

NOBIS 96-1-03
BIOLOGISCH HEKWERK OP HET TERREIN VAN
SHELL NEDERLAND RAFFINADERIJ

Fase 1: Karakterisatie en ontwerp van een biolo-
gisch hekwerk

ir. L. Schipper (IWACO B.V.)
ir. L. Brouwer (IWACO B.V.)
ir. T.F. Praamstra (IWACO B.V.)

december 1999

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij - Fase 1: Karakterisatie en ontwerp van een biologisch hekwerk", december 1999, CUR/NOBIS, Gouda."

Aansprakelijkheid

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

Copyrights

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Biological fence at the site of Shell Nederland Raffinaderij - Phase 1: Characterization and design of a biological fence", December 1999, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

Liability

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

Titel rapport

Biologisch hekwerk op het terrein van Shell
Nederland Raffinaderij
Fase 1: Karakterisatie en ontwerp van een
biologisch hekwerk

CUR/NOBIS rapportnummer

96-1-03

Project rapportnummer

96-1-03 fase 1

Auteur(s)

ir. L.. Schipper
ir.. L. Brouwer
ir. T.F. Praamstra

Aantal bladzijden

Rapport: 56

Bijlagen: 70

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

IWACO B.V. (ir. L. Schipper, 010-2865581)
TNO-Milieu, Energie en Procesinnovatie (dr.ir. H.H.M. Rijnaarts, 055-5493380)
Ecotechniek B.V. (ir. P.I.M. Vis, 0346-557700)
Shell Nederland Raffinaderij (ir. G.J. de Jongh, 010-4312108)
Shell International Oil Products bv (ir. C.D. Parkinson, 070-3772004)
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (ing. W.A. van Hattem, 010-4894173)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

Op 1 januari 1997 is door NOBIS opdracht verleend voor een haalbaarheidsonderzoek ten aanzien van een biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij (SNR), met als doel risicoreductie te bewerkstelligen door middel van biologische afbraak van de verontreiniging.

Het doel van de eerste fase van dit project is de karakterisatie van de locatie en het ontwerpen van een aantal prototypen van het biologisch hekwerk, op basis van ontwerpvariabelen (zoals dragermaterialen, beplanting en milieuomstandigheden). Daartoe is in deze fase van het project ook een studie naar dragermaterialen en kolomproeven uitgevoerd door TNO-MEP. De resultaten van deze studie zijn in september 1998 gerapporteerd.

In dit rapport worden de karakterisatie van de locatie, de voorspelling van afbraak en verspreiding en het ontwerp gepresenteerd.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

aromatische koolwaterstoffen, beheer, biologische afbraak, koolwaterstoffen

Vrije trefwoorden:**Titel project**

Biologisch hekwerk op het terrein van Shell
Nederland Raffinaderij

Projectleiding

IWACO B.V.
(ir. L. Schipper, 010-2865581)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Biological fence at the site of Shell Nederland Raffinaderij
Phase 1: Characterization and design of a biological fence

CUR/NOBIS report number

96-1-03

Project report number

96-1-03 phase 1

Author(s)

ir. L. Schipper
ir. L. Brouwer
ir. T.F. Praamstra

Number of pages

Report: 56

Appendices: 70

Executive organisation(s) (Consortium)

IWACO B.V. (ir. L. Schipper, 010-2865581)
TNO-Milieu, Energie en Procesinnovatie (dr.ir. H.H.M. Rijnaarts, 055-5493380)
Ecotechniek B.V. (ir. P.I.M. Vis, 0346-557700)
Shell Nederland Raffinaderij (ir. G.J. de Jongh, 010-4312108)
Shell International Oil Products bv (ir. C.D. Parkinson, 070-3772004)
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (ing. W.A. van Hattem, 010-4894173)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

On januari 1st 1997 NOBIS commissioned a feasibility study regarding a biological fence at the site of the Shell Netherlands Refinery with the aim of reducing pollution risks by applying biodegradability techniques. In the first phase of this project selection and characterization of a suitable site has taken place and a number of prototypes have been designed. In this report the results of this study are presented.

Keywords**Controlled terms:**

aromatic organic compounds, biodegradation, maintenance, organic compounds

Uncontrolled terms:**Project title**

Biological fence at the site of Shell Nederland Raffinaderij

Projectmanagement

IWACO B.V.
(ir. L. Schipper, 010-2865581)

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

INHOUD

		SAMENVATTING	v
		SUMMARY	x
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Fase 1	2
	1.2	Opzet van het rapport	2
DEEL 1		KARAKTERISATIE	3
Hoofdstuk	2	SELECTIE VAN TRAJECTEN	5
Hoofdstuk	3	HISTORISCHE INFORMATIE VAN DE GESELECTEERDE TRAJECTEN EN HET ACHTERLIGGENDE TERREIN	7
	3.1	Trajecten langs de haven: potentiële locaties voor het biologisch hekwerk	7
	3.2	Achterliggend terrein	7
	3.3	Conclusie	8
Hoofdstuk	4	KARAKTERISATIE IN HET VELD	9
	4.1	Bodemopbouw en kabels en leidingen	9
	4.2	Geohydrologie	9
	4.3	Verontreinigingssituatie	11
	4.4	Milieuomstandigheden	12
	4.5	Micro-organismen	15
Hoofdstuk	5	CONCLUSIES	17
DEEL 2		VOORSPELLEN VAN VERSPREIDING EN AFBRAAK IN HET BIOLOGISCH HEKWERK	19
Hoofdstuk	6	GEOHYDROLOGISCHE MODELLERING	21
	6.1	Schematisatie van bodemopbouw en geohydrologie ten behoeve van het model	21
	6.2	Peilen, verhang en stromingsrichting ten behoeve van het model	22
	6.3	Uitgevoerde berekeningen	22
	6.4	Resultaten	23
	6.5	Conclusies	24
	6.6	Aanbevelingen	25
Hoofdstuk	7	STOFTRANSPORT EN BIOLOGISCHE AFBRAAK	27
	7.1	Randvoorwaarden	27
	7.2	Fysisch-chemische parameters	27
	7.3	Resultaten en conclusies	28

DEEL 3	ONTWERP	31	
Hoofdstuk	8	PROGRAMMA VAN EISEN VOOR HET ONTWERP	33
Hoofdstuk	9	UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN	35
Hoofdstuk	10	KOLOMPROEVEN IN HET LABORATORIUM	37
Hoofdstuk	11	LAYOUT VAN HET BIOLOGISCH HEKWERK	39
Hoofdstuk	12	ZUURSTOFVOORZIENING	41
	12.1	Verticale en horizontale systemen in de bodem	41
	12.2	Ontwerpaspecten van het biospargingssysteem	42
	12.3	Beluchting in de sloot	43
	12.4	Maatregelen tegen het vervluchten van verontreinigingen	43
	12.5	Conclusies ten aanzien van de zuurstofdosing	44
Hoofdstuk	13	BEPLANTING	45
Hoofdstuk	14	PLAN VOOR DE MONITORING EN DE EXPLOITATIE	47
	14.1	Sturing en optimalisatie	47
	14.2	Monitoren van prestaties van het biologisch hekwerk	49
Hoofdstuk	15	CONCLUSIES TEN AANZIEN VAN HET ONTWERP	51
	15.1	Toetsing aan de eisen	51
	15.2	Hiaten	51
Hoofdstuk	16	AANBEVELINGEN	53
		LITERATUUR	55
Bijlage	A	DOORLATENDHEIDSMETINGEN	
Bijlage	B	BOORPROFIELEN EN ANALYSERESULTATEN VOOR GROND EN GRONDWATER	
Bijlage	C	BIOMASSABEPALINGEN (Bioclear)	
Bijlage	D	BESCHRIJVING VAN MLAEM	
Bijlage	E	SAMENVATTING UIT 'LABORATORY ASSESSMENT OF DESIGN PARAMETERS FOR AN AEROBIC MINERAL OIL DEGRADING BIOSCREEN- AND CONSEQUENCES FOR FIELD APPLICATION' (TNO-MEP)	
Bijlage	F	FIGUREN	

SAMENVATTING

Biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij

Op 1 januari 1997 is door NOBIS opdracht verleend voor een haalbaarheidsonderzoek ten aanzien van een biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij (SNR), met als doel risicoreductie te bewerkstelligen door middel van biologische afbraak van de verontreiniging.

Het doel van de eerste fase van dit project is de karakterisatie van de locatie en het ontwerpen van een aantal prototypen van het biologisch hekwerk, op basis van ontwerpvariabelen (zoals dragermaterialen, beplanting en milieuomstandigheden). Daartoe zijn in deze fase van het project ook een studie naar dragermaterialen en kolomproeven uitgevoerd door TNO-MEP. De resultaten van deze studie zijn in september 1998 gerapporteerd [1]. Daarnaast worden in deze fase veldmeetmethoden geïnventariseerd en getoetst ten behoeve van de monitoring van de biologische processen in de bodem. Het rapport, waarin de inventarisatie van veldmeetmethoden is beschreven, is in mei 1997 geleverd.

In deze samenvatting worden de karakterisatie van de locatie, de voorspelling van afbraak en verspreiding en het ontwerp kort gepresenteerd.

Karakterisatie van de locatie

Teneinde de haalbaarheid van een biologisch hekwerk aan te tonen in het veld, zal een geschikte locatie moeten worden gevonden om een aantal prototypen aan te leggen. Op de raffinaderij is, op basis van beschikbare informatie, gezocht naar geschikte trajecten, die aan de grens van het terrein liggen en waar reeds is aangetoond dat verontreinigingen zich op of vlak voor die grens bevinden. De verontreiniging moet bestaan uit benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen (BTEX) en minerale olie, waarbij voor de minerale olie vooral de mobiele fractie van belang is. Er moet fysiek ruimte zijn om een biologisch hekwerk aan te leggen. Uiteindelijk zijn 3 trajecten geselecteerd langs de eerste Petroleumhaven.

Uit de historische informatie blijkt dat op gedeelten van het achterliggende terrein bodemverontreiniging is ontstaan en aangetoond. Deze verontreinigingen hebben zich richting de haven verspreid. De aangetoonde verontreiniging aan de rand van de haven is in veel gevallen veroorzaakt door deze verspreiding.

De bodemopbouw op de locatie is als volgt te beschrijven. Vanaf het maaiveld bestaat de bodem uit een zandige laag tot circa 5 m-mv. Hieronder bevindt zich een kleilaag tot een diepte van circa 10 m-mv. Daaronder bevindt zich een dunne zandlaag van 1 à 2 meter dikte en daaronder bevinden zich zandige kleilagen tot een diepte van circa 23 m-mv. Het watervoerende pakket bevindt zich vanaf circa 23 m-mv.

De verontreiniging in het grondwater bestaat uit minerale olie (concentraties van 290 tot 15.000 µg/l) en BTEX (concentraties van 0,7 tot 1.300 µg/l). In het hele gebied zijn geen andere stoffen aangetoond. Het is niet goed te achterhalen welke soort brandstof zich aan de grenzen van het terrein bevinden. Uit de historische informatie blijkt dat er incidenten hebben plaatsgevonden met verschillende soorten minerale olie.

Uit het veldonderzoek blijkt dat de geselecteerde trajecten als volgt kunnen worden gekarakteriseerd:

- in de trajecten is het grondwater verontreinigd met minerale olie en BTEX;
- in de trajecten stroomt het freatische grondwater vanaf het terrein richting de petroleumhaven;
- de doorlatendheid in het freatische pakket ligt tussen de 1 en 2 meter per dag;
- de verspreiding van minerale olie en BTEX vindt vooral oppervlakkig plaats in de bovenste meter vanaf de grondwaterspiegel;
- in de huidige situatie wordt aangenomen dat het grondwater volledig anaëroob is en ijzer reducerend. Dit zal in een aanvullende meetronde worden geverifieerd. Omdat wordt uitgegaan van een aëroob systeem zal zuurstof moeten worden toegediend;
- in het grondwater bevindt zich geen nitraat en geen fosfaat. Afhankelijk van de behoeften van de micro-organismen zullen nutriënten moeten worden toegevoegd;
- het percentage (afbreekbaar) organisch stof is 0,75 %.

De geselecteerde trajecten zijn in potentie geschikt om een hekwerk te plaatsen, waarin ter plaatse de verspreiding van de aanwezige verontreinigingen wordt beperkt of opgeheven.

Voorspellen van verspreiding en afbraak in het biologisch hekwerk

Met behulp van een geohydrologisch model en een stoftransportmodel, waarin afbraak wordt meegenomen, is gerekend aan de snelheid van verspreiding en de mate van afbraak in het biologisch hekwerk. Omdat in de modellen de dimensies van het biologisch hekwerk moeten worden ingevoerd, is uitgegaan van 'bakken' met een diepte van 4 meter, een breedte van 2 meter en een lengte van 40 meter. Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat de bak of uit water bestaat, of uit een mengsel van zand met een grover materiaal en dat een aëroob systeem wordt gecreëerd. Deze aannamen worden verder geoptimaliseerd. De modelberekeningen laten zien hoe het hekwerk zal functioneren en welke parameters daarbij vooral belangrijk zullen zijn.

Geohydrologisch model

Uit het opgestelde geohydrologische model kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De verblijftijd van grondwater binnen het biologisch hekwerk hangt niet af van de doorlatendheid van het gebruikte materiaal waarmee het hekwerk wordt uitgevoerd, maar wel van de porositeit van het mengsel. In de sleuven met materiaal is een verblijftijd van 35 tot 56 dagen berekend. In de sloot (met een grotere porositeit) wordt een verblijftijd van circa 99 dagen berekend. Naast de samenstelling van het materiaal vormt de verdichting van het materiaal na het aanbrengen een belangrijk aspect.
- Om de verblijftijd binnen het biologisch hekwerk te vergroten, zou de breedte van de bak kunnen worden vergroot.
- Weerstand langs de randen van de bak zorgt voor het afbuigen van stroombanen om de bak heen en daarmee voor een afname van het invloedsgebied van het biologisch hekwerk op het bovenstrooms gelegen grondwater. Dit effect kan worden opgeheven door de bak langer te maken.
- Ten gevolge van de verschillen in doorlatendheid, porositeit en weerstand tussen naast elkaar gelegen bakken is geen onderlinge beïnvloeding te verwachten. De situatie waarbij grondwater bovenstrooms van 'bak 1' uiteindelijk terecht zal komen in 'bak 2' is niet waarschijnlijk.

Stoftransport

Om voorspellingen te kunnen doen over de snelheid waarmee de verontreinigingen in het grondwater zich door het hekwerk verplaatsen en over de mate van afbraak, zijn stoftransportberekeningen uitgevoerd.

Voor xylenen blijkt een geringe afbraaksnelheid van circa 0,016 - 0,08 per dag reeds voldoende te zijn teneinde de vereiste afbraak in het hekwerk te bewerkstelligen. De invoerconcentratie ligt

voor xylenen dan ook in de buurt van de I-waarde, zodat een geringe biologische afbraak en een geringe verblijftijd al leiden tot het gewenste resultaat.

Anders ligt dat voor minerale olie en benzeen. Bij de in de literatuur vermelde (minimale) natuurlijke afbraaksnelheden onder aërobe omstandigheden van 0,003 - 0,006 per dag voor minerale olie en 0,006 - 0,03 per dag voor benzeen wordt het gewenste eindresultaat nog niet bereikt. Doordat in het biologisch hekwerk actief zuurstof wordt toegevoegd, zal de te realiseren afbraaksnelheid echter een waarde hebben die zich bevindt tussen de minimale (natuurlijke) en de maximale (bioreactor: 1 per dag en hoger) afbraaksnelheid. Zuurstof is dan geen of nauwelijks een limiterende factor meer.

Ontwerp

In dit laatste deel wordt verder ingegaan op de mogelijkheden voor het inbrengen van zuurstof en de beplanting. Uiteindelijk wordt gekomen tot het ontwerp van een aantal prototypen. Voorgesteld wordt om één slootsysteem aan te leggen. Daarnaast wordt voorgesteld twee sleuven aan te leggen met daarin het oorspronkelijk materiaal gemengd met toeslagmateriaal (grind). De resultaten van de kolomproeven, zoals die door TNO zijn uitgevoerd en gerapporteerd [1], zijn hierbij gebruikt om meer inzicht te krijgen in de ontwerpparameters.

Biosparging

In hekwerken wordt lucht toegevoerd (biosparging). Voorgesteld wordt een horizontaal systeem met luchtdrains, dat een aantal belangrijke voordelen heeft als het gaat om een beperkte, gelijkmatige luchttoevoer. Voorlopig wordt uitgegaan van een overdruk tussen de 300 en 500 mbar. De benodigde debieten hangen af van de volgende factoren:

- het volume van het te beluchten grondwater per tijdseenheid;
- het zuurstofverbruik van het aanwezige ijzer en de natuurlijke organische verbindingen in de bodem;
- de benodigde hoeveelheid zuurstof voor de afbraak van verontreinigingen;
- de maximale hoeveelheid zuurstof die kan diffunderen in het grondwater.

Voorlopig wordt aangehouden dat een hoeveelheid lucht tussen de 5 en de 20 m³ per uur zal worden toegevoegd. In het veld zal het systeem verder moeten worden ingeregeld door de hoeveelheid zuurstof in het grondwater te meten en vervolgens de debieten bij te stellen.

Zowel bij de systemen met dragermaterialen als in de sloot moet rekening worden gehouden met de vervluchtiging van de vluchtige componenten (voornamelijk BTEX). Van belang is daarbij vooral om een hoeveelheid lucht in te blazen die net genoeg is om voldoende zuurstof in het water te krijgen, met een zo laag mogelijke druk. In het veld zal hiertoe het systeem worden ingeregeld.

Beplanting

Omdat een biologisch hekwerk nog niet eerder is toegepast in Nederland is er slechts beperkte ervaring ten aanzien van de beplanting op en/of in dit soort systemen. Op basis van een inventarisatie zal worden besloten of, en welke soorten, beplanting effectief is.

Monitoring en exploitatie

Om de werking van het biologisch hekwerk te optimaliseren zal gestuurd worden op de volgende parameters:

- optimalisatie van de luchttoevoer, waarbij enerzijds een minimale hoeveelheid zuurstof moet worden ingebracht en anderzijds vervluchtiging moet worden voorkomen; de hoeveelheid zuurstof in het hekwerk wordt gemeten met behulp van ingebouwde zuurstofsensoren of door te meten in grondwater dat wordt onttrokken door een drain;
- de eventuele beplanting wordt gemonitord en eventueel verzorgd of vervangen;
- de aanwezige nutriënten voor de micro-organismen worden gemonitord en eventueel toegevoegd.

Om een goede werking van het hekwerk aan te tonen worden de concentraties verontreinigingen voor en na het hekwerk gemonitord. Daarnaast zal aan de hand van een respiratietest het zuurstofverbruik in het hekwerk worden gemeten.

Conclusies

In de figuur zijn een ontwerp voor een hekwerk met dragermateriaal en een slootsysteem geschetst. Geconcludeerd kan worden dat de ontwerpen extensief zijn. De ontwerpen zijn eenvoudig en vergen weinig onderhoud.

Uit de grondwaterstromingsberekeningen blijkt dat, ondanks een in- en uittreeweerstand, nog steeds voldoende water door het hekwerk zal stromen. Ook wanneer de hekwerken naast elkaar liggen zijn geen ongewenste effecten te verwachten. Uit de eerste stoftransportberekeningen, met voorzichtige schattingen van afbraaksnelheden, blijkt significante afbraak op te treden. Optimalisatie en sturing zal plaatsvinden, waarbij goede zuurstoftoevoer en de verblijftijden van groot belang zijn. De werking van het hekwerk wordt in feite bepaald door de afbraak die plaatsvindt.

De ontwerpen zijn robuust en 'eenvoudig'. Dit verhoogt de kans op een duurzaam systeem. Uitgaande van de situatie op het terrein zal het ontwerp in de verdere uitwerking moeten worden aangepast om uitvoering mogelijk te maken. De kosten van het hekwerk zijn nog niet berekend.

Uit de toetsing van de ontwerpen aan het programma van eisen lijkt het biologisch hekwerk haalbaar.

Aanbevelingen

Op basis van de conclusies wordt voorgesteld de ontwerpen verder te optimaliseren en de hekwerken in het veld aan te leggen. De optimalisatie zal zich moeten concentreren op de volgende aspecten:

- detailleren en verdere technische uitwerking van het ontwerp, vooral op basis van de haalbaarheid in de praktijk, in samenwerking met Ecotechniek;
- kiezen van een eventuele beplanting;
- berekenen van kosten voor de hekwerken.

De hekwerken kunnen vervolgens worden aangelegd. Daarna zullen de hekwerken worden ingeregeld. Hierbij moet vooral aandacht worden besteed aan:

- zuurstofdosering;
- voldoende groei van de beplanting;
- aanwezigheid van voedingsstoffen.

SUMMARY

Biological fence at the site of Shell Nederland Raffinaderij

On januari 1st 1997 NOBIS commissioned a feasibility study regarding a biological fence at the site of the Shell Netherlands Refinery with the aim of reducing pollution risks by applying biodegradability techniques. In the first phase of this project selection and characterization of a suitable site has taken place and a number of prototypes have been designed. In this report the results of this study are presented.

Characterization of the site

At the site, the soil profile consists of a sandy layer with a thickness of 5 metre, then a clay layer until a depth of 10 m-gl, followed by a sandy layer with a thickness of 1 to 2 metres and several sandy clay layers until 23 m-gl. The first water bearing layer starts at a depth of 23 m-gl.

From the field characterization the following conclusions can be drawn:

- the site is polluted with mineral oil and BTEX; the mineral oil consists largely of light components;
- the groundwater flow is directed straight to the harbour;
- the environment in the groundwater is now anaerobic;

Design of a biological fence

In this report a number of prototypes of a biological fence have been described. Important input for this design concerning the back-fill material was derived from a column study, that was carried out by TNO. Important conclusions concerning the designs are:

- column experiments showed that best results were obtained with backfill consisting of more than 80 % gravel;
- column experiments showed that degradation is limited by oxygen;
- iron precipitation in the columns did not result in pressure build up;
- two prototypes have been designed consisting of trenches that are 2 metres wide, 40 metres long and have a depth of 4 metres; these trenches are filled with soil from the location, mixed with gravel;
- one design has been made of an open ditch;
- air has to be supplied in all test sections by horizontal drains, with a minimum flow between 5 and 20 m³ per day per section; the flow has to be optimised during the pilot;
- vegetation could be applied, but the kind of species that should be used have not been specified;
- the outlines of a monitoring plan have been set up.

Conclusion

From the characterization of the site, the column experiments and the designing activities it is concluded that a biological fence could be feasible at this site.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

Op 1 januari 1997 is door NOBIS opdracht verleend voor een haalbaarheidsonderzoek ten aanzien van een biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij, met als doel risicoreductie te bewerkstelligen met behulp van biologische afbraak.

Het terrein van Shell Nederland Raffinaderij is onderdeel van het totale Shell Pernis-terrein, dat voor een gedeelte bestaat uit een raffinaderij en opslag voor olieproducten (Shell Nederland Raffinaderij: SNR) en voor een ander gedeelte uit chemische industrie en opslag (Shell Nederland Chemie: SNC). Op het terrein bevindt zich een ophooglaag met zand van 2 tot 5 meter dikte. Onder de deklaag is een kleilaag aanwezig, waarin zich een tussen zandlaag bevindt op circa 8 m-mv. Het watervoerende pakket bevindt zich vanaf een diepte van circa 20 - 25 m-mv. De freatische grondwaterstroming aan de randen van het terrein is naar buiten gericht, richting de eerste en tweede Petroleumhaven en de achterliggende polder. In het centrum van het terrein vindt voornamelijk infiltratie naar het watervoerende pakket plaats. Op een aantal plaatsen langs de grenzen van het terrein blijkt verontreiniging (minerale olie en VAK) zich over de terreingrenzen te verplaatsen. Het terrein kan representatief worden genoemd voor bedrijfsterreinen in de Botlek.

Sinds jaren is de enige toegepaste manier, waarop deze verspreiding over de grenzen wordt tegengegaan, de aanleg van een onttrekkingssysteem en het zuiveren van het opgepompte grondwater. Het moet echter mogelijk zijn om biologische afbraakprocessen een kans te geven om het zich verspreidende grondwater in de bodem te 'filtreren'. Het grondwater vindt ongehinderd doorgang, terwijl de (relatief) kleine vrachten verontreiniging in een geactiveerd biologisch systeem zouden worden afgebroken.

De mogelijkheden voor microbiologische afbraak van vluchtige aromatische koolwaterstoffen (VAK) en minerale olie zijn inmiddels in het laboratorium, maar ook in het veld voldoende bewezen. De limiterende factor is vaak niet de hoeveelheid aanwezige micro-organismen, maar juist de omstandigheden. Naar het toepassen en optimaliseren van biorestauratie over een gehele locatie en de effectiviteit daarvan is veel meer onderzoek gedaan dan naar het activeren van biologische activiteit in een smalle zone of lijnstructuur, bijvoorbeeld langs de terreingrenzen. Dit project richt zich op die smalle zone. Dit concept sluit goed aan bij de strategie van risicoreductie, waarbij de inspanning zich concentreert op het voorkomen van verspreiding van verontreiniging over de terreingrenzen.

Het project is opgedeeld in vier fasen, namelijk:

- Fase 1: Vooronderzoek en ontwerp.
- Fase 2: Aanleg van het biologisch hekwerk.
- Fase 3: Exploitatie van het hekwerk.
- Fase 4: Evaluatie.

Door in het veld een aantal prototypen van een biologisch hekwerk aan te leggen en aan te tonen dat risicoreductie in voldoende mate optreedt, wordt de haalbaarheid van dit concept aangetoond. Voordat echter het veld in wordt gegaan worden in de eerste fase de prototypen ontworpen.

1.1 Fase 1

Doelstelling

Het doel van de eerste fase van dit project is de karakterisatie van de locatie en het ontwerpen van een aantal prototypen van het biologisch hekwerk, op basis van ontwerpvariabelen (zoals dragermaterialen, beplanting en milieuomstandigheden). Daarnaast worden in deze fase veldmeetmethoden geïnventariseerd en getoetst ten behoeve van de monitoring van de biologische processen in de bodem.

Werkzaamheden

In de eerste fase van dit project is een aantal trajecten langs de grens van het terrein, waar mogelijk een biologisch hekwerk kan worden geplaatst, gekarakteriseerd en is vervolgens gewerkt aan het ontwerp van de diverse prototypen van het biologisch hekwerk. Daarnaast is door TNO-MEP onderzoek gedaan naar mogelijke dragermaterialen in het hekwerk en zijn kolomproeven uitgevoerd waarin afbraak wordt gemeten. De resultaten van deze studie zijn in september 1998 door TNO-MEP gerapporteerd [1]. Het onderzoek naar veldmeetmethoden is in mei 1997 in een separaat rapport geleverd [2].

1.2 Opzet van het rapport

Het rapport bestaat uit drie delen, waarin de volgende onderwerpen zijn beschreven:

Deel 1: Karakterisatie

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de selectie van trajecten. In hoofdstuk 3 wordt de historische informatie weergegeven. Daarna worden in hoofdstuk 4 de resultaten van het veldonderzoek beschreven. In hoofdstuk 5 worden de conclusies van de karakterisatie beschreven.

Deel 2: Voorspellen van verspreiding en afbraak in het biologisch hekwerk

In hoofdstuk 6 wordt het grondwaterstromingsmodel gepresenteerd, waarbij ook de effecten van een biologisch hekwerk zijn onderzocht. De stoftransportberekeningen worden besproken in hoofdstuk 7.

Deel 3: Ontwerp

In hoofdstuk 8 wordt een beknopt programma van eisen beschreven en in hoofdstuk 9 worden de uitgangspunten en randvoorwaarden beschreven. In hoofdstuk 10 wordt kort ingegaan op de kolomproeven die in het laboratorium van TNO zijn uitgevoerd. In de hoofdstukken 11, 12 en 13 worden de layout, het dragermateriaal, de zuurstofvoorziening en de mogelijkheden voor beplanting besproken. In hoofdstuk 14 wordt ingegaan op de monitoring en exploitatie van de biologische hekwerken. In hoofdstuk 15 wordt aan de hand van het programma van eisen getoetst of de ontwerpen haalbaar zijn en worden de nog aanwezige hiaten gedefinieerd. In hoofdstuk 16 zijn de aanbevelingen geformuleerd.

DEEL 1

KARAKTERISATIE

Teneinde de haalbaarheid van een biologisch hekwerk aan te tonen in het veld, zal een geschikte locatie moeten worden gevonden om een aantal prototypen aan te leggen. Op de raffinaderij is, op basis van beschikbare informatie, gezocht naar geschikte trajecten, die aan de grens van het terrein liggen en waar reeds is aangetoond dat verontreinigingen zich op of vlak voor die grens bevinden. De verontreiniging moet bestaan uit VAK en minerale olie, waarbij voor de minerale olie vooral is gekeken naar de mobiele fractie. Daarnaast moet er enige ruimte zijn om een biologisch hekwerk aan te leggen. Uiteindelijk zijn 3 trajecten geselecteerd langs de eerste Petroleumhaven. De bodemopbouw en geohydrologische situatie, de aard en het voorkomen van de verontreiniging en de milieuomstandigheden, die belangrijk zijn voor biologische afbraakprocessen, zijn in deze trajecten met behulp van historisch onderzoek en veldonderzoek zo goed mogelijk gekarakteriseerd.

HOOFDSTUK 2

SELECTIE VAN TRAJECTEN

Op het terrein van SNR is gezocht naar geschikte trajecten langs de grens van het terrein, waar een biologisch hekwerk kan worden aangelegd. In eerste instantie heeft het onderzoek zich gericht op een traject aan de zuidkant van het terrein. Dit traject grenst aan een spoorbaan. Het traject leek geschikt, omdat:

- de grondwaterstroming richting de spoorbaan is;
- in de jaarlijkse monitoring (uitgevoerd door SNR) minerale olie IR was aangetoond;
- er veel ruimte is in dit gebied om een systeem aan te leggen.

Tijdens een eerste karakterisatie van het gebied door IWACO werd echter onvoldoende minerale olie aangetoond in het grondwater. Bij navraag bleken er grote verschillen te bestaan tussen de gehanteerde analysemethoden bij de monitoring respectievelijk bij de karakterisatie. In een aanvullend onderzoek is aangetoond dat de aanwezige minerale olie een relatief grote ketenlengte had (vanaf C24) en zich alleen in grond bevindt. De minerale olie, die tijdens de monitoring is aangetoond, is geadsorbeerd aan gronddeeltjes, die tijdens de bemonstering in het grondwatermonster terecht komen. De aanwezige minerale olie kan niet mobiel worden genoemd, zodat het geen nut heeft een biologisch hekwerk in dit traject te plaatsen.

Vervolgens is een ander traject gezocht en uiteindelijk is, in samenspraak met SNR, gekozen voor een drietal trajecten langs de eerste Petroleumhaven. De grondwaterstroming is hier richting haven en er is lichte minerale olie en BTEX aanwezig. Een nadeel van deze trajecten is dat de ruimte voor een biologisch hekwerk beperkt is.

HOOFDSTUK 3

HISTORISCHE INFORMATIE VAN DE GESELECTEERDE TRAJECTEN EN HET ACHTERLIGGENDE TERREIN

Van het gebied dat is geselecteerd voor het aanleggen van prototypen van het biologisch hekwerk is de historische informatie geïventariseerd, zodat een inzicht wordt verkregen in de aard en de oorsprong van de verontreinigingen. In figuur F1 (zie bijlage F) is een overzicht gegeven van het gebied, dat is verdeeld in zogenoemde kaartvakken. De trajecten, die langs de haven zijn geselecteerd, zijn weergegeven in de figuren F2, F3 en F4 (zie bijlage F), waarbij ook de potentiële locaties voor een biologisch hekwerk zijn aangegeven. Het onderzoek heeft zich op die trajecten geconcentreerd, maar ook op het achterliggende terrein, waar vandaan verontreinigingen zich kunnen verspreiden. Behalve historische informatie is ook veldonderzoek gedaan om de trajecten te karakteriseren en een ontwerp te kunnen maken.

3.1 Trajecten langs de haven: potentiële locaties voor het biologisch hekwerk

Kaartvak G3 zuid

In kaartvak G3 zuid bevindt zich een potentiële locatie voor het biologisch hekwerk, dicht langs de haven. Over dit kaartvak is weinig informatie beschikbaar. In 1959 bevonden zich in dit kaartvak de tankputten 13 (gedeeltelijk), 15 en 37 (gedeeltelijk). Tussen 1959 en 1979 zijn deze activiteiten opgeheven. Er is geen informatie ten aanzien van bodembedreigende activiteiten in die tijd.

Kaartvakken G1 en A1 zuid

In kaartvak G1 en kaartvak A1 zuid, die beide langs de eerste Petroleumhaven zijn gesitueerd, liggen verschillende mogelijke locaties voor een biologisch hekwerk.

In kaartvak G1 zijn reeds vanaf 1955 een bedrijfsschool, twee kantines en een werkplaats gesitueerd. Op de locatie hebben nooit bodembedreigende activiteiten plaatsgevonden. Op locatie A1 zuid bevinden zich voornamelijk kantoren van de bedrijfsschool en daarnaast een parkeerplaats. Hier zijn geen potentieel bodembedreigende activiteiten aanwezig. In het leidingentracé, dat zich evenwijdig aan de eerste Petroleumhaven bevindt, hebben volgens mondelinge informatie in het verleden incidenten plaatsgevonden met olieproducten, waarbij een onbekende hoeveelheid product in het tracé is terechtgekomen.

3.2 Achterliggend terrein

De volgende kaartvakken vormen het achterliggende terrein voor de diverse mogelijke locaties voor het biologisch hekwerk:

Kaartvak G3 noord

Over dit kaartvak is weinig informatie beschikbaar. In 1959 bevonden zich in dit kaartvak de tankputten 13 (gedeeltelijk), 14 en 37 (gedeeltelijk). Tussen 1959 en 1979 zijn deze activiteiten opgeheven. Er is geen informatie ten aanzien van bodembedreigende activiteiten in die tijd.

Kaartvak A2 zuid

In het noordelijke gedeelte van dit kaartvak was in 1959 een tankput gesitueerd, in het zuidelijke gedeelte bevond zich een olievanger en een pomphuis. In 1983 waren al deze installatieonderdelen niet meer aanwezig en lag het terrein braak. In 1987 bevond zich ter plaatse van de voormalige tankput een gronddepot.

In de voormalige tankput lagen 9 tanks, inclusief de aan- en afvoerleidingen. Na de verwijdering van de tanks is de tankput opgehoogd. Bij heiwerkzaamheden zijn twee ondergrondse bitumenleidingen lek geraakt. De bodem is daardoor vermoedelijk plaatselijk verontreinigd met PAK, aromaten en oliecomponenten.

Kaartvak A3 zuid

In dit kaartvak bevond zich in 1959 een tankput, waarin zich 18 tanks bevonden met de bijbehorende aan- en afvoerleidingen. Tussen 1975 en 1983 zijn 3 tanks verwijderd en tussen 1983 en 1987 zijn nog eens 8 tanks verwijderd. Daarna hebben op de locatie geen herinrichtingen plaatsgevonden.

In de grond in de tankput is een carbolineumgeur waargenomen en is het bodemmateriaal zwart. Vermoedelijk is dit ontstaan door het oplossen van pipecoatings door aromatische verbindingen. Daarnaast is een tank lek geweest die 'light aromatic white spirit' bevatte. Daarbij heeft een gedeelte van de tankput blank gestaan met puur product. In het bodemonderzoek zijn in de grond en het grondwater concentraties koolwaterstoffen aangetroffen.

Kaartvak A4 zuid

In 1959 bevond zich in dit kaartvak een tankput met 4 tanks. Tussen 1959 en 1964 is er 1 tank bijgeplaatst. Tussen 1964 en 1965 is in de noordpunt van het kaartvak een olievanger bijgeplaatst. Tenslotte zijn tussen 1965 en 1987 alle tanks verwijderd.

De olievanger is in het verleden verstopt geweest, waardoor bodemverontreiniging met minerale olie is ontstaan. In de huidige situatie wordt het kaartvak gebruikt als opslagdepot voor licht verontreinigde grond.

In het uitgevoerde bodemonderzoek zijn in de grond en het grondwater concentraties koolwaterstoffen aangetroffen.

3.3 Conclusie

Uit de historische informatie blijkt dat op gedeelten van het achterliggende terrein bodemverontreiniging is ontstaan en aangetoond. Deze verontreinigingen hebben zich richting de haven verspreid. De aangetoonde verontreiniging aan de rand van de haven is in veel gevallen veroorzaakt door deze verspreiding.

De verontreiniging in het grondwater bestaat uit minerale olie en VAK. In het hele gebied zijn geen andere stoffen aangetoond. Het is niet goed te achterhalen welke soort brandstof zich aan de grenzen van het terrein bevindt. Uit de historische informatie blijkt dat er incidenten hebben plaatsgevonden met verschillende soorten minerale olie.

HOOFDSTUK 4

KARAKTERISATIE IN HET VELD

4.1 Bodemopbouw en kabels en leidingen

Bodemopbouw

De bodemopbouw op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij is als volgt te karakteriseren:

- maaiveld: circa +3,5 NAP;
- ophooglaag: van circa +3,5 tot -1,5 NAP;
- zandige kleilagen (holoceen): van circa -1,5 tot -19 NAP;
- eerste watervoerende pakket (pleistoceen): vanaf circa -19 NAP.

In de zandige kleilagen van het holocene pakket wordt op het terrein van SNR nog een tussen zandlaag onderscheiden, op een diepte van circa 10 m-mv en met een dikte van 1 à 2 meter.

Kabels en leidingen

In de figuren F2, F3 en F4 (zie bijlage F) is een overzicht van de drie trajecten gepresenteerd, waarin ook alle ondergrondse kabels en leidingen zijn aangegeven. Langs de rand bevindt zich een kademuur met talud. In de haven liggen de steigers 2 en 4. In de trajecten bevindt zich een leidingentracé tussen de kade en weg 10A. In traject 1 bevinden zich aan de andere zijde van de weg tankputten. In traject 2 en 3 zijn langs de weg kantoren en een parkeerplaats aanwezig. Het overzicht van de kabels en leidingen laat geen ongebruikelijk beeld zien voor het terrein.

4.2 Geohydrologie

Grondwaterstanden

Ten behoeve van het uitvoeren van de doorlatendheidsmetingen en het opstellen van een grondwaterstromingsmodel is van een aantal peilbuizen de grondwaterstand ingepeild. De peilbuizen zijn weergegeven op de figuren F2, F3 en F4 (zie bijlage F). De resultaten zijn weergegeven in tabel 1. Bij het opstellen van het grondwaterstromingsmodel zal nader worden ingegaan op deze meetresultaten.

Doorlatendheidsmetingen

Ten behoeve van het opstellen van het grondwaterstromingsmodel is de doorlatendheid van de zandige ophooglaag op een aantal plaatsen bepaald. De bepalingen zijn gebaseerd op korrelgrootteverdelingen van grondmonsters en op pompproeven in peilbuizen. In tabel 2 zijn de resultaten van de doorlatendheidsmetingen vermeld. In bijlage A wordt ingegaan op de gegevens en methodieken die aan deze resultaten ten grondslag liggen.

De doorlatendheid ligt in zijn algemeenheid tussen 1 en 2 m/dag. Een lage uitschieter wordt gevormd door het grondmonster uit boring A01015. De doorlatendheid is hier laag ten gevolge van een hoog lutum- en slibgehalte in het monster (mogelijk 'verontreiniging' van het zandmonster door de onderliggende kleilaag). Een hoge uitschieter wordt gevormd door G03016 waar bij de stopproef een doorlatendheid van 4,3 m/dag is bepaald. Hiervoor is niet direct een verklaring te vinden.

Tabel 1. Resultaten van de grondwaterstandsmetingen.

meet-punt	diepte filter	bovenzijde buis	grondwaterstandsmetingen							
			18-08-1997		25-09-1997		17-10-1997		19-12-1997	
code	m-mv	m +NAP	m -bkpb	m +NAP	m -bkpb	m +NAP	m -bkpb	m +NAP	m -bkpb	m +NAP
A01002	15,00 - 16,00	4,08	-	-	-	-	-	-	4,07	0,01
A01004	4,00 - 4,50	4,76	-	-	-	-	-	-	3,67	1,09
A01006	4,20 - 4,70	4,70	-	-	-	-	3,40	1,30	3,25	1,45
A01015	3,50 - 4,50	4,12	-	-	2,98	1,14	2,95	1,17	2,88	1,24
A01016	3,00 - 4,00	3,25	-	-	2,09	1,16	-	-	-	-
A02001	24,00 - 25,00	4,38	-	-	-	-	-	-	4,60	-0,22
A02016	2,70 - 3,70	3,78	-	-	-	-	-	-	2,49	1,89
G01002	3,50 - 4,00	4,12	-	-	-	-	-	-	2,69	1,43
G01003	3,00 - 4,00	3,50	-	-	-	-	-	-	1,95	1,55
G01004	3,00 - 4,00	3,16	-	-	1,86	1,30	1,69	1,47	-	-
G01005	3,00 - 4,00	3,64	-	-	2,38	1,26	2,37	1,27	2,18	1,46
G01006	3,00 - 4,00	3,17	-	-	1,93	1,24	-	-	-	-
G01007	3,00 - 4,00	3,22	-	-	1,97	1,25	-	-	-	-
G01201	3,00 - 3,50	3,99	-	-	-	-	2,58	1,41	2,47	1,52
G03006	1,70 - 2,70	3,69	2,15	1,54	-	-	-	-	-	-
G03007	1,80 - 2,80	3,82	2,30	1,52	-	-	-	-	-	-
G03008	0,50 - 1,50	2,94	1,40	1,54	-	-	-	-	-	-
G03009	0,50 - 1,50	3,03	1,46	1,57	-	-	-	-	-	-
G03010	0,20 - 1,20	2,00	0,54	1,46	-	-	-	-	-	-
G03011	0,00 - 1,00	2,02	0,60	1,42	-	-	-	-	-	-
G03016	3,00 - 4,00	3,69	-	-	-	-	1,98	1,71	2,04	1,65
G03202	3,50 - 4,00	4,10	2,53	1,57	2,60	1,50	-	-	-	-

Tabel 2. Resultaten van de doorlatendheidsmetingen.

meetpunt	diepte filter <i>diepte grondmonster</i>	doorlatendheid (m/dag)		
		korrelgrootteverdeling	constant debietproef	stopproef *
A01006	4,20 - 4,70		1,2	1,5 (2,6)
A01015	3,50 - 4,50		1,1	2,0 (3,4)
	3,50 - 4,00	0,33		
G01004	3,00 - 4,00		0,7	1,9 (3,3)
G01005	3,00 - 4,00		0,7	1,0 (1,7)
G01006	3,00 - 3,50	1,6		
G01201	3,00 - 3,50		1,2	X
G03016	3,00 - 4,00		1,5	4,3 (7,4)
	3,00 - 3,50	1,9		

Toelichting: * tussen haakjes is de berekende kD -waarde (m⁵/dag) weergegeven voor de ophooglaag; de k -waarde is afgeleid door de kD -waarde te delen door de geschatte dikte van de watervoerende laag; deze is ingeschat op 1,7 meter

X waarde niet te bepalen

4.3 Verontreinigingssituatie

Minerale olie en BTEX

Aan de hand van de resultaten uit eerdere bodemonderzoeken, de resultaten van de jaarlijkse monitoring op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij en aanvullend onderzoek op de locatie wordt een beeld geschetst van de verontreinigingssituatie voor minerale olie en BTEX in de drie geselecteerde trajecten. De karakterisatie is vooral gericht op het grondwater, omdat het biologisch hekwerk is bedoeld om de mobiele verontreinigingen aan te pakken. In bijlage B zijn alle analyseresultaten voor grond en grondwater van het uitgevoerde veldonderzoek opgenomen. In grond is slechts een beperkt aantal concentratiemetingen gedaan om inzicht te krijgen in die fractie die tijdens de verspreiding in het grondwater adsorbeert aan de gronddeeltjes. De concentratiemetingen voor grond zijn samengevat in tabel 3. De concentratiemetingen voor grondwater zijn samengevat in tabel 4 en 5.

Uit de resultaten blijkt dat in alle trajecten minerale olie en BTEX aanwezig zijn. De minerale olie bestaat voornamelijk uit lichte componenten, ongeveer tot C16, in concentraties variërend van 260 tot 15.000 µg/l. De BTEX-concentraties worden soms veroorzaakt door benzeen, soms door xyleen. Toluëen en ethylbenzeen zijn alleen in lage concentraties aanwezig.

Tabel 3. Concentraties in grond.

	diepte monster (m-mv)	minerale olie GC (C10 - C40)					
		mg/kgds	fractie C10 - C14 %	fractie C14 - C20 %	fractie C20 - C26 %	fractie C26 - C34 %	fractie C34 - C40 %
G01004	3,30 - 3,80	<	<	<	<	<	<
G01006	3,00 - 3,50	300	45	35	10	5	<
G03016	3,00 - 3,50	610	65	20	10	5	<
A01015	3,50 - 4,00	10.000	35	50	15	5	<
G03005	2,40 - 2,90	5.700	90	5	<	<	<
G03005	3,40 - 3,90	<	<	<	<	<	<
G03005	3,90 - 4,40	<	<	<	<	<	<
G03005	4,40 - 5,00	<	<	<	<	<	<

Concentratieprofiel over de diepte

De bemonsterde peilbuizen hebben bijna allemaal een filter van een meter of een halve meter lengte, geplaatst op een diepte tussen de 3,00 en 4,50 m-mv. Het biologisch hekwerk zal worden geplaatst vanaf het maaiveld tot een diepte van ongeveer 4,0 m. Voor de monitoring van het hekwerk is het van belang om het concentratieprofiel voor minerale olie en BTEX over de diepte te kennen, zodat bekend wordt op welke diepte de minerale olie en BTEX zich vooral verspreiden. Daartoe is een opstelling gemaakt, zoals is gevisualiseerd in figuur 1. De resultaten van de concentratiemetingen staan grafisch uitgezet in figuur 2. Daarbij zijn ook de geanalyseerde concentraties in grond op dezelfde diepten uitgezet. Uit de grafiek blijkt dat de concentraties minerale olie en BTEX in grondwater afnemen over de diepte. Verspreiding van minerale olie en BTEX vindt vooral plaats in de bovenste meter vanaf de grondwaterspiegel.

Tabel 4. Concentraties in grondwater.

meetpunt code	diepte filter m-mv	monitoring 1997 (mei)	september 1997						september 1997			
		minerale olie IR	minerale olie GC						minerale olie vluchtige GC			
		µg/l	µg/l	fractie C10- C14%	fractie C14- C20%	fractie C20- C26%	fractie C26- C34%	fractie C34- C40%	µg/l	fractie C6-C8%	fractie C8-C10%	fractie C10- C12%
traject 1												
A01004	4,00 - 4,50	910	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
A01003	3,50 - 4,00	2.780	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
A01006	4,20 - 4,70	9.610	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
A01015	3,50 - 4,50	--	600	65	30	5	<	<	1.300	20	30	50
A01016	3,00 - 4,00	--	480	65	25	10	<	<	2.400	35	25	40
traject 2												
G01001	3,50 - 4,00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
G01002	3,50 - 4,00	6.950	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
G01003	3,50 - 4,00	740	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
G01201	3,00 - 3,50	290	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
G01004	3,00 - 4,00	--	570	85	15	<	<	<	1.100	20	20	60
G01005	3,00 - 4,00	--	2.800	95	<	<	<	<	5.200	15	30	55
G01006	3,00 - 4,00	--	810	85	10	5	<	<	2.400	35	25	40
G01007	3,00 - 4,00	--	920	60	25	10	5	<	2.200	35	25	40
traject 3												
G03005	5,05 - 5,15	--	260	100	<	<	<	<	--	--	--	--
G03005	4,20 - 4,30	--	680	100	<	<	<	<	--	--	--	--
G03005	3,45 - 3,55	--	3.900	95	<	<	<	<	--	--	--	--
G03005	2,70 - 2,80	--	15.00	95	<	<	<	<	--	--	--	--
G03016	3,00 - 4,00	--	0 6.400	100	<	<	<	>	11.00 0	<	15	80

Toelichting: < kleiner dan de detectiegrens; -- niet geanalyseerd

Tabel 5. Concentraties in grondwater.

meetpunt code	diepte filter m-mv	monitoring 1997 (mei)	september 1997			
		BTEX	benzeen	tolueen	ethylbenzeen	xylenen
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
traject 1						
A01004	4,00 - 4,50	32	--	--	--	--
A01003	3,50 - 4,00	21	--	--	--	--
A01006	4,20 - 4,70	5,4	--	--	--	--
A01015	3,50 - 4,50	--	3,0	1,2	2,4	5,2
A01016	3,00 - 4,00	--	1.200	17	18	10
traject 2						
G01001	3,50 - 4,00	--	--	--	--	--
G01002	3,50 - 4,00	--	--	--	--	--
G01003	3,50 - 4,00	833	--	--	--	--
G01201	3,00 - 3,50	143,5	--	--	--	--
G01004	3,00 - 4,00	--	350	1,4	7,2	4,9
G01005	3,00 - 4,00	--	100	61	240	300
G01006	3,00 - 4,00	--	640	41	120	91
G01007	3,00 - 4,00	--	85	21	44	72
traject 3						
G03005	5,05 - 5,15	--	17	0,7	1,6	3,0
G03005	4,20 - 4,30	--	3,3	0,4	1,5	2,4
G03005	3,45 - 3,55	--	700	1,9	13	5,7
G03005	2,70 - 2,80	--	1.300	16	60	260
G03016	3,00 - 4,00	--	170	3,2	28	28

Fig. 1. Proefopstelling ten behoeve van het profiel over de diepte.

Fig. 2. Concentratieprofiel over de diepte.

4.4 Milieuomstandigheden

Zuurstof en redox

Om de redoxcondities in de huidige situatie vast te stellen zijn verspreid over de trajecten in het veld tweemaal zuurstofmetingen en redoxmetingen uitgevoerd in het grondwater, naast pH, Ec en temperatuur. De resultaten zijn samengevat in tabel 6. In de eerste meetronde is over alle trajecten het beeld constant. Er wordt geen zuurstof aangetoond in het grondwater en de redox-potentiaal ligt op circa -150 mV. In de tweede ronde zijn de resultaten van de redoxmetingen iets lager, rond de -250 mV. De concentraties zuurstof in de tweede ronde laten een wisselend beeld zien met lage en hoge concentraties. Hoge concentraties zuurstof zouden echter ook een hoge redoxpotentiaal moeten veroorzaken. Omdat dit niet het geval is, wordt aangenomen dat de oorzaak ligt bij de meting. In deze ronde is een doorstroomcel gebruikt, waarin de zuurstofelektrode zich bevindt. Daarbij is voor zuurstof kennelijk beïnvloeding opgetreden. Omdat de eerste ronde metingen wel een consistent beeld geeft, wordt ervan uitgegaan dat het grondwater anaëroob is.

Tabel 6. Veldmetingen van grondwater.

meetpunt code	diepte filter m-mv	25 september 1997, voor G03005: 13 augustus 1997					19 december 1997				
		T	pH	Ec	redox	zuurstof	T	pH	Ec	redox	zuurstof
		°C		µS/cm	mV	mg/l	°C		µS/cm	mV	mg/l
traject 1											
A01015	3,50 - 4,50	17,1	6,9	1.919	-143	0,2	14,1	6,7	1.480	-306	9,3
A01016	3,00 - 4,00	17,8	6,7	1.060	-123	0,2	--	--	--	--	--
traject 2											
G01004	3,00 - 4,00	18,1	7,2	1.188	-162	0,4	--	--	--	--	--
G01005	3,00 - 4,00	19,4	6,8	2.140	-140	0,3	15,4	6,8	2.330	-270	6,1
G01006	3,00 - 4,00	17,4	6,7	1.228	-143	0,3	--	--	--	--	--
G01007	3,00 - 4,00	18,2	6,6	1.254	-140	0,2	--	--	--	--	--
traject 3											
G03005 ¹	5,05 - 5,15	17,2	6,9	3.800	--	--	10,7	6,7	3.870	-225	8,5 - 10,5
G03005	4,20 - 4,30	16,9	7,0	2.810	--	--	11,6	6,9	3.560	-249	8,1
G03005	3,45 - 3,55	17,3	6,8	1.421	--	--	10,5	6,6	2.060	-207	0,8
G03005	2,70 - 2,80	19,0	6,7	881	--	--	9,9	6,6	1.470	-173/-184	0,7
G03016	3,00 - 4,00	18,0	6,6	1.909	-132	0,2	13,2	6,5	1.960	-236	1,9

Toelichting:

-- niet geanalyseerd

1 vanwege grote druk 'kookte' het grondwater, de zuurstofconcentratie fluctueert

Macroparameters

Naast de veldmetingen zijn in het laboratorium nitraat, stikstof-Kjeldahl, twee- en driewaardig ijzer, mangaan, sulfaat, fosfaat, carbonaat en bicarbonaat geanalyseerd in grondwater. In tabel 7 zijn de resultaten weergegeven. De concentraties tweewaardig ijzer en het ontbreken van driewaardig ijzer wijzen op een gereduceerd milieu, zoals ook de redoxpotentiaal al aangeeft. Mangaan is slechts in geringe mate aanwezig in het grondwater. De sulfaatconcentraties geven een vreemd beeld. Ze wisselen sterk van 0,10 tot 210 mg/l. Het is mogelijk dat plaatselijk sulfaat-reductie plaatsvindt, omdat daar ijzer niet voldoende beschikbaar is.

Tenslotte blijkt uit de geringe hoeveelheid nitraat en fosfaat dat er weinig nutriënten in het grondwater aanwezig zijn. Het is wel mogelijk dat nitraat en fosfaat alleen in de biomassa zijn vastgelegd.

Tabel 7. Macroparameters in grondwater.

meetpunt code	diepte filter m-mv	25 september 1997						30 december 1997								
		ijzer II	ijzer III	B.Z.V. 20 °C 5 dagen	B.Z.V. 20 °C 10 dagen	B.Z.V. 20 °C 20 dagen	C.Z.V.	ijzer II	mangaan	Kjeldahl- stikstof als N	nitraat als N	sulfaat	o-fosfaat als P	carbo- naat	bicar- bonaat	
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
traject 1																
A01015	3,50 - 4,50	1,7	<	<	10	9	55	0,6	1,1	<	<	38	<	<	880	
A01016	3,00 - 4,00	37	<	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
traject 2																
G01004	3,00 - 4,00	3,6	2,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
G01005	3,00 - 4,00	16	<	--	--	--	--	15	2,3	2,4	<	0,26	<	<	890	
G01006	3,00 - 4,00	55	<	<	9	15	94	--	--	--	--	--	--	--	--	
G01007	3,00 - 4,00	75	<	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
traject 3																
G03005	5,05 - 5,15	--	--	--	--	--	--	19	3,9	7,7	<	150	<	<	1.200	
G03005	4,20 - 4,30	--	--	--	--	--	--	13	2,4	8,1	<	210	<	<	1.200	
G03005	3,45 - 3,55	--	--	--	--	--	--	30	1,8	7,0	<	0,24	<	<	1.300	
G03005	2,70 - 2,80	--	--	--	--	--	--	37	2,4	3,8	<	180	<	<	780	
G03016	3,00 - 4,00	49	<	--	--	--	--	48	2,8	4,2	<	0,17	<	<	990	

Organisch stof

Ter bepaling van andere koolstofbronnen is organisch stof in grond en BZV en CZV in grondwater bepaald. De BZV-bepaling is uitgevoerd na 5, 10 en 20 dagen. De resultaten van de BZV- en de CZV-metingen zijn grafisch gepresenteerd in figuur 3.

Fig. 3. Resultaten van BZV- en CVZ-bepalingen.

Duidelijk is te zien dat de BZV in de tijd nog verder oploopt. De concentraties organisch stof in de grond zijn gemiddeld 0,75 volume %. De hoeveelheid organische stof en ook de hoeveelheid afbreekbaar organisch stof is relatief hoog vergeleken bij andere zandbodems. De hoge waarden kunnen echter ook worden veroorzaakt door de aanwezigheid van minerale olie.

4.5 Micro-organismen

In bijlage C zijn de resultaten van een aantal biomassabepalingen opgenomen. Deze telling geldt als nulmeting, waarna in latere fasen opnieuw tellingen kunnen worden uitgevoerd om een indicatie te krijgen van de groei van deze bacteriën. De resultaten zijn weergegeven in tabel 8. Opvallend is dat geen BTEX-afbrekende bacteriën zijn aangetroffen.

Tabel 8. Resultaten van biomassabepalingen.

boring	diepte (m-mv)	droge stof (%)	MPN-totaal	MPN-terpentine	MPN-BTEX
G01008	2,0 - 2,5	82,1	$7,6 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^4$	$< 2,8 \cdot 10^2$
G01008	4,0 - 4,5	72,4	$1,3 \cdot 10^5$	$7,6 \cdot 10^3$	$< 3,2 \cdot 10^2$

HOOFDSTUK 5

CONCLUSIES

Uit het historisch onderzoek en het veldonderzoek blijkt dat de geselecteerde trajecten als volgt kunnen worden gekarakteriseerd:

- in de trajecten is het grondwater verontreinigd met minerale olie en BTEX;
- in de trajecten stroomt het freatische grondwater vanaf het terrein richting de petroleumhaven;
- de doorlatendheid in het freatische pakket ligt tussen de 1 en 2 meter per dag;
- de verspreiding van minerale olie en BTEX vindt plaats in de bovenste meter vanaf de grondwaterspiegel;
- in de huidige situatie wordt aangenomen dat het grondwater volledig anaëroob is en ijzerreducerend. Dit zal in een aanvullende meetronde worden geverifieerd. Omdat wordt uitgegaan van een aëroob systeem zal zuurstof moeten worden toegevoegd;
- in het grondwater bevindt zich weinig nitraat en geen fosfaat. Indien het tekort aan nutriënten de groei van de micro-organismen afremt, zullen nutriënten moeten worden toegevoegd;
- de hoeveelheid (afbreekbaar) organisch stof is relatief hoog vergeleken met gehalten in veel zandbodems.

De geselecteerde trajecten zijn in potentie geschikt om een hekwerk te plaatsen, waarin ter plaatse de verspreiding van de aanwezige verontreinigingen wordt beperkt of opgeheven.

DEEL 2

VOORSPELLEN VAN VERSPREIDING EN AFBRAAK IN HET BIOLOGISCH HEKWERK

Uit de karakterisatie blijkt in kwalitatieve zin dat er voldoende potentie is om een biologisch hekwerk te ontwerpen. In dit deel wordt met behulp van een geohydrologisch model en een stoftransportmodel, waarin afbraak wordt meegenomen, gerekend aan de snelheid van verspreiding en de mate van afbraak in het biologisch hekwerk. Omdat in de modellen de dimensies van het biologisch hekwerk moeten worden ingevoerd, is uitgegaan van 'bakken' met een diepte van 4 meter, een breedte van 2 meter en een lengte van 40 meter. Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat de bak of uit water bestaat, of uit een mengsel van zand met een grover materiaal en dat een aëroob systeem wordt gecreëerd. Deze aannamen zullen verder worden geoptimaliseerd. De modelberekeningen laten zien hoe het hekwerk zal functioneren en welke parameters daarbij vooral belangrijk zullen zijn.

HOOFDSTUK 6

GEOHYDROLOGISCHE MODELLERING

Voor het ontwerpen van het biologisch hekwerk is een geohydrologisch model opgesteld. Voor de modelberekeningen is gebruik gemaakt van het analytisch elementenmodel MLAEM (Multi Layered Analytical Elements Model). Een korte beschrijving van dit model is weergegeven in bijlage D.

Het model maakt onderscheid tussen watervoerende lagen om horizontale stroming te modelleren en slecht doorlatende lagen om verticale stroming te modelleren. Parameters die ingevoerd dienen te (kunnen) worden zijn:

- dikte en basis van de watervoerende en slecht doorlatende lagen;
- doorlatendheid van de watervoerende lagen;
- hydraulische weerstand van de slecht doorlatende lagen;
- nuttige neerslag;
- geohydrologische randvoorwaarden (gradiënten in de stroming, aanwezigheid van watergangen en dergelijke).

6.1 Schematisatie van bodemopbouw en geohydrologie ten behoeve van het model

Allereerst is de uitgangssituatie voor het model vastgelegd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de beschikbare gegevens (boringen, sonderingen, grondwaterstandsmetingen en dergelijke) op de verschillende terreindelen [3], [4] en [5].

De dikten van de verschillende lagen alsmede de horizontale doorlatendheden en verticale hydraulische weerstanden zijn weergegeven in tabel 9. Op basis van de beschikbare gegevens is wat betreft de bodemopbouw onderscheid gemaakt tussen de locatie G03 enerzijds en de locaties G01 en A01 anderzijds.

Tabel 9. Schematisatie van bodemopbouw en geohydrologie.

diepte (m t.o.v. NAP)		laag	bodemparameters	bron gegevens
G03	G01/A01			
+3,5 tot -1,0	+3,5 tot -0,5	ophooglaag	$k_1 = 1 \text{ à } 2 \text{ m/dag}$	metingen
-1,0 tot -2,0	-0,5 tot -1,5	polderklei (oude maaiveld)	$c_1 = 2.500 \text{ dagen}$	literatuur
-2,0 tot -7,0	-1,5 tot -9,0	holocene tussenzandlaag	$k_2 = 1 \text{ m/dag}$	literatuur
vanaf -7,0	vanaf -9,0	holocene kleilagen (basis model)	$c_2 = \infty \text{ dagen}$	¹⁾

Toelichting:

¹⁾ Voor de basis van het model is per definitie een oneindig hoge weerstand ingevoerd (ondoorlatende basis).

De eerste Petroleumhaven is ingevoerd als drainelement. Het (gemiddelde) waterpeil is ingesteld op NAP +0,3 m [4]. Langs de eerste Petroleumhaven is een taludconstructie aanwezig. Uit eerder uitgevoerde modelberekeningen [4] komt een weerstand voor de kadeconstructie naar voren van circa 30 dagen. Uit metingen [4] blijkt verder dat het freatische grondwater en het grondwater in de tussenzandlaag niet tot nauwelijks invloed ondervindt van de getijdenwerking. Het watervoerende pakket ondervindt daarentegen wel invloed. Deze laag is echter niet in het model meegenomen, omdat het biologisch hekwerk alleen in het freatische pakket wordt geplaatst. De nuttige neerslag, die is ingevoerd, bedraagt 0,4 mm/dag.

6.2 Peilen, verhang en stromingsrichting ten behoeve van het model

Voor wat betreft de grondwaterstanden op de locaties worden de volgende situaties als representatief gezien:

Locatie G01/G01

Ophooglaag: Direct achter het talud bedraagt de gemiddelde grondwaterstand NAP +1,20 à +1,50 m (december '97, oktober '97 gaf iets lagere waarden), naar het achterland toe loopt de grondwaterstand op naar circa NAP +1,89 m. Ter plaatse van het achterland van deze locaties bevindt zich tankput 9, deze locatie wordt geohydrologisch beheerst in het kader van PER⁺. Het beheersniveau op deze locatie (freatisch en middeldiep) bedraagt NAP -0,5 m. Ten gevolge hiervan is tussen de locaties van het biologisch hekwerk en tankput 9 een waterscheiding aanwezig (locatie is niet vast te stellen op basis van de beschikbare metingen). In ieder geval is er ter plaatse van de locatie sprake van stroming in de richting van en loodrecht op de haven.

Tussenzandlaag: De stijghoogte bedraagt NAP 0,0 tot +0,2 m. Stroming in deze laag vindt eveneens plaats in de richting van de haven.

Locatie G03

Ophooglaag: Direct achter het talud bedraagt de gemiddelde grondwaterstand NAP +1,50 m. Een bijzonderheid bij deze locatie is de aanwezigheid van damwandschermen rond de tankputten aan de overzijde van weg 10A. Tussen deze damwandschermen (buiten de tankputten) is een ondiep drainagestelsel aanwezig om overtollige neerslag af te vangen. Deze drains beïnvloeden ook de stroming op de locatie. Uit extra metingen (uitgevoerd in het kader van een ander onderzoek in opdracht van Shell) blijkt dat er sprake is van een waterscheiding onder de leidingstraat noordwestelijk van weg 10A. Noordelijk van weg 10A stroomt het water in de richting van het drainagestelsel, onder/zuidelijk van weg 10A stroomt het water in de richting van de haven. Daarnaast is de stroming van het grondwater langs weg 10A, in noordelijke en zuidelijke richting, evenwijdig aan de haven. Vanwege de complexiteit van de stromings-situatie is in figuur F5 (zie bijlage F) een grafische weergave van de stromings-situatie gegeven (in deze figuur is ook gebruik gemaakt van gegevens die beschikbaar zijn gekomen in het kader van ander uitgevoerd onderzoek).

Tussenzandlaag: Ook hier is, evenals de locaties G01/A01, uitgegaan van een stijghoogte van circa NAP +0,2 m en een stroming in de richting van de haven.

6.3 Uitgevoerde berekeningen

Vanwege de complexe grondwaterstroming ter plaatse van de locatie G03 zijn de berekeningen in eerste instantie uitgevoerd met de situatie ter plaatse van de locaties G01/A01 als uitgangspunt. Hierbij is gerekend met een doorlatendheid van de ophooglaag (k_1) van 2 m/dag. In een later stadium zal worden bekeken wat het effect is op de resultaten bij een lagere doorlatendheid (1 m/dag).

Voor het biologisch hekwerk is uitgegaan van een 'bak' met een lengte van 40 meter en een breedte van 2 meter. De bak is over de volle diepte van de ophooglaag aanwezig (circa 4,5 m). De bak ligt op een afstand van 13 tot 15 meter vanaf de haven.

Achtereenvolgens zijn door middel van een aantal berekeningen de volgende situaties onderzocht:

1. invloed van de doorlatendheid van het biologisch hekwerk op grondwaterstroming en verblijftijd;
2. invloed van de in-/uittreeweerstand van het biologisch hekwerk op grondwaterstroming en verblijftijd;
3. onderlinge invloed van meerdere 'bakken' op grondwaterstroming en verblijftijd.

Voor een overzicht van de uitgevoerde berekeningen en ter verduidelijking wordt verwezen naar de figuren F6 tot en met F8 (zie bijlage F).

6.4 Resultaten

Invloed van de doorlatendheid

De invloed van de doorlatendheid van de bak op de stromingsrichting en verblijftijd is onderzocht door het uitvoeren van een aantal berekeningen, waarbij de doorlatendheid van de bak is gevarieerd. Uitgangspunt hierbij was de berekening waarbij de doorlatendheid in de bak even groot is als daarbuiten, namelijk 2 m/dag. Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de doorlatendheid in de bak is vergroot tot maximaal 1.000 m/dag (grof grind). Voor al deze berekeningen is de porositeit gesteld op 35 %. De verblijftijd in de bak is bepaald door uitvoering van stroombaanberekeningen. Uit deze berekeningen blijkt dat voor alle gevallen de verblijftijd circa 35 dagen bedraagt (variaties ± 1 dag). De gemiddelde stroomsnelheid in de bak bedraagt hiermee 0,057 m/dag.

Een tweede type berekening die is uitgevoerd betreft de situatie waarbij een sloot is gesimuleerd. Hierbij is de doorlatendheid binnen de bak groot gekozen (10.000 m/dag). Daarnaast is de porositeit gesteld op 100 %. Dit betreft dus de situatie waarbij sprake is van een 'schone' sloot, zonder enige vorm van weerstand in de vorm van sliblagen, beplanting en dergelijke. In dit geval wordt een verblijftijd berekend van 99 dagen, corresponderend met een gemiddelde stroomsnelheid van 0,02 m/dag. Hieruit blijkt dat de verblijftijd recht evenredig is met de porositeit van het doorstroomde medium. In figuur F6 (zie bijlage F) zijn de grondwaterstanden en stroombanen weergegeven voor een representatieve situatie.

Invloed van de in-/uittreeweerstand

Bij de aanleg van het biologisch hekwerk zullen graafwerkzaamheden worden uitgevoerd. Ten gevolge daarvan zou langs de randen van de bak door versmering/verdringing van grond een smalle zone kunnen ontstaan met extra weerstand. Ook door verstoppingen, veroorzaakt door ijzereerslagen of een ophoping van biomassa, kan de weerstand toenemen. Om het effect van deze weerstand op de grondwaterstroming en verblijftijd te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd.

Ten behoeve hiervan is de situatie bekeken waarbij rond de bak ($k = 1.000$ m/dag; $p = 35$ %) een smalle zone is aangebracht met een weerstand van respectievelijk 1, 5 en 10 dagen (ter verduidelijking: dit komt bij een versmeerde laagdikte van bijvoorbeeld 1 cm neer op een doorlatendheid van respectievelijk 0,01, 0,002 en 0,0001 m/dag).

In deze gevallen worden de volgende verblijftijden berekend:

- weerstand 1 dag: verblijftijd 34 dagen;
- weerstand 5 dagen: verblijftijd 46 dagen;
- weerstand 10 dagen: verblijftijd 58 dagen.

Uit de berekeningen blijkt dat bij toenemende weerstand de stuwing van grondwater bovengaan van de bak toeneemt. Ter plaatse van de uiteinden van de bak zal het grondwater, in het geval van een weerstand van 10 dagen, over een breedte van circa 8 meter vanaf de rand van de bak om het biologisch hekwerk heen stromen.

In figuur F7 (zie bijlage F) zijn de grondwaterstanden en stroombanen weergegeven voor een representatieve situatie.

Invloed van meerdere 'bakken'

Als derde situatie is gekeken naar het effect van meerdere bakken naast elkaar op de grondwaterstroming. Deze berekening is uitgevoerd om te bepalen in hoeverre naast elkaar gelegen bakken met verschillende condities (k -waarden, weerstand langs de rand) elkaar beïnvloeden. In hoeverre zou het kunnen voorkomen dat water, bovenstrooms van 'bak 1' uiteindelijk via 'bak 2' richting haven zal stromen.

Om dit te onderzoeken is een berekening uitgevoerd met 2 bakken, elk met een lengte van 40 meter en een breedte van 2 meter, op een onderlinge afstand van 5 meter naast elkaar. Voor de ene bak (1) is de situatie aangehouden met de sloot ($k = 10.000$ m/dag; $p = 35$ %) en een lage weerstand langs de rand (1 dag), voor de andere bak (2) is gerekend met een k -waarde van 10 m/dag, een porositeit van 35 % en een hoge weerstand langs de rand (10 dagen). Voor een overzicht van deze situatie wordt verwezen naar figuur F8 (zie bijlage F).

Uit de berekening blijkt dat ten gevolge van de weerstand ter plaatse van bak 1 een deel van het water bovenstrooms van deze bak om het hekwerk heen zal stromen (over een breedte van circa 8 meter). De invloed van bak 2 is, ten gevolge van de bergingscapaciteit en lage weerstand, juist groter dan bak 1. Water binnen een strook van circa 3 meter tussen bak 1 en bak 2 zal nog in het biologisch hekwerk terechtkomen. Verder laten de berekeningen zien dat het grote verschil in doorlatendheid en verschil in weerstand geen effect heeft op de stromingsrichting van het grondwater in die zin dat één van beide bakken een preferente stroombaan voor het grondwater gaat vormen dat zich bovenstrooms van de andere bak bevindt.

6.5 Conclusies

Op basis van het tot nu toe uitgevoerde modelonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De verblijftijd van grondwater binnen het biologisch hekwerk hangt niet af van de doorlatendheid van het gebruikte materiaal waarmee het hekwerk wordt uitgevoerd, maar wel van de porositeit van het mengsel. Een grote porositeit betekent een langere verblijftijd. Naast de samenstelling van het materiaal vormt dus ook de verdichting van het materiaal na aanbrengen een belangrijk aspect.
- Om de verblijftijd binnen het biologisch hekwerk te vergroten zou de breedte van de bak kunnen worden vergroot.
- Weerstand langs de randen van de bak zorgt echter ook voor het afbuigen van stroombanen om de bak heen en daarmee voor een afname van het invloedsgebied van het biologisch hekwerk op het bovenstrooms gelegen grondwater. Dit effect kan worden opgeheven door de bak langer te maken.
- Ten gevolge van de verschillen in doorlatendheid, porositeit en weerstand tussen naast elkaar gelegen bakken is geen onderlinge beïnvloeding te verwachten. De situatie waarbij grondwater bovenstrooms van 'bak 1' uiteindelijk terecht zal komen in 'bak 2' is niet waarschijnlijk.

6.6 Aanbevelingen

Op basis van nog uit te voeren metingen en inzichten kan het stromingsmodel worden aangepast/verfijnd. Hierbij dient in ieder geval nog te worden gekeken naar het effect van een geringere doorlatendheid ($k = 1$ m/dag) en een minder steil verhang (lagere grondwaterstand stroomopwaarts) op de berekeningsresultaten.

HOOFDSTUK 7

STOFTRANSPORT EN BIOLOGISCHE AFBRAAK

Om voorspellingen te kunnen doen over de snelheid waarmee de verontreinigingen in het grondwater zich door het hekwerk verplaatsen en over de mate van afbraak, zijn stoftransportberekeningen uitgevoerd.

De berekeningen zijn uitgevoerd met het door IWACO ontwikkelde programma SORWACO. SORWACO beschrijft stoftransport in de verzadigde zone, waarbij rekening wordt gehouden met sorptie aan organische stof, verschillende snelle en langzame evenwichtsprocessen, longitudinale dispersie en biologische afbraak. De berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel BTEX als minerale olie.

In 7.1 zijn allereerst de randvoorwaarden beschreven. Vervolgens worden de belangrijkste fysisch-chemische parameters besproken in 7.2. De resultaten van de berekeningen en de daaruit volgende conclusies worden in 7.3 besproken.

7.1 Randvoorwaarden

Bij de berekeningen in SORWACO is van de volgende randvoorwaarden uitgegaan:

- het biologisch hekwerk heeft een breedte van 2 meter;
- het hekwerk bestaat uit een mengsel van zand en een grover toeslagmateriaal. Het zand dat in het hekwerk wordt verwerkt, is afkomstig van de locatie en zodoende reeds verontreinigd, terwijl het toeslagmateriaal (op $t = 0$) schoon is;
- het hekwerk wordt redelijk homogeen doorstroomd; met andere woorden: een gering (maar niet verwaarloosd) deel van de bodem heeft een afwijkende (lagere) stroomsnelheid;
- er vindt constante aanvoer van verontreinigingen plaats;
- er vindt geen vervluchtiging van verontreinigingen plaats;
- er wordt uitgegaan van lineaire sorptie.

7.2 Fysisch-chemische parameters

Stofspecifieke parameters

Voor het biologisch hekwerk zijn stoftransportberekeningen uitgevoerd voor de volgende stoffen:

- minerale olie (C10 - C14);
- benzeen;
- xylenen.

Belangrijke stofspecifieke parameters in het stoftransportmodel zijn:

- de concentratie van de verontreiniging (C_i , uitgedrukt in $\mu\text{g/l}$);
- de verdelingscoëfficiënt van de verontreiniging (K_{om} , uitgedrukt in l/kg);
- de biologische afbraaksnelheidscoëfficiënt (K_a , eerste orde, uitgedrukt in d^{-1}).

In tabel 10 staan de in het model gebruikte C_i -, K_{om} - en K_a -waarden voor de verschillende stoffen weergegeven. De bij de afbraaksnelheidscoëfficiënt behorende halfwaardetijd (in dagen) is tussen haakjes vermeld.

Tabel 10. K_{om} - en K_a -waarden voor de verschillende componenten.

component	C_i ($\mu\text{g/l}$)	K_{om} (l/kg)	K_a (d^{-1})	
			natuurlijke afbraak (NA)	$5 \cdot \text{NA}$
minerale olie (C10 - C14)	5000	1200 ¹⁾	0,006 (115)	0,03 (23)
benzeen	1000	63 ²⁾	0,006 (115) ⁴⁾	0,03 (23)
xylenen	100	390 ³⁾	0,016 (43) ⁵⁾	0,08 (9)

Toelichting:

- 1) bepaald op basis van de oplosbaarheid (Lagas et al., 1990), waarbij $S = 50 \text{ mg/l}$
- 2) uit: Bodembescherming, Handboek voor Milieubeheer, 1994
- 3) uit: Bodembescherming, Handboek voor Milieubeheer, 1994 (gemiddelde van o-,m-,p-xyleen)
- 4) gemiddelde op basis van Chiang et al. (1989), Wilson et al. (1995) en Wilson et al. (1990)
- 5) gemiddelde op basis van Wilson et al. (1995) en Wilson et al. (1990)

De in tabel 10 genoemde waarden voor de natuurlijke afbraaksnelheid zijn gebaseerd op de *intrinsieke* afbraaksnelheid van enkele praktijkcases onder vergelijkbare omstandigheden, dat wil zeggen: een duidelijk aëroob milieu ($8 \text{ à } 9 \text{ mg/l O}_2$), een bodemtemperatuur van circa $10 \text{ }^\circ\text{C}$ en een bodem bestaande uit middelfijn zand met grind ('gravel'). Deze waarden kunnen als *minimaal* worden beschouwd voor het biologisch hekwerk. Tevens zijn, om gevoel te krijgen voor de invloed van de afbraaksnelheid op het concentratieverloop, voor de SORWACO-berekeningen afbraaksnelheden gebruikt die een factor 5 hoger liggen dan de intrinsieke (minimale) afbraaksnelheden.

De afbraaksnelheden, zoals die gemeten worden in een bioreactor, geven een indicatie van de *maximaal* mogelijke afbraaksnelheden voor het biologisch hekwerk. Onder optimale omstandigheden treedt in (aërobe) bioreactoren op geen enkel moment zuurstofdeficiëntie op en vindt optimaal contact plaats tussen micro-organismen en verontreiniging. In bioreactoren worden voor BTEX K_a -waarden bereikt van 1 d^{-1} en hoger. Dit komt overeen met halfwaardetijden van 0,7 d en lager.

Bodem- en sorptiekaracteristieke parameters

De voor de berekeningen gebruikte waarden van bodem- en sorptiekaracteristieke parameters zijn weergegeven in tabel 11.

Tabel 11. Gebruikte waarden voor bodem- en sorptiekaracteristieke parameters.

hekwerk	soortelijk gewicht (kg/m^3)	poriënfractione	organische stof-fractie (g/g)	sorptiesnelheids-coëfficiënt
zand/toeslag (1 : 1)	1750	0,20	0,4 %	$0,005 \text{ d}^{-1}$

Het organisch stofgehalte van het zand is circa 0,8 %. Het organisch stofgehalte van de toeslag is verwaarloosbaar.

7.3 Resultaten en conclusies

Er zijn verschillende varianten doorgerekend, zodat een idee wordt verkregen van de invloed van verblijftijd en afbraaksnelheid op de concentraties die verwacht kunnen worden na passage van het biologisch hekwerk. De variabelen die hiervoor gebruikt zijn, zijn de volgende: verontreinigingscomponent (voornamelijk verdelingscoëfficiënt), soort hekwerk, verblijftijd en afbraakconstante. De sloot als biologisch hekwerk, met een verblijftijd van circa 99 dagen, is niet meegenomen in de berekeningen.

In de grafieken in de figuren 4, 5 en 6 is het concentratieverloop in de bodem direct na het biologisch hekwerk weergegeven. Uit de grafieken blijkt dat het enige tijd duurt voordat een constante concentratie wordt bereikt in de bodem direct na het biologisch hekwerk (doorbraakcurve). Voor de vereiste werking van het biologisch hekwerk zal de concentratie die bereikt wordt na het doorlopen van het hekwerk kleiner moeten zijn dan de I-waarde voor de betreffende stof. In de grafieken is het I-waarde niveau voor de betreffende stoffen aangegeven. Tevens is aangegeven bij welke aannamen de curven verkregen zijn: het eerste getal geeft de waarde van de verblijftijd in de biologisch actieve zone (het hekwerk) weer, het tweede getal geeft de waarde van de afbraaksnelheidscoëfficiënt weer.

Voor xylenen blijkt een geringe afbraaksnelheid en/of verblijftijd reeds voldoende te zijn teneinde de vereiste afbraak in het hekwerk te bewerkstelligen. De invoerconcentratie ligt voor xylenen dan ook in de buurt van de I-waarde, zodat een geringe biologische afbraak en een geringe verblijftijd al leiden tot het gewenste resultaat.

Anders ligt dat voor minerale olie en benzeen. Bij de in de literatuur vermelde (minimale) natuurlijke afbraaksnelheden wordt het gewenste eindresultaat nog niet bereikt. Doordat in het biologisch hekwerk actief zuurstof wordt toegevoegd, zal de te realiseren afbraaksnelheid echter een waarde hebben die zich bevindt tussen de minimale (natuurlijke) en de maximale (bioreactor) afbraaksnelheid.

Fig. 4. Stoftransport en afbraak van minerale olie.

Fig. 5. Stoftransport en afbraak van benzeen.

Fig. 6. Stoftransport en afbraak van xylenen.

DEEL 3

ONTWERP

Uit de modelberekeningen blijkt dat het stromingsbeeld, ook wanneer meerdere bakken naast elkaar worden geplaatst, niet zodanig verandert dat dit een nadelige invloed zou kunnen hebben op de werking van het biologisch hekwerk. Uit de stoftransportberekeningen blijkt dat veel aandacht moet worden besteed aan de optimalisering van de omstandigheden voor de biologische afbraak. Een goede werking hangt sterk af van de verblijftijd in het hekwerk en de afbraaksnelheden. In dit deel wordt eerst kort ingegaan op de resultaten van de kolomproeven die bij TNO-MEP zijn uitgevoerd. Verder wordt ingegaan op de mogelijkheden voor het inbrengen van zuurstof en de beplanting. Uiteindelijk wordt gekomen tot het ontwerp van een aantal prototypen.

HOOFDSTUK 8

PROGRAMMA VAN EISEN VOOR HET ONTWERP

De ontwerpen van de prototypen biologisch hekwerk zullen worden getoetst aan een programma van eisen, zoals dat ook al gedeeltelijk is uitgewerkt in het basisprojectplan. De volgende eisen worden aan het ontwerp gesteld:

Extensief concept

Het biologisch hekwerk moet een extensief concept zijn.

De werking van het hekwerk

De werking van het hekwerk wordt bepaald door de afbraak die plaatsvindt. In het biologisch hekwerk moet een zodanige afbraak worden bewerkstelligd, dat geen verontreinigingen het systeem verlaten in concentraties boven een bepaalde actiewaarde. Die actiewaarde is in de praktijk van SNR de I-waarde. Uit modelberekeningen blijkt dat verblijftijden in het hekwerk en de afbraaksnelheden de twee belangrijkste parameters zijn.

Kostenoptimalisatie

De kosten van het ontwerp moeten worden afgewogen tegen de werking van het systeem. Een biologisch hekwerk moet goedkoper zijn dan een conventioneel onttrekkingssysteem met zuivering.

Inpassing in de omgeving

Het biologisch hekwerk is een beheersmaatregel die voor lange tijd moet werken (50 jaar). Daarnaast mag tijdens de aanleg en exploitatie van het hekwerk de dagelijkse gang van zaken op het terrein zo min mogelijk worden gehinderd en moeten kabels, leidingen en andere obstakels worden beschermd.

HOOFDSTUK 9

UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en randvoorwaarden gehanteerd:

- kennis van het terrein en de aanwezige obstakels en ondergrondse kabels en leidingen (zie 4.1);
- de verontreinigingssituatie, zoals die in 4.3 is beschreven;
- de kennis van de geohydrologische situatie en de heersende milieuomstandigheden, zoals in 4.2 en 4.4 is beschreven;
- de voorspellingen ten aanzien van de grondwaterstroming en het stoftransport op de locatie (zie de hoofdstukken 6 en 7);
- de resultaten van de kolomproeven, zoals die door TNO-MEP zijn uitgevoerd [1].

KOLOMPROEVEN IN HET LABORATORIUM

Om de ontwerpparameters beter te kunnen kwantificeren en om in meer generieke zin iets te zeggen over de werking van een biologisch hekwerk, is door TNO-MEP in Apeldoorn een studie uitgevoerd naar toeslagmaterialen en zijn kolomproeven uitgevoerd. De resultaten van deze studie en de kolomproeven zijn gerapporteerd in september 1998 [1]. In bijlage E is de samenvatting uit genoemde rapportage opgenomen.

Op basis van literatuurgegevens zijn de beschouwde toeslagmaterialen beoordeeld op porositeit, dichtheid, inertheid, specifiek oppervlak en kosten. Daarbij is grind als meest geschikt toeslagmateriaal beoordeeld. Vervolgens zijn 6 kolomproeven uitgevoerd met respectievelijk 0, 50, 60, 70, 80 en 90 % grind, gemengd met grond van de locatie. Aan de kolommen is zuurstofrijk water toegevoegd met zuurstofconcentraties van respectievelijk 12, 15 en 18 mg/l. Op basis van de resultaten kan nu het volgende worden geconcludeerd:

- 45 tot 98 % van de minerale olie is verwijderd in de kolommen met een grindpercentage van meer dan 80 %. Het grootste percentage minerale olie is verwijderd bij een grindpercentage van 90 % en een hoge zuurstofconcentratie (18 mg/l). Opvallend is dat bij een grindpercentage van 0 % nog 55 % van de minerale olie wordt verwijderd bij een hoge zuurstofconcentratie (18 mg/l). Geconcludeerd kan worden dat de biodegradatie plaatsvindt en dat dit proces wordt gelimiteerd door de hoeveelheid zuurstof.
- In de kolommen is een grote hoeveelheid ijzer geprecipiteerd. Dit proces heeft ook een groot deel van de aanwezige zuurstof geconsumeerd. Er is echter een overmaat aan zuurstof aanwezig, waardoor (plaatselijk) een aërobe zone gehandhaafd blijft.
- Verstopping van de kolommen is gedurende het gehele experiment niet opgetreden, ondanks de aanzienlijke ijzernerslag.

LAYOUT VAN HET BIOLOGISCH HEKWERK

In het basisprojectplan is besloten om vier prototypen te ontwerpen. Er zal 1 blanco zijn waar geen stimulatie van afbraak plaatsvindt en alleen wordt gemonitord. De keuze voor de 3 andere prototypen is ten eerste een kwestie van het 'materiaal' in het biologisch hekwerk, namelijk water, grond en/of toeslagmateriaal. Water heeft als grote voordeel dat de verontreiniging makkelijk beschikbaar zijn en dat, zoals uit de modellering is gebleken, de verblijftijd langer wordt. Dit lijkt dus een aantrekkelijk alternatief. Besloten is daarom de mogelijkheden van een slootsysteem verder te onderzoeken. Grond is reeds op de locatie aanwezig en vervanging van een deel van die grond door toeslagmaterialen zal een kostenverhoging betekenen. Toeslagmaterialen kunnen echter de beschikbaarheid van verontreinigingen verbeteren. Besloten is twee ontwerpen nader te onderzoeken met daarin het oorspronkelijke materiaal gemengd met het toeslagmateriaal.

Slootsysteem

De layout van het slootsysteem is geschetst in figuur 7. Voor het ontwerp is uitgegaan van een vrij talud van 30°. Gekozen is voor een V-vormige sloot, zodat de breedte van de sloot aan de oppervlakte zo klein mogelijk wordt. Een nadeel hiervan zou kunnen zijn dat de verblijftijd onder in de sloot erg klein wordt.

Fig. 7. Layout van het slootsysteem.

De verwachting is echter dat een groot deel van de verontreinigingen zich in de bovenste meter van het grondwater bevindt (zie 4.3) en dat daarnaast menging en diffusie zal optreden in de sloot. Bij een diepte van 4 meter is de sloot aan de bovenkant 4,6 m breed. Omdat dit aanzienlijk veel ruimte kost zal tijdens de optimalisatie van het ontwerp in overleg binnen het consortium moeten worden bekeken of een dergelijke breedte haalbaar is op de locatie en of de taluds steiler kunnen (bijvoorbeeld door beplanting aan te brengen).

Hekwerk met toeslagmateriaal

Door TNO-MEP is een literatuurstudie uitgevoerd om een keuze te maken tussen verschillende toeslagmaterialen. Deze studie is beschreven in de rapportage van september 1998 [1]. Als toeslagmateriaal is voor grind gekozen. Het percentage toeslagmateriaal en grond van de locatie wordt in de kolomproeven gevarieerd. Afhankelijk van de uitkomsten zal tussen de 0 % en 80 % toeslagmateriaal worden toegevoegd. Voorgesteld wordt twee hekwerken met toeslagmateriaal aan te leggen. De breedte van het hekwerk zal verder worden geoptimaliseerd. Uit de eerste berekeningen met SORWACO (zie hoofdstuk 7), met lage afbraaksnelheden, blijkt dat een breedte

van 2 meter nog niet voldoende is. Aan de andere kant wordt de breedte beperkt door locatie-specifieke omstandigheden. Daarbij moet nog worden aangetekend dat alle biologische activiteit niet beperkt is tot de sleuf. Ook buiten de zone zal (door de stimulatie in de sleuf) de biologische activiteit verhogen.

HOOFDSTUK 12

ZUURSTOFVOORZIENING

Omdat het in dit project om de afbraak van minerale olie en BTEX gaat moeten in het biologisch hekwerk aërobe omstandigheden worden gecreëerd. Uit de resultaten blijkt dat de verzadigde zone in de uitgangssituatie anaëroob is. Dit betekent dat zuurstof moet worden toegevoegd. Zuurstof kan worden toegevoegd door lucht of zuivere zuurstof in het systeem te blazen (biosparging), of door andere verbindingen toe te voegen, die reduceren in de bodem. De meest toegepaste stof daartoe is waterstofperoxide.

De toevoeging van waterstofperoxide is moeilijk te doseren. Door de waterstofperoxide worden alle organische verbindingen geoxideerd, zodat veel waterstofperoxide moet worden toegevoegd. Daarnaast kan een te grote hoeveelheid waterstofperoxide toxisch zijn voor de aanwezige micro-organismen. Omdat het biologisch hekwerk bovendien een systeem is dat lange tijd in stand moet worden gehouden, zal steeds opnieuw waterstofperoxide moeten worden toegevoegd. Een systeem waarbij zuurstof of lucht wordt ingebracht (biosparging) is in staat om een betere dosering van zuurstof tot stand te brengen en is eenvoudiger in stand te houden. In dit rapport wordt daarom niet verder ingegaan op de toevoeging van waterstofperoxide.

Voor wat betreft de biosparging wordt gekozen voor de toevoer van lucht. Het aanvoeren en opslaan van zuivere zuurstof vergt ingewikkelde systemen en is kostenverhogend. Omdat het biologisch hekwerk een extensief systeem moet worden, wordt buitenlucht gebruikt. In dit hoofdstuk wordt in 12.1 uitgewerkt wat de mogelijkheden zijn voor biosparging in de systemen met dragermateriaal en wordt een keuze gemaakt voor een systeem, waarna in 12.2 wordt ingegaan op de ontwerpaspecten van een beluchtingssysteem. In 12.3 wordt voor het slootsysteem de luchttoevoer uitgewerkt en in 12.4 wordt ingegaan op mogelijke stripeffecten.

12.1 Verticale en horizontale systemen in de bodem

Ten behoeve van het inbrengen van lucht in het biologisch hekwerk, waarbij dragermateriaal wordt aangebracht, is zowel een verticaal systeem als een horizontaal systeem mogelijk. In een verticaal systeem wordt met behulp van een compressor lucht geïnjecteerd door een verticaal filter in de verzadigde zone (persluchtlan). In een horizontaal systeem wordt een horizontale luchtdrain gelegd, waardoor lucht wordt geperst. In figuur 8 wordt globaal het ontwerp van beide systemen geschetst.

Een voordeel van een verticaal systeem is dat de beluchtingspunten precies bekend zijn, evenals de hoeveelheden lucht die op dat punt worden ingebracht. Een nadeel is dat, wanneer het boorgat niet goed wordt afgesloten (luchtdicht!), de ingebrachte lucht weer langs het filter zal ontsnappen. Het verticale systeem is wel reeds diverse malen toegepast in Nederland, terwijl het horizontale systeem voor zover bekend nog niet eerder is toegepast in de verzadigde zone.

De horizontale luchtdrain kan niet als één geheel worden aangelegd, omdat de kans groot is dat de lucht reeds in de eerste meters van de drain ontsnapt. Daarom moet de drain uit verschillende delen bestaan, waarbij in elk gedeelte een aparte luchttoevoer moet worden gerealiseerd. Binnen een compartiment zal de lucht de weg van de minste weerstand kiezen, zodat onbekend is waar de lucht exact de drain verlaat. Door de verschillende delen is echter wel een verdeling over de lengte van het systeem gewaarborgd. Het is mogelijk om een drain op te delen in verschillende compartimenten met behulp van schotten. Het is echter moeilijk om deze schotten luchtdicht te bevestigen.

Fig. 8. Verticaal en horizontaal biospargingstelsel.

Beter is het om stukken drain achter elkaar te leggen, waarbij in elk stuk met behulp van een dichte slang lucht wordt toegevoerd. Wanneer voldoende stukken drain worden geplaatst, heeft dit systeem als voordeel dat de lucht op veel meer plaatsen wordt ingebracht, zodat een betere verdeling van de lucht over het hekwerk wordt verkregen. Op die manier is er minder kans op de vorming van slechts een klein aantal preferente stroombanen waardoor de lucht ontsnapt. Daarnaast zal de lucht automatisch omhoog stijgen en niet langs de drain ontsnappen. Als laatste voordeel voor een horizontaal systeem kan de grotere robuustheid worden genoemd.

Keuze van het systeem

Theoretisch gezien heeft het horizontale systeem, wanneer het om biosparging gaat in het biologisch hekwerk, een aantal belangrijke voordelen als het gaat om een beperkte, gelijkmatige luchttoevoer. Daarom wordt voorgesteld uit te gaan van een horizontaal systeem. Het verticale systeem is, zoals gezegd, reeds vaker toegepast in Nederland en ook in andere landen, zodat meer ervaring is opgebouwd met dit systeem. Het inzicht in de processen en daarmee de ontwerpparameters is echter nog steeds beperkt.

12.2 **Ontwerpaspecten van het biospargingstelsel**

Bij het ontwerpen van een biospargingstelsel zijn de volgende aspecten van belang:

Druk

De overdruk in het systeem moet zodanig zijn dat de hydrostatische druk (van maximaal 3 meter waterkolom) en de capillaire druk in de poriën worden overwonnen. De hydrostatische druk zal circa 300 mbar zijn. De capillaire druk hangt af van de poriëngrootte en de debieten. Omdat in het biologisch hekwerk grind wordt toegevoegd, waardoor goed doorlatend dragermateriaal ontstaat en daarnaast de debieten laag zullen zijn, is de verwachting dat de capillaire druk niet hoog zal zijn. Voorlopig wordt uitgegaan van een overdruk tussen de 300 en 500 mbar.

Luchtdebiet

De benodigde debieten hangen af van de volgende factoren:

- de verblijftijd;
- het volume van het te beluchten grondwater per tijdseenheid;
- het zuurstofverbruik van het aanwezige gereduceerde ijzer en de natuurlijke organische verbindingen in de bodem;
- de benodigde hoeveelheid zuurstof voor de afbraak van verontreinigingen;

- de maximale hoeveelheid zuurstof die kan diffunderen in het grondwater;
- de vorm waarin lucht wordt ingebracht (belgrootte, kanaalvorming).

De hoeveelheid lucht, die moet worden ingebracht, is afhankelijk van veel factoren en moeilijk in te schatten. Bij een conventioneel persluchtsysteem in de grond gaat het vaak om debieten tussen de 50 en 100 m³ per uur. In het biologisch hekwerk is het van belang om niet teveel lucht toe te voegen, omdat daarbij een stripeffect zal optreden. Daardoor zal vervluchtiging van verontreinigingen naar de oppervlakte plaatsvinden. Een optimalisering van de luchttoevoer is dus van belang. In 12.4 wordt teruggekomen op dit stripeffect.

Voorlopig wordt aangehouden dat een hoeveelheid lucht tussen de 5 en de 20 m³ per uur zal worden toegevoegd. In het veld zal het systeem verder moeten worden ingeregeld door de hoeveelheid zuurstof in het grondwater te meten en vervolgens de debieten bij te stellen.

Layout van het biosparingsysteem

Teneinde een zo'n gelijkmatig mogelijke luchttoevoer te bewerkstelligen wordt voorgesteld strengen te leggen met 10 stukken drain van circa 4 meter. De eerste streng wordt aan de instroomzijde van het hekwerk geplaatst. De tweede streng wordt in het midden geplaatst.

12.3 Beluchting in de sloot

In de sloot bevindt zich geen grond, zodat een groter volume water aanwezig is. Het volume water in 1 meter strekkende sloot is 5 m³. Analooq aan het genoemde in 12.2 wordt een debiet van circa 10 m³/uur aangehouden. Beluchting zal plaatsvinden met behulp van stukken poreuze keramische buis van 4 meter lengte, waarbij zich zeer veel kleine luchtbelletjes vormen. De luchttoevoer naar de buizen worden eveneens met behulp van slangen bewerkstelligd. De stukken worden onderin de V-vormige sloot aangelegd, met daarop een laag grof materiaal. Dit materiaal zorgt voor een betere verspreiding van de lucht in de sloot. De zuurstof wordt met een zo laag mogelijk debiet en druk verspreid in de sloot. Daarbij is een zo laag mogelijke vervluchtiging van belang.

12.4 Maatregelen tegen het vervluchtigen van verontreinigingen

Zowel bij de systemen met dragermaterialen als in de sloot moet rekening worden gehouden met de vervluchtiging van de vluchtige componenten (voornamelijk BTEX). Van belang is daarbij ten eerste om een hoeveelheid lucht in te blazen die net genoeg is om voldoende zuurstof in het water te krijgen, met een zo laag mogelijke druk. In het veld zal hiertoe het systeem worden ingeregeld, waarbij de berekeningen in 12.2 als basis dienen.

Om vervluchtiging naar de atmosfeer verder tegen te gaan zal in de systemen met dragermateriaal een compostfilter worden gecreëerd in de onverzadigde zone. Daartoe wordt grond aangebracht met een hoog percentage organisch materiaal. De verwachting is dat de vluchtige componenten aan het organische materiaal adsorberen en afbreken. Tenslotte wordt op deze grond beplanting geplaatst die de bodem bedekken, zodat vervluchtiging verder wordt voorkomen.

In het slootsysteem kan geen compostfilter worden gebruikt en zal meer verdamping optreden. De verwachting is echter dat het stripeffect kleiner zal zijn, omdat met minder druk lucht kan worden toegevoegd. Daarnaast wordt onderzocht of met behulp van waterplanten verdamping en dus vervluchtiging kan worden beperkt.

12.5 Conclusies ten aanzien van de zuurstofdosing

Omdat uit de karakterisatie is gebleken dat het grondwater in de huidige situatie anaëroob is, zal in alle prototypen van het hekwerk lucht worden toegevoerd met behulp van een horizontaal bio-

spargingsysteem. Dit systeem bestaat uit stukken drain met toevoerslangen. De hoeveelheid lucht die wordt toegevoerd zal circa 10 tot 25 m³/uur zijn, bij een overdruk van circa 500 mbar. De vervluchting van verontreiniging naar de buitenlucht zal worden gemonitord en worden beperkt door gebruik van beplanting en een compostfilter.

HOOFDSTUK 13

BEPLANTING

Omdat een biologisch hekwerk nog niet eerder is toegepast in Nederland is er geen ervaring ten aanzien van de beplanting op en/of in dit soort systemen. Vooral voor de sloot is beplanting van belang.

De functies van beplanting zijn in ieder geval:

- de verbetering van de structuur van de bodem en het creëren van een goede rhizosfeer in de hekwerken met zand en toeslagmateriaal;
- het beperken van de vervluchting van BTEX uit de hekwerken;
- het inbrengen van zuurstof in het slootsysteem.

PLAN VOOR DE MONITORING EN DE EXPLOITATIE

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de monitoring en exploitatie van de hekwerken, vanaf het moment dat deze zijn aangelegd in het veld. Deze twee aspecten worden gezamenlijk behandeld, omdat de exploitatiemaatregelen meestal volgen uit de monitoring en de daaruit volgende overschrijding of onderschrijding van van tevoren vastgestelde criteria.

De monitoring van het hekwerk heeft twee hoofddoelen, namelijk:

- sturing en optimalisatie van het systeem, van belang in de periode na de aanleg van de hekwerken;
- meting van de prestaties van het systeem in algemene zin voor een langere periode.

Vooraf uit de eerste doelstelling volgen meestal acties in de zin van 'exploitatie'. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op beide doelstellingen van het monitoren, de normen en/of actiewaarden waaraan de metingen moeten worden getoetst en de aard van de metingen zelf.

14.1 Sturing en optimalisatie

Nadat de hekwerken zijn aangelegd, zal een aantal metingen worden uitgevoerd ten behoeve van de optimalisatie van het ontwerp. Onderstaand worden deze metingen beschreven en de daaruit volgende acties beschreven.

Drukmetingen en debietmetingen in het biospargingssysteem

Deze metingen worden uitgevoerd om de doorlatendheid van de bodem voor lucht en de invloed van eventuele verstopping te meten. De benodigde flowmeters en drukmeters zijn in het systeem opgenomen en zullen regelmatig worden afgelezen.

Zuurstofdoseringsmeting in het grondwater in de zones met toeslagmateriaal

In het grondwater zal de zuurstofconcentratie intensief worden gemonitord, zodat de luchttoevoer kan worden geoptimaliseerd. De maximale zuurstofconcentratie in het grondwater zal circa 8 mg/l zijn. Getracht zal worden met een lage druk en een minimaal debiet deze concentratie te handhaven in het grondwater. Daarom zal worden begonnen met een overdruk van 300 mbar en een luchtdebiet van 10 m³/uur. Wanneer de zuurstofconcentratie in het grondwater niet meer stijgt, zal het debiet langzaam worden verhoogd totdat de 8 mg/l is bereikt.

Een goede uitvoering van de zuurstofmeting in het grondwater is niet gemakkelijk. Bij gebruik van een boorgat of een peilbuis bestaat de kans dat hier zuurstof uit de lucht bijkomt of dat de peilbuis als preferente stroombaan fungeert voor de ingeblazen lucht. De meting is daardoor niet representatief voor het grondwater in het hekwerk. Een mogelijkheid is om een zuurstofsensoren in te bouwen in het hekwerk tijdens de aanleg.

Naast het inbouwen van een sensor zijn er twee opties om te meten in een buis of een drain die in het hekwerk is geplaatst. Als eerste optie wordt voorgesteld een drain met verhang aan te leggen op circa 0,5 m onder de grondwaterspiegel. Door deze drain te openen en aan te sluiten op een doorstroomcel en een slangenpomp, kan in de doorstroomcel de zuurstof in het grondwater worden gemeten. Hierbij wordt een gemiddelde waarde van de zuurstofconcentratie gemeten over de gehele lengte van het hekwerk, net onder de grondwaterspiegel. Het voordeel is daarbij dat, wanneer in de doorstroomcel een concentratie van 8 mg/l wordt gemeten, het waarschijnlijk is dat die concentratie in het gehele hekwerk aanwezig is. Een tweede optie, die kan

worden gecombineerd met de eerste, is dat de drain geschikt wordt gemaakt om een meet-instrument in te brengen. Onderzocht zou moeten worden of de beschikbare sensoren daar tegen bestand zijn.

Metingen van vluchtige verontreinigingen (BTEX) in de atmosfeer

In de lucht vlak boven het oppervlak van het biologisch hekwerk zal BTEX worden gemeten om ongewenste emissie van BTEX door het biospargen te monitoren en eventuele maatregelen te kunnen nemen. De BTEX zal worden gemeten door een bak omgekeerd op het grondoppervlak te plaatsen en periodiek de hoeveelheid BTEX te meten met behulp van de draagbare GC. Daarnaast zullen eveneens metingen in de onverzadigde zone en in de verzadigde zone net onder het grondwater worden gedaan op verschillende diepten, om een profiel over de diepte te verkrijgen. Ook deze metingen worden uitgevoerd met behulp van tijdelijke buizen en de draagbare GC. Deze metingen geven een globale indicatie van de hoeveelheid BTEX die vervluchtigt.

Indien de concentraties BTEX in de bak de MAC-waarden overschrijden, zijn de volgende maatregelen mogelijk:

- het compostfilter, dat is aangebracht, wordt verbeterd door meer organisch stof toe te voegen;
- de debieten in het luchttoevoer systeem worden verlaagd of de luchttoevoer wordt periodiek uitgezet;
- er wordt een bodemluchtexttractiesysteem aangebracht en een luchtzuivering.

Monitoren van de beplanting

De beplanting zal moeten worden verzorgd en de groei daarvan gemonitord. Omdat nog erg weinig bekend is ten aanzien van het functioneren van planten in een zodanig systeem, wordt voorgesteld onderzoek te doen naar de groei van de planten, de grootte van de wortelzone, de productie van zuurstof door planten in de sloot en de opname van verontreinigingen door de planten.

Monitoren van de nutriënten

In het grondwater zullen door middel van watermonsters uit peilbuizen en monsters uit de drain de concentraties nitraat, fosfaat en andere voedingsstoffen worden gemeten. In de eerste karakterisatie (zie 4.4) is weinig nitraat en geen fosfaat aangetroffen. Het kan echter zo zijn dat deze stoffen volledig zijn vastgelegd in de aanwezige biomassa en op die manier wel beschikbaar is. Indien de afbraak afneemt en een werkelijk tekort ontstaat, kunnen die nutriënten worden toegevoegd. Dit zal uit het monitoringsprogramma moeten blijken. De nutriënten kunnen worden toegevoegd door beregening of via de aanwezige peilbuizen in het hekwerk.

Conclusies

Om de werking van het biologisch hekwerk te optimaliseren zal gestuurd worden op de volgende parameters:

- optimalisatie van de luchttoevoer, waarbij een minimale hoeveelheid zuurstof moet worden ingebracht en aan de andere kant vervluchtiging moet worden voorkomen. De hoeveelheid zuurstof in het hekwerk wordt gemeten met behulp van ingebouwde zuurstofsensoren of door te meten in grondwater dat wordt onttrokken door een drain;
- de beplanting wordt gemonitord en eventueel verzorgd of vervangen;
- de aanwezige nutriënten voor de micro-organismen worden gemonitord en eventueel toegevoegd.

14.2 Monitoren van prestaties van het biologisch hekwerk

De metingen aan de prestaties van het hekwerk hebben twee doelen:

1. meten van de concentraties verontreiniging in het instromende en het uitstromende grondwater uit het hekwerk;
2. meten van een aantal parameters die de biologische processen in het hekwerk kunnen beschrijven.

Ad 1

De concentraties minerale olie en BTEX in het instromende en uitstromende grondwater van het biologisch hekwerk worden gemeten in peilbuizen aan twee kanten van het hekwerk. Overwogen kan worden de concentraties BTEX te meten met de draagbare GC en de concentraties minerale olie met de fiber optic. Het gebruik van de fiber optic is alleen mogelijk bij hogere concentraties, omdat de detectiegrenzen vrij hoog zijn. Ten behoeve van dit project wordt een onderzoek uitgevoerd door Shell Research uit Thornton, waarbij wordt getracht de meetwaarden van de fiber optic in peilbuizen op de locatie te correleren aan de geanalyseerde waarden uit dezelfde peilbuizen in het laboratorium. Wanneer het mogelijk is de metingen te correleren en de BTEX-concentraties (gemeten met de draagbare GC) verdisconteerd kunnen worden, kan op die manier de concentratie minerale olie in het veld worden bepaald. In het definitieve ontwerp zullen eveneens de plaatsen van de peilbuizen worden bepaald. Voorgesteld wordt circa 4 peilbuizen per biologisch hekwerk te plaatsen.

Ad 2

De processen in het hekwerk kunnen worden gemonitord met behulp van de parameters zuurstof en CO₂. De afbraak kan daarbij worden gemeten in een respiratieproef. Daarbij wordt de luchttoevoer uitgezet en vervolgens in een peilbuis (of in de drain) de afname van de zuurstof gemeten en eventueel de toename van CO₂. De snelheid waarmee de zuurstofconcentratie afneemt en de CO₂-concentratie toeneemt is in principe een maat voor de mate van afbraak in het systeem.

Naast deze respiratietests zullen met enige regelmaat bacterietellingen worden uitgevoerd. Dit is een kwantitatieve meting die aangeeft of de bacteriepopulatie groeit. Dit is een aanwijzing voor een verhoogde afbraak van verontreiniging. Of dat ook werkelijk het geval is hangt echter af van de activiteit van de micro-organismen. Deze activiteit is echter niet rechtstreeks te meten.

Conclusie

Om een goede werking van het hekwerk aan te tonen worden de concentraties verontreinigingen voor en na het hekwerk gemonitord, daarna zal aan de hand van een respiratietest het zuurstofverbruik in het hekwerk worden gemeten.

CONCLUSIES TEN AANZIEN VAN HET ONTWERP

Uit de bespreking van een aantal ontwerpparameters en uit de grondwaterstromings- en stoftransportmodellen kunnen de globale ontwerpen van de prototypen biologisch hekwerk worden gemaakt. In figuur 9 is een ontwerp voor een hekwerk met dragermateriaal en een slootsysteem geschetst. Deze ontwerpen zijn haalbaar indien ze (naar verwachting) aan het programma van eisen uit hoofdstuk 8 kunnen voldoen. In dit hoofdstuk wordt daartoe een aantal voorlopige conclusies getrokken.

15.1 Toetsing aan de eisen

Extensief concept

De ontwerpen zijn eenvoudig en vergen weinig onderhoud.

Werking van het hekwerk

Uit de grondwaterstromingsberekeningen blijkt dat, ondanks een in- en uittreeweerstand, voldoende water door het hekwerk zal stromen. Ook wanneer de hekwerken naast elkaar liggen zijn geen ongewenste effecten te verwachten. Uit de eerste stoftransportberekeningen, met voorzichtige schattingen van afbraaksnelheden, blijkt significante afbraak op te treden. Optimalisatie en sturing zal plaatsvinden, waarbij goede zuurstoftoevoer en de verblijftijden van groot belang zijn. De werking van het hekwerk wordt bepaald door de afbraak die plaatsvindt.

Kostenoptimalisatie

De kosten van het hekwerk zijn nog niet berekend.

Inpassing in de omgeving

De ontwerpen zijn robuust en 'eenvoudig'. Dit verhoogt de kans op een duurzaam systeem. Uitgaande van de situatie op het terrein zal het ontwerp in de verdere uitwerking moeten worden aangepast om uitvoering mogelijk te maken.

Slotconclusie

Uit de toetsing van de ontwerpen aan het programma van eisen lijkt het biologisch hekwerk haalbaar.

15.2 Hiaten

Geconcludeerd kan worden dat, hoewel op papier aan de meeste eisen kan worden voldaan, een aantal aannamen niet kan worden geverifieerd. De hiaten in de ontwerpen zitten daarom vooral in de fine tuning van het ontwerp op de specifieke situatie op de locatie. Het gaat hierbij om:

- de werkelijke verblijftijden in het biologisch hekwerk, afhankelijk van de porositeit en eventuele weerstandsverhoging door versmering of door verstopping van het hekwerk door ijzer en biomassa;
- de (technische) mogelijkheden voor een goede zuurstofdoserings in het veld;
- de werkelijke afbraaksnelheid in het veld;
- de inpassing van het hekwerk in het terrein.

Daarnaast zal een aantal aspecten nog aan het ontwerp worden toegevoegd, namelijk:

- de keuze voor beplanting;
- een berekening van de kosten voor de diverse prototypen;
- een verdere technische uitwerking van het ontwerp.

Fig. 9. Illustraties ontwerp biologisch hekwerk.

HOOFDSTUK 16

AANBEVELINGEN

Op basis van de conclusies in hoofdstuk 15 wordt voorgesteld de ontwerpen verder te optimaliseren en de hekwerken in het veld aan te leggen. De optimalisatie zal zich moeten concentreren op de volgende aspecten:

- verfijnen en verbeteren van de stoftransport- en afbraakvoorspellingen op basis van tussenresultaten van de kolomproeven; uit de kolomproeven zal ook informatie kunnen worden verkregen over mogelijke verstopping;
- detailleren en verdere technische uitwerking van het ontwerp, bijvoorbeeld voor de toevoer van lucht, vooral op basis van de haalbaarheid in de praktijk, in samenwerking met Ecotechniek;
- kiezen van de juiste beplanting;
- berekenen van kosten voor de hekwerken.

De hekwerken kunnen vervolgens worden aangelegd. Daarna zullen de hekwerken worden ingeregeld. Hierbij moet vooral aandacht worden besteed aan:

- zuurstofdoserings;
- voldoende groei van de beplanting;
- aanwezigheid van voedingsstoffen.

LITERATUUR

1. Liere, H.C. van, et al.
Laboratory assessment of design parameters for an aerobic mineral oil degrading bio-screen- and consequences for field application.
TNO-MEP, order no. 27642, september 1998.
2. Kroes, R.F.
Inventarisatie veldmeetmethoden biologisch hekwerk op het terrein van SNR/SNC.
IWACO, projectnummer 1069270, 1997.
3. Shell Pernis Bodemsanering/beheersplan PER⁺.
Tauw, rapportnummer R3239713.R07/MJV, februari 1993.
4. Bodemonderzoek SNR/SNC-terrein Pernis (Transportberekeningen).
Grondmechanica Delft, rapportnummer CO-291460/49, juli 1989.
5. Monitoringsactiviteiten 1997 SNR/SNC.
IWACO, rapportnummer 1062240.003, maart 1997.

BIJLAGE A

DOORLATENDHEIDSMETINGEN

In deze bijlage zal kort worden ingegaan op de uitvoeringswijze van de doorlatendheidsmetingen en de wijze waarop de doorlatendheden zijn berekend. Onderscheid is gemaakt tussen de bepaling via de korrelgrootteverdeling en de bepaling op basis van metingen in het veld.

Bepaling op basis van korrelgrootteverdeling

Van drie grondmonsters is een korrelgrootteverdeling bepaald van de volgende fracties: 2, 16, 32, 50, 63, 125, 250, 500, 1.000 en 2.000 µm. Vervolgens is de doorlatendheid berekend aan de hand van 3 formules, te weten Hooghoudt, Ernst en op basis van het M50-cijfer [1]. De formule van Hooghoudt is geldig voor zandgronden zonder slib of lutum. De formule van Ernst is geldig voor homogene zandgronden met niet meer dan 4 à 6 % slib. De bepaling op basis van het M50-cijfer is geldig voor zand en lichte zavel met een lutumgehalte van maximaal 12 %.

In tabel A1 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven. Opvallend zijn de lage waarden voor monster A01015, vermoedelijk veroorzaakt door 'verontreiniging' van het monster met klei uit de onderliggende laag. Gezien de aanwezigheid van slib en lutum in alle monsters wordt de formule van Hooghoudt minder representatief geacht voor deze situatie. Als representatieve *k*-waarde is daarom uitgegaan van de gemiddelde waarden zoals die volgen uit de methode Ernst en de bepaling volgens het M50-cijfer.

Tabel A1. Resultaten van doorlatendheidsmetingen op basis van korrelgrootteverdeling.

meetpunt	diepte grondmonster	doorlatendheid (m/dag)		
		Hooghoudt	Ernst	M50-cijfer
A01015	3,50 - 4,00	0,26	0,003	0,33
G01006	3,00 - 3,50	0,83	0,81	2,36
G03016	3,00 - 3,50	2,46	1,93	1,79

Bepaling op basis van metingen in het veld

De metingen in het veld zijn uitgevoerd aan de hand van zogenoemde puntproeven. Hiertoe zijn een aantal peilbuizen geselecteerd waarvan de gegevens met betrekking tot de diepte, filterstelling, diameter van de filterbuis en diameter van het boorgat bekend zijn. Gedurende enige tijd (circa 15 à 20 minuten) wordt uit een peilbuis grondwater onttrokken. Met behulp van automatische registratie-apparatuur (zogenoemde 'divers') wordt het verloop van de grondwaterstandsverlaging regelmatig geregistreerd (in dit geval heeft om de 2 seconde registratie plaatsgevonden). Na verloop van tijd zal zich een evenwichtssituatie instellen tussen het onttrokken debiet en de ingestelde grondwaterstandsverlaging. Het debiet wordt regelmatig gemeten. Vervolgens wordt de onttrekking gestopt. Ten gevolge hiervan zal de grondwaterstand weer omhoogkomen. Ook dit omhoogkomen van de grondwaterstand wordt geregistreerd totdat de grondwaterstand (vrijwel) is teruggekomen op het niveau voordat de onttrekking is gestart.

Bij het interpreteren kunnen twee fasen worden onderscheiden, namelijk de fase tijdens de onttrekking (aangeduid als 'constant debietproef') en de fase nadat de onttrekking is gestopt (aangeduid als 'stopproef'). Afhankelijk van het type grond zal met name de constant debietproef (hoge doorlatendheid, grof zand/grind) dan wel de stopproef (gronden met lage doorlatendheid, zandige klei/klei) dan wel beide ('gemiddelde' doorlatendheid, fijn zand) kunnen worden gebruikt.

Constant debietproef

Hierbij wordt een relatie gelegd tussen het onttrekkingsdebiet en de ingestelde verlaging. Daarnaast is een vormfactor van belang. Hierin is de invloed van de filterlengte, diameter van de filterbuis en diameter van het boorgat verwerkt.

De formule, waarmee de doorlatendheid kan worden ingeschat, is als volgt [2]:

$$k = Q / (A \cdot \pi \cdot r_0 \cdot dh)$$

waarin:

- k is de doorlatendheid in m/dag;
- Q is het onttrekkingsdebiet in m³/dag;
- A is de correctiefactor;
- r_0 is de straal van het boorgat in m;
- dh is de verlaging ten opzichte van de waterstand voor de pompfase in m.

De correctiefactor wordt bepaald door de lengte en straal van het waarnemingsfilter.

Stopproef

Hierbij wordt de doorlatendheid bepaald op basis van de snelheid waarmee de grondwaterstand weer omhoogkomt na het stoppen van de onttrekking.

De formule, waarmee de doorlatendheid kan worden ingeschat, is als volgt [3]:

$$kD = 2,30 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot ds)$$

waarin:

- k is de doorlatendheid in m/dag;
- D is de dikte van de watervoerende laag in m;
- Q is het onttrekkingsdebiet in m³/dag;
- ds is de verlaging per log-cyclus in m.

Voor elke gemeten verlaging s wordt de bijbehorende waarde voor t/t' berekend. Hierbij is t de tijdsduur sinds het starten van de pomp en t' de tijd sinds de pomp is gestopt. Deze meetwaarden kunnen worden uitgezet op half-logaritmische schaal. Als het goed is kan door de geploette punten een rechte lijn getrokken worden (hierbij dienen de laatst gemeten waarden als uitgangspunt). Vervolgens dient de helling van de rechte lijn te worden bepaald door de verlaging per log-cyclus af te lezen. Deze verlaging dient te worden gesubstitueerd in bovenstaande formule (ds).

Aan deze bijlage zijn de meetresultaten van de constant debiet- en stopproeven toegevoegd. Voor elke meting is het verloop van de grondwaterstand gedurende de proef weergegeven. In de tabellen A2 en A3 zijn de gegevens weergegeven op basis waarvan de doorlatendheden uiteindelijk zijn berekend.

Tabel A2. Resultaten van doorlatendheidsmetingen op basis van constant debietproef.

peilbuis	debiet (Q) (m ³ /dag)	verlaging (dh) (m)	filterlengte [*] (L) (m)	μ (-)	A (-)	doorlatendheid (k) (m/dag)
G03016	3,03	0,77	1,00	62,50	17,16	1,46
G01201	1,13	0,57	0,50	31,25	10,56	1,19
G01005	1,33	0,83	0,88	55,00	15,64	0,65
G01004	1,46	0,81	1,00	62,50	17,16	0,67
A01015	1,86	0,66	0,95	59,38	16,53	1,09
A01006	1,63	0,88	0,50	31,25	10,56	1,12

Toelichting:

* Hierbij is uitgegaan van de filterlengte (0,5 of 1,0 m). In een aantal gevallen was tijdens de uitvoering van de constant debietproef sprake van een verlaging tot iets onder de bovenzijde van het filter.

Tabel A3. Resultaten van doorlatendheidsmetingen op basis van stopproef.

peilbuis	debiet (Q) (m ³ /dag)	verlaging per log-cyclus (ds) (m)	doorlaatvermogen (kD) (m ⁵ /dag)	dikte pakket ¹ (D) (m)	doorlatendheid (k) (m/dag)
G03016	3,03	0,075	7,4	1,7	4,35
G01201	1,13	n.t.b. ²	-	1,7	-
G01005	1,33	0,144	1,7	1,7	1,00
G01004	1,46	0,081	3,3	1,7	1,90
A01015	1,86	0,101	3,4	1,7	2,00
A01006	1,63	0,114	2,6	1,7	0,75

Toelichting:

¹ Het betreft hier de watervoerende dikte van de laag waaruit onttrokken wordt. Deze waarde is afgeleid/ingeschat op basis van beschikbare informatie uit boorstaten. Voor deze metingen is uitgegaan van een gemiddelde watervoerende dikte van 1,7 m.

² Waarde niet te bepalen.

Literatuur

1. Bakker, H. en W.P. Locher.
Bodemkunde van Nederland 1992/1994.
2. Bepaling van de doorlatendheid binnen de dagelijkse praktijk van bodemonderzoek
Afstudeerproject IWACO, 9131000.007, juni 1996.
3. Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder.
Analysis and evaluation of pumping test data.
ILRI publication 47, p 232-233, 1994.

BIJLAGE B

BOORPROFIELEN EN ANALYSERSULTATEN VOOR GROND EN GRONDWATER

BIJLAGE C

BIOMASSABEPALINGEN (Bioclear)

BIJLAGE D

BESCHRIJVING VAN MLAEM

MLAEM (Multi Layer Analytical Elements Model) is een programma voor het simuleren van regionale stroming in één of meerdere watervoerende pakketten. MLAEM is ontwikkeld bij de universiteit van Minnesota in Minneapolis (USA) door prof.dr.ir. O.D.L. Strack. Het programma is gebaseerd op de analytische elementenmethode.

De analytische elementenmethode is ontwikkeld voor het simuleren van regionale grondwaterstroming door Strack (1982 - 1989). De stroming wordt gesimuleerd door een superpositie van analytische elementen. Elk element simuleert een bepaalde invloed op de grondwaterstroming, zoals de onttrekking door een put, lek door een scheidende laag of infiltratie door een waterloop. Een analytisch element is een particuliere oplossing van de differentiaalvergelijking, waarmee de stroming wiskundig wordt beschreven. De oplossingen zijn expliciet en geldig voor een oneindig vlak, zodat voor elk willekeurig punt de stijghoogte en het specifiek debiet worden gevonden door substitutie van de coördinaten.

De gebruikte differentiaalvergelijking is de vergelijking van Poisson in termen van een debietspotentiaal. Hierbij is aangenomen dat de doorlatendheid en de niveaus van basis en top van elk watervoerend pakket een constante waarde hebben. Als de stijghoogte beneden het niveau van de top ligt, wordt gerekend met het freatische doorlaatvermogen.

Het is mogelijk om gebieden te definiëren waarbinnen een afwijkende, zij het wel weer constante waarde geldt. In elk watervoerend pakket wordt de aanname van Dupuit-Forschheimer gehanteerd, zodat de stijghoogte per pakket niet verticaal varieert. De lek door de scheidende lagen is alleen verticaal.

Met MLAEM kan stroming in maximaal vier watervoerende pakketten met vijf scheidende lagen worden gesimuleerd. In het programma staan verschillende analytische elementen ter beschikking. Een deel wordt gedefinieerd in een watervoerend pakket, een ander deel in een scheidende laag. Elementen voor het watervoerende pakket zijn:

- puntputten, met een gegeven debiet of met een gegeven stijghoogte;
- lijnputten met een constant debiet per strekkende lengte-eenheid, met een gegeven debiet of gegeven stijghoogte;
- randsegmenten van inhomogeniteiten, gebieden met afwijkende doorlatendheid en niveau van basis en top van een watervoerend pakket;
- referentiepunt, een punt waarbij de stijghoogte moet worden opgegeven.

Oppervlakteputten zijn elementen die in een scheidende laag worden gedefinieerd:

- oppervlakteputten met een constant debiet per oppervlakte;
- met een gegeven hydraulische weerstand tussen een vast peil en het watervoerende pakket;
- met een gegeven weerstand tussen twee watervoerende pakketten.

BIJLAGE E

**SAMENVATTING UIT 'LABORATORY ASSESSMENT OF DESIGN PARAMETERS
FOR AN AEROBIC MINERAL OIL DEGRADING BIOSCREEN- AND
CONSEQUENCES FOR FIELD APPLICATION' (TNO-MEP)**

BIJLAGE F

FIGUREN

Fig. F6. Invloed van de doorlatendheid op het stromingspatroon.

Fig. F7. Invloed van de in- en uitteeweerstand op het stromingspatroon.

Fig. F8. Invloed van meerdere bakken op het stromingspatroon.