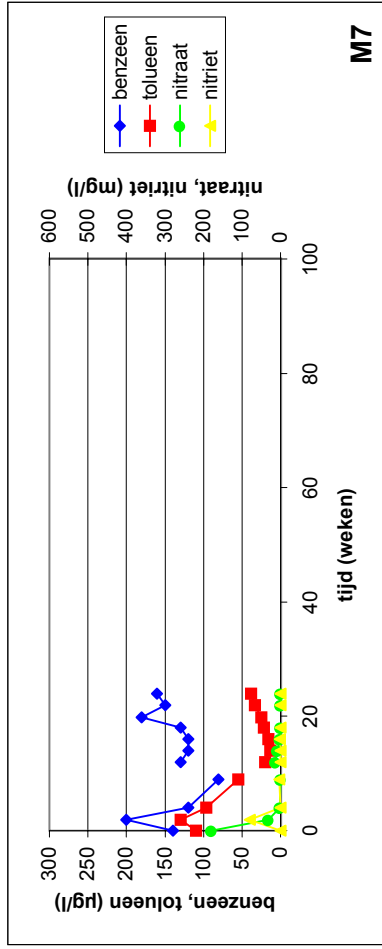
GEMETEN GEHALTEN BROMIDE TIJDENS DE INFILTRATIE

BIJLAGE H

**VERLOOP GEMETEN GEHALTEN BENZEEN, TOLUEEN, NITRAAT EN NITRIET
IN DE BODEM**



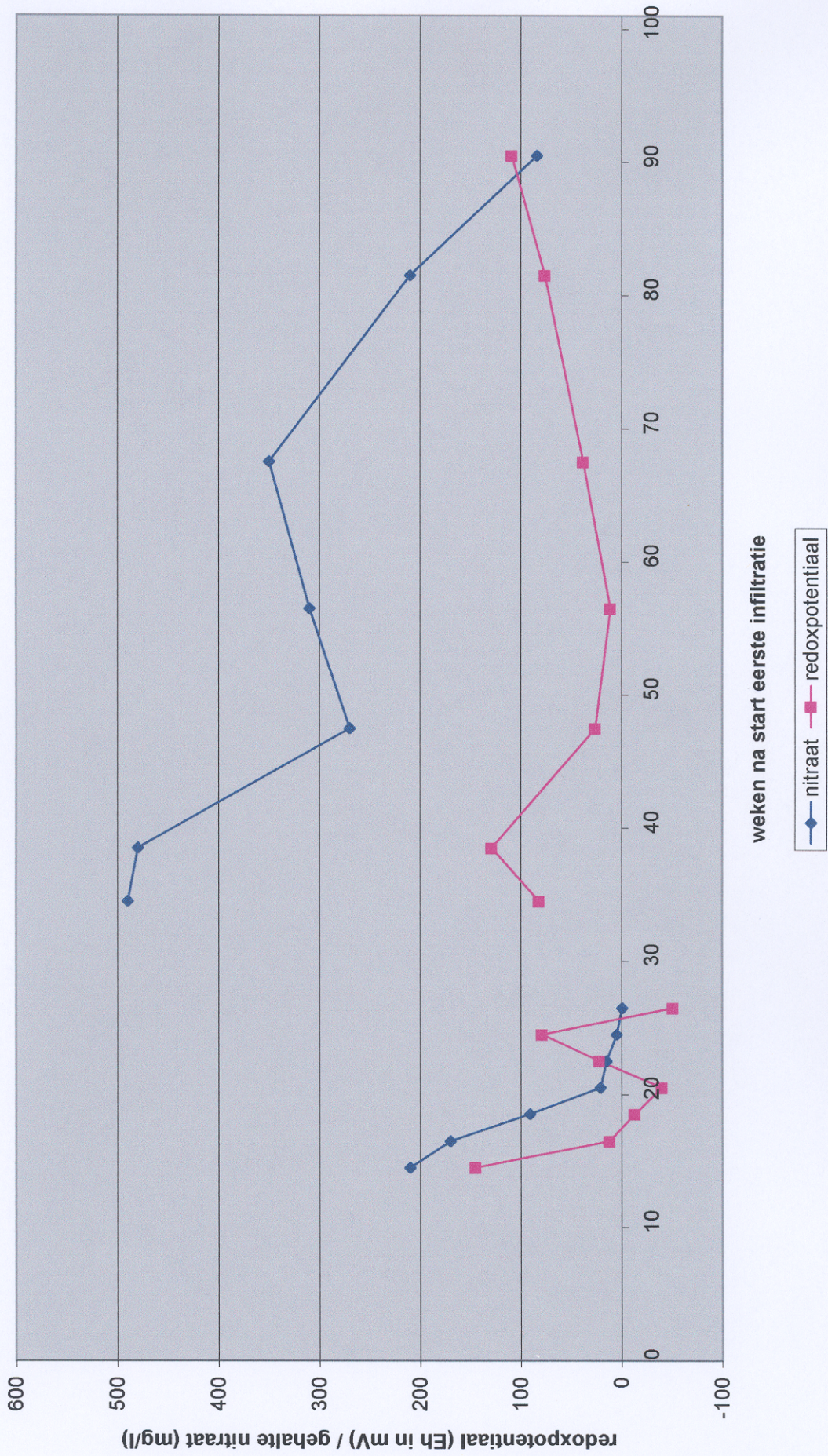




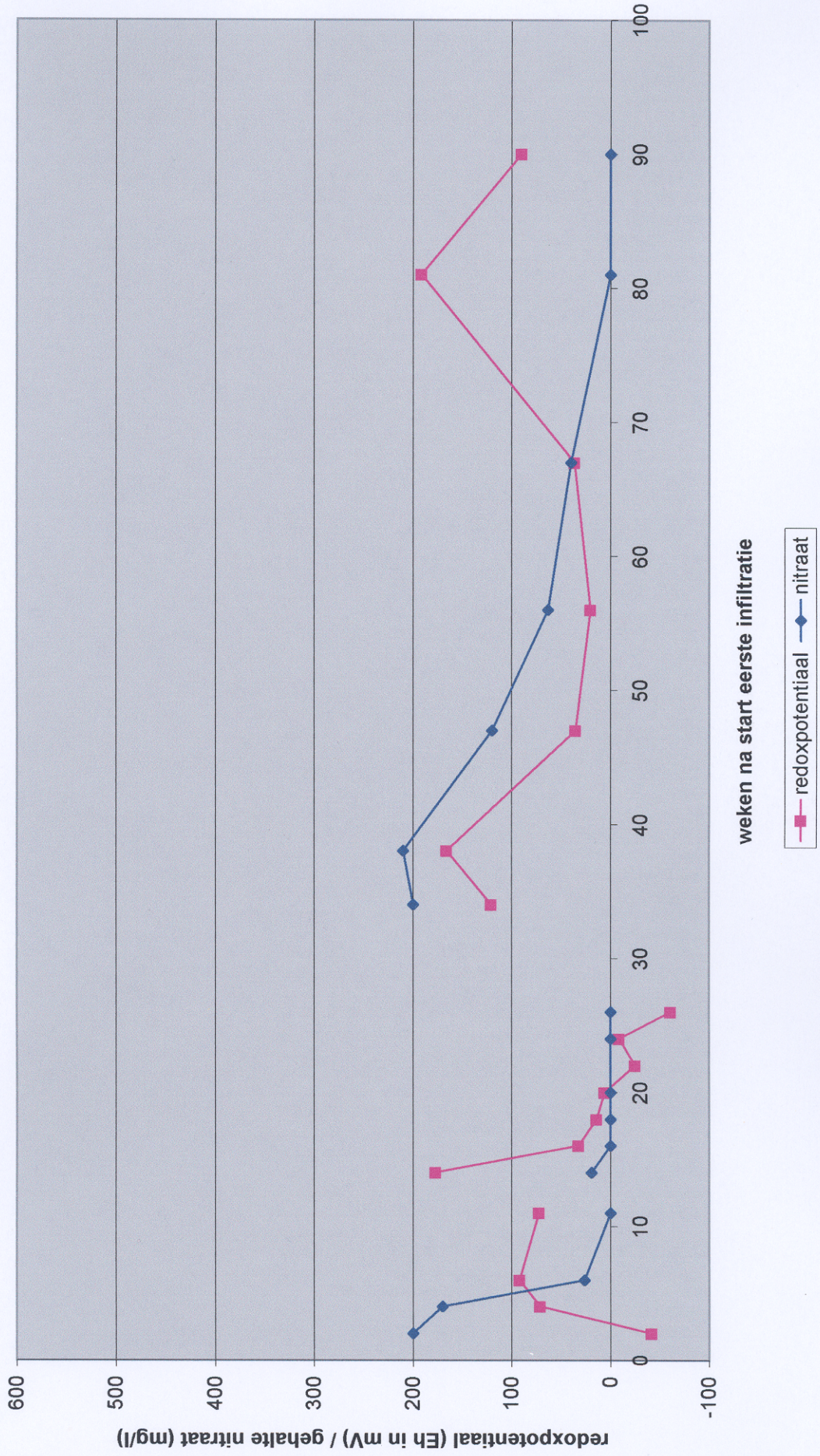
BIJLAGE I

VERLOOP REDOXPARAMETERS

Filter M02



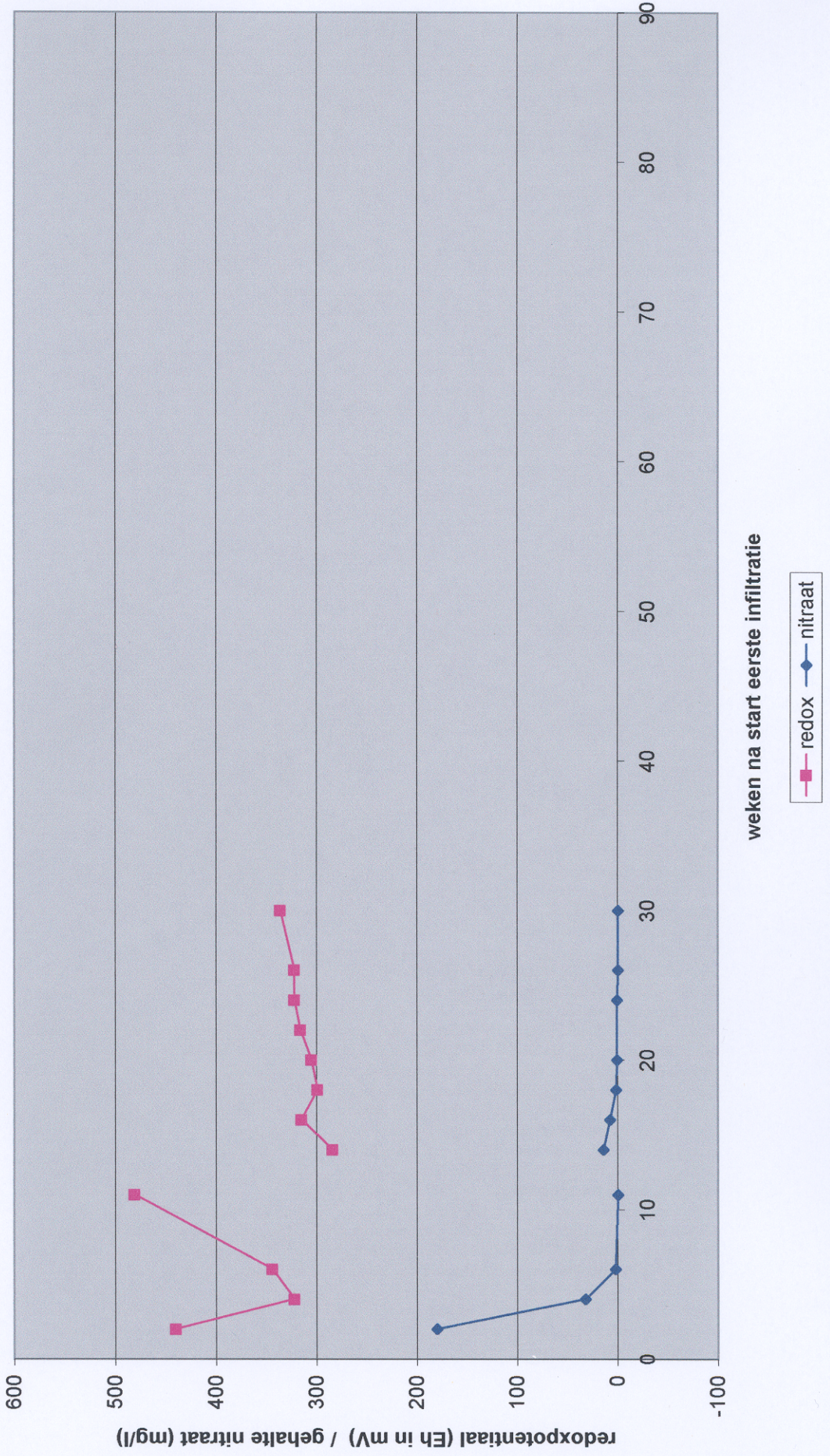
Filter M03



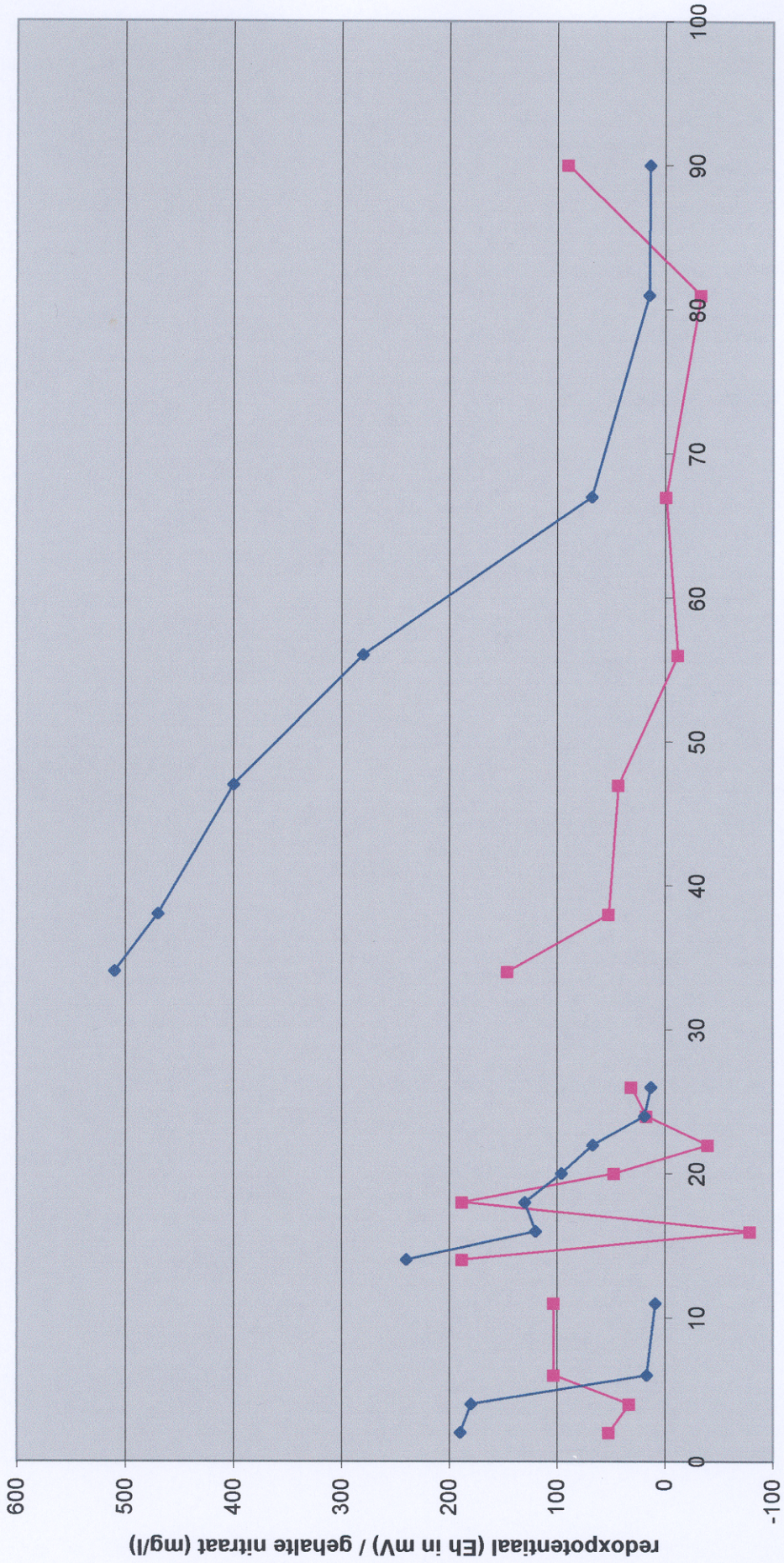
weken na start eerste infiltratie

redoxpotentiaal — nitraat

Filter M07



filter M09



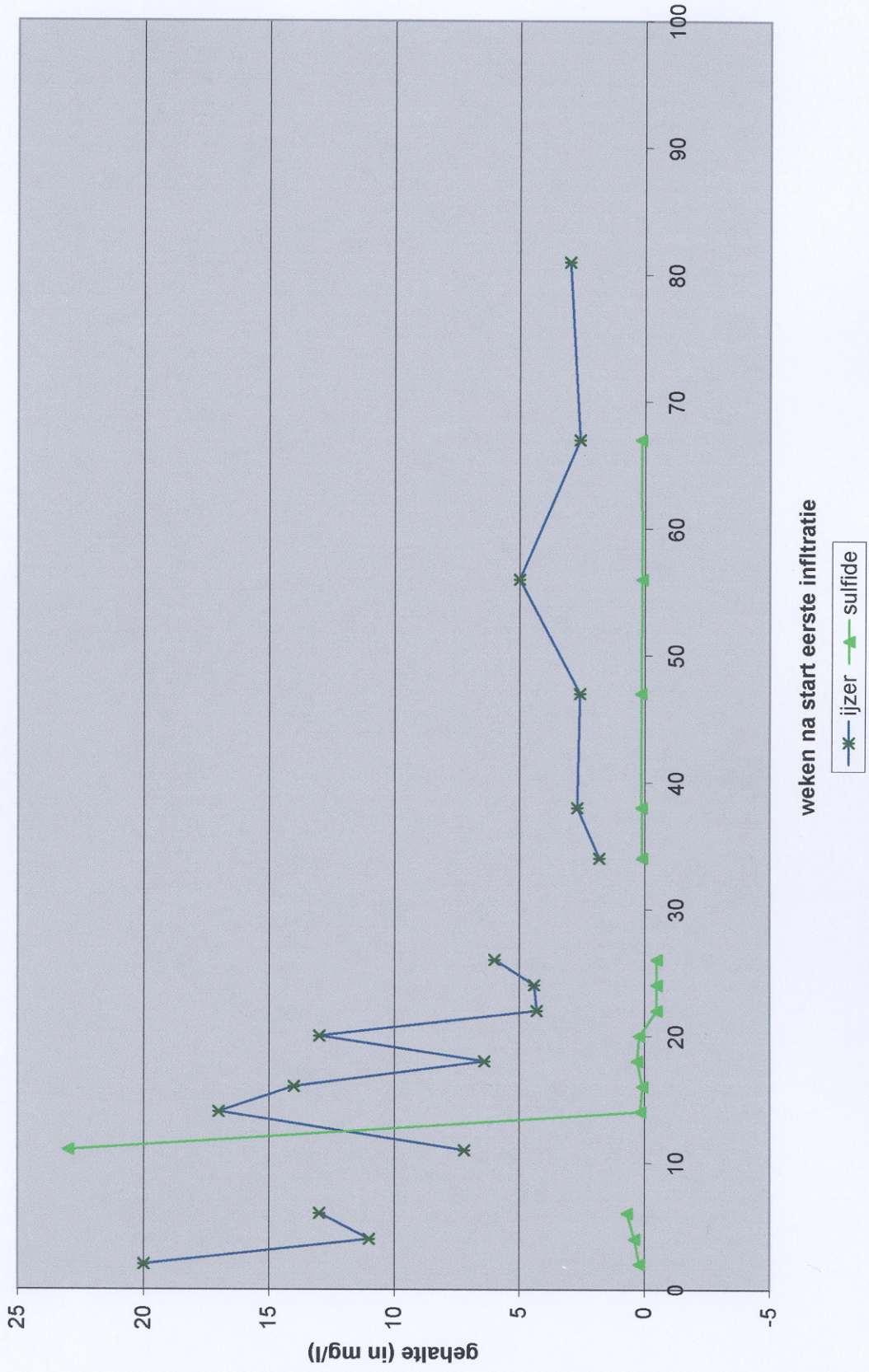
weken na start eerste infiltratie

redoxpotential nitraat

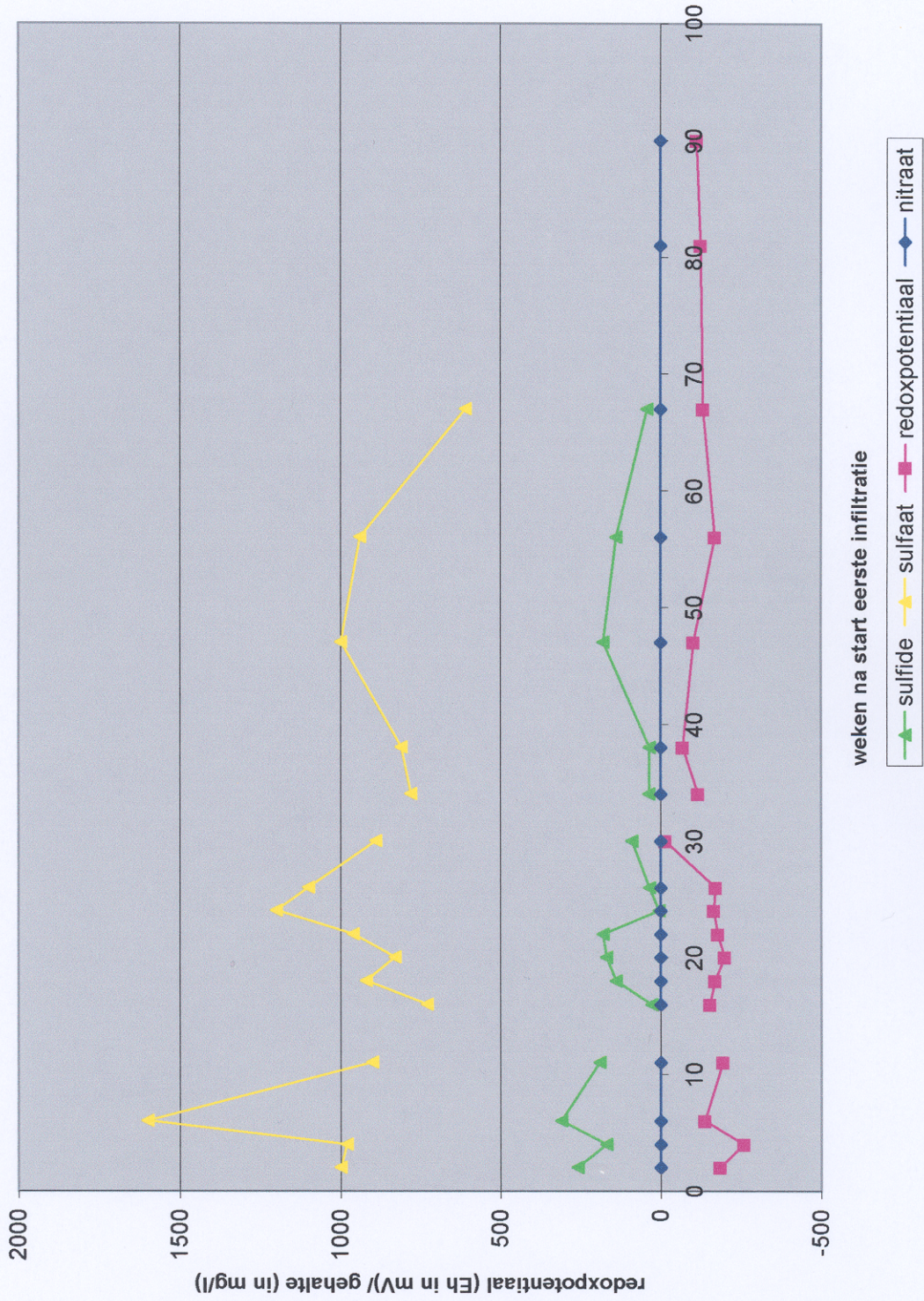
Filter M10



Filter M10: ijzer en sulfide



sulfaat en sulfide m14



Deepwell OF1: redoxparameters



weken na start eerste infiltratie