

**NOBIS 97-1-02**

**Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van  
de acceptatie van natuurlijke afbraak  
als saneringsvariant**

**Fase 1: modelleren**

**NOBIS 97-1-02  
ONTWIKKELING VAN EEN BESLISMODEL  
TEN BEHOEVE VAN DE ACCEPTATIE  
VAN NATUURLIJKE AFBRAAK ALS  
SANERINGSVARIANT**

Fase 1: modelleren

ir. H. Tonnaer (Tauw Milieu bv)  
drs. F.A. Hanneman (Tauw Milieu bv)

met medewerking van:

ir. L.M.M. Bakker (Tauw Milieu bv)  
ir. M. Heijnen (IWACO)  
drs. S. Huisman (IWACO)  
ir. G.J. Mulder (Grondmechanica Delft)  
ir. T.F. Praamstra (IWACO)  
dr. ir. C.B.M. te Stroet (NITG-TNO)  
ir. J. Taat (Grondmechanica Delft)  
dr. ir. P. Venema (NITG-TNO)  
ir. E.L. Wipfler (Landbouwuniversiteit Wageningen)  
dr. ir. S.T.E.A.M. van der Zee (Landbouwuniversiteit Wageningen)

oktober 1998

Gouda, CUR/NOBIS

**Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering**

### **Auteursrechten**

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enig 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, "©" Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke afbraak als sanerings-variant - Fase 1: Modelleren", oktober 1998, CUR/NOBIS, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

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

### **Copyrights**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of CUR/NOBIS. It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, on condition that the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©" Development of a decision model for the acceptance of natural attenuation as a remediation variant - Phase 1: Modeling", October 1998, CUR/NOBIS, Gouda The Netherlands."

### **Liability**

CUR/NOBIS and all contributors to this publication have taken every possible care during 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 in so far as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of CUR/NOBIS and/or the contributors.

## **Titel rapport**CUR/NOBIS-projectnummer

Ontwikkeling van een beslismodel 97-1-02  
ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke  
afbraak als saneringsvariant**Project-rapportnummer**  
Fase 1: Modelleren97-1-02 fase 1

---

## **Auteurs**Aantal bladzijden

ir. H. Tonnaer (Tauw Milieu bv)**Rapport: 16**  
drs. F.A. Hanneman MTD (Tauw Milieu bv)**Bijlagen: 162**

met medewerking van:

ir. L.M.M. Bakker (Tauw Milieu bv)  
ir. M. Heijnen (IWACO)  
drs. S. Huisman (IWACO)  
ir. G.J. Mulder (Grondmechanica Delft)  
ir. T.F. Praamstra (IWACO)  
dr. ir. C.B.M. te Stroet (NITG-TNO)  
ir. J. Taat (Grondmechanica Delft)  
dr. ir. P. Venema (NITG-TNO)  
ir. E.L. Wipfler (Landbouwuniversiteit Wageningen)  
dr. ir. S.T.E.A.M. van der Zee (Landbouwuniversiteit Wageningen)

---

## **Uitvoerende organisaties (Consortium)**

TNO-MEP (de heer ing. H.J. van Veen, 055-5493922)  
TNO-MEP (mevrouw dr.ir. A.J.C. Sinke, 055-5493116)  
Provincie Utrecht (de heer ir. P.W.M. van Mullekom, 030-2589111)  
Tauw Milieu bv (de heer ir. F. Spuy, 010-2620000)  
Tauw Milieu bv (de heer ir. H. Tonnaer, 0570-699430)  
IWACO (de heer dr. ir. T. Heimovaara, 010-2865580)  
MTI (de heer ir. F. Volkering, 024-3601212)  
MTI (mevrouw J. Quist, 024-3601212)

---

## **Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

## **Samenvatting**

Voor het NOBIS-project *Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant* is het deelproject *Modelleren* uitgevoerd. Het hoofddoel van dit deelproject was vast te stellen wat de 'state of the art' is van het modelleren van verspreiding van grondwaterverontreinigingen onder invloed van natuurlijke afbraak. Daartoe hebben vier modelleringsgroepen (afkomstig van verschillende instituten in Nederland) de grondwaterverontreinigingspluimontwikkeling onder invloed van natuurlijke afbraak gemodelleerd voor een concreet geval van bodemverontreiniging. Op basis van de resultaten is geconcludeerd dat met modelleren de toekomstige ontwikkeling van een verontreinigingspluim zo kan worden voorspeld dat deze informatie kan worden gebruikt ter ondersteuning van de besluitvorming over de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant. Belangrijke aspecten hierbij zijn de wijze waarop gegevens worden verzameld en de wijze waarop de resultaten van modelleren worden gepresenteerd.

---

## **Trefwoorden**

**Gecontroleerde termen:**Vrije termen:  
natuurlijke afbraak, biologische afbraak,  
bodemsanering, bodemverontreiniging,  
grondwaterverontreiniging, verspreiding,

modellen, chloorkoolwaterstoffen, chloorethenen

**Titel projectProjectleiding**

Ontwikkeling van een beslismodelTNO-MEP

ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke(de heer ing. H.J. van Veen  
afbraak als saneringsvariant055-5493922)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

**Report title** CUR/NOBIS report number

Development of a decision model  
for the acceptance of natural  
attenuation as a remediation variant  
Phase 1: Modeling

**Authors** Number of pages

ir. H. Tonnaer (Tauw Milieu Consultancy bv) **Report: 16**  
drs. F.A. Hanneman (Tauw Milieu Consultancy) **Appendices: 162**

in cooperation with:

ir. L.M.M. Bakker (Tauw Milieu Consultancy bv)  
ir. M. Heijnen (IWACO)  
drs. S. Huisman (IWACO)  
ir. G.J. Mulder (Grondmechanica Delft)  
ir. T.F. Praamstra (IWACO)  
dr. ir. C.B.M. te Stroet (NITG-TNO)  
ir. J. Taat (Grondmechanica Delft)  
dr. ir. P. Venema (NITG-TNO)  
ir. E.L. Wipfler (Landbouwniversiteit Wageningen)  
dr. ir. S.T.E.A.M. van der Zee (Landbouwniversiteit Wageningen)

**Executive organisations (Consortium)**

TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation (Mr. ing. H.J. van Veen, 055-5493922)  
TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation (Mrs. dr.ir. A.J.C. Sinke, 055-5493116)  
Province of Utrecht (Mr. ir. P.W.M. van Mullekom, 030-2589111)  
Tauw Milieu Consultancy bv (Mr. ir. F. Spuy, 010-2620000)  
Tauw Milieu Consultancy bv (Mr. ir. H. Tonnaer, 0570-699430)  
IWACO (Mr. dr. ir. T. Heimovaara, 010-2865580)  
MTI (Mr. ir. F. Volkering, 024-3601212)  
MTI (Mrs. J. Quist, 024-3601212)

**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

**Abstract**

Within the NOBIS-project *Development of a decision-support system on the acceptance of natural attenuation as a remediation option*, the subproject *Modelling* was carried out. The objective of this subproject was to identify the state of the art in modelling groundwater contaminant plume migration affected by natural attenuation processes. To this end, four teams representing various Dutch institutes active in the field have each modelled, on the basis of an actual soil contamination case, the development of a groundwater contamination plume affected by natural attenuation processes. It was found that modelling actually is a suitable means for predicting the future development of a contamination plume in such a way that the data generated can be used to support the decision-making, by the authorities, on whether or not to accept natural attention as a remediation option. The study also emphasizes the importance of gathering data systematically, and of presenting the modelling results in an adequate way.

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

natural attenuation, biological degradation,  
soil remediation, soil contamination,  
groundwater contamination, dispersion, models,

chlorinated hydrocarbons, chloroethylenes

**Project titleProjectmanagement**

Development of a decision modelITNO Institute of Environmental  
for the acceptance of naturalSciences, Energy Research and  
attenuation as a remediation variantProcess Innovation  
(Mr. ing. H.J. van Veen,  
055-5493922)

---

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

## VOORWOORD

In opdracht van NOBIS (Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering) wordt een implementatieproject uitgevoerd voor de ontwikkeling van een beslissingsondersteunend model voor de beoordeling en acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant. Dit project wordt uitgevoerd door een consortium dat bestaat uit TNO-MEP, Tauw Milieu, IWACO, MTI en de provincie Utrecht. Het project is mede mogelijk gemaakt door de provincie Utrecht, Du Pont de Nemours Nederland BV, de provincie Gelderland, Akzo Nobel Engineering, het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, Shell ORTEC/2, Shell Nederland Verkoop MRNB/1, de provincie Noord-Holland, Texaco Services Europe Ltd., de gemeente Arnhem, Stichting Bodemsanering NS en Dow Benelux.

Het project bestaat globaal uit drie deelprojecten: *Acceptatie*, *Meten* en *Modelleren*. De resultaten van deze deelprojecten worden gebruikt als input voor het beslissingsondersteunend model zelf.

In dit rapport worden de resultaten van het deelproject *Modelleren* gepresenteerd. Het doel van dit deelproject was vast te stellen wat de 'state of the art' is van het modelleren van verspreiding onder invloed van natuurlijke afbraak. Daarbij stond de vraag centraal welke bijdrage modelleren kan leveren aan de beoordeling en acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant.



## INHOUD

SAMENVATTING .....	ix
SUMMARY .....	xi
Hoofdstuk1 INLEIDING .....	1
Hoofdstuk2 OPZET DEELPROJECT MODELLEREN .....	3
2.1 Algemeen .....	3
2.2 Inhoud workshops .....	3
Hoofdstuk3 AANPAK EN RESULTATEN MODELLERINGSGROEPEN .....	5
3.1 Grondmechanica Delft .....	5
3.2 TNO-NITG/Universiteit Delft .....	5
3.3 Tauw/IWACO .....	5
3.4 Landbouwniversiteit Wageningen .....	6
3.5 Algemene conclusies en opmerkingen naar aanleiding van de modelleringscase.....	6
Hoofdstuk4 GENERIEKE AANPAK MODELLERING NATUURLIJKE AFBRAAK.....	7
4.1 Inleiding .....	7
4.2 Stellingen .....	7
4.3 Algemene richtlijnen modellering natuurlijke afbraak.....	8
Hoofdstuk5 MODELLERING IN RELATIE TOT HET BESLISSINGSONDERSTEUNEND MODEL .....	11
5.1 Inleiding .....	11
5.2 Bepalen kleur van het tweede verkeerslicht.....	11
5.3 Opzet modellering .....	12
5.3.1 Nulsituatie .....	12
5.3.2 Geohydrologisch model.....	13
5.3.3 Afbraaksnelheid.....	14
5.3.4 Modelberekeningen.....	14
Hoofdstuk6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	15
Bijlage A VERSLAG VAN DE INTERVIEWS	
Bijlage B RAPPORTAGE TNO-NITG	
Bijlage C RAPPORTAGE GRONDMECHANICA DELFT	
Bijlage D RAPPORTAGE LANDBOUWUNIVERSITEIT WAGENINGEN	
Bijlage E RAPPORTAGE TAUW/IWACO	



## SAMENVATTING

### **Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant; fase 1: modelleren**

Voor het NOBIS-project *Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant* is het deelproject *Modelleren* uitgevoerd. Het hoofddoel van dit deelproject was vast te stellen wat de 'state of the art' is van het modelleren van verspreiding van grondwaterverontreinigingen onder invloed van natuurlijke afbraak. Daartoe hebben vier modelleringsgroepen (afkomstig van verschillende instituten in Nederland) de grondwaterverontreinigingspluimontwikkeling onder invloed van natuurlijke afbraak gemodelleerd voor een concreet geval van bodemverontreiniging.

Op basis van de resultaten is geconcludeerd dat met modelleren de toekomstige ontwikkeling van een verontreinigingspluim zo kan worden voorspeld dat deze informatie kan worden gebruikt ter ondersteuning van de besluitvorming over de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant. Belangrijke aspecten hierbij zijn de wijze waarop gegevens worden verzameld en de wijze waarop de resultaten van modelleren worden gepresenteerd.



## SUMMARY

### **Development of a decision model for the acceptance of natural attenuation as a remediation variant; phase 1: modeling**

Within the NOBIS-project *Development of a decision-support system on the acceptance of natural attenuation as a remediation option*, the subproject *Modelling* was carried out. The objective of this subproject was to identify the state of the art in modelling groundwater contaminant plume migration affected by natural attenuation processes. To this end, four teams representing various Dutch institutes active in the field have each modelled, on the basis of an actual soil contamination case, the development of a groundwater contamination plume affected by natural attenuation processes.

It was found that modelling actually is a suitable means for predicting the future development of a contamination plume in such a way that the data generated can be used to support the decision-making, by the authorities, on whether or not to accept natural attention as a remediation option. The study also emphasizes the importance of gathering data systematically, and of presenting the modelling results in an adequate way.





## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

Een van de deelprojecten van het NOBIS-project *Ontwikkeling van een beslismodel ten behoeve van de acceptatie van natuurlijke afbraak als saneringsvariant* is het deelproject *Modelleren* (activiteit 4). Dit deelproject is onderdeel van deelresultaat 2 (samen met *Meten I* en *Evaluatie*). Het hoofddoel van deelproject *Modelleren* was vast te stellen wat de 'state of the art' is op het gebied van modelleren van natuurlijke afbraak. De reden om de state of the art te willen vaststellen, was dat er geen goed beeld was van wat modelleren zou kunnen bijdragen aan de beoordeling van natuurlijke afbraak als saneringsvariant.

Om de state of the art te kunnen vaststellen, is er een *modelleringsactiviteit* georganiseerd. In dit rapport worden de resultaten van de modelleringsactiviteit gepresenteerd en worden richtlijnen gegeven voor hoe modelleren in het beslismodel kan worden opgenomen. De resultaten van dit deelproject zullen uiteindelijk in het definitieve conceptbeslismodel worden verwerkt (deelresultaat 3).



## HOOFDSTUK 2

### OPZET DEELPROJECT MODELLEREN

#### 2.1 Algemeen

Om de state of the art te kunnen vaststellen, is besloten om een modelleringsactiviteit te organiseren. Voor deze activiteit zijn vier modelleringsgroepen uitgenodigd uit de advieswereld en universitaire wereld. Deze groepen hebben de opdracht gekregen om van een bestaand geval van bodemverontreiniging de ontwikkeling te modelleren van de verontreinigingspluim onder invloed van natuurlijke afbraak. De modelleringsgroepen waren:

- Tauw/Iwaco;
- TNO NITG/Universiteit Delft;
- Grondmechanica Delft;
- Landbouwniversiteit Wageningen.

Er is gekozen voor een case op de locatie Koninginneweg in Vaassen. Deze locatie is verontreinigd met gechloreerde koolwaterstoffen (CKW). Er is om drie redenen voor deze case gekozen:

- De verontreinigingssituatie was bekend op twee tijdstippen (1990 en 1997).
- Er was al een kwalitatief onderzoek uitgevoerd naar het optreden naar natuurlijke afbraak. Daaruit is naar voren gekomen dat natuurlijke afbraak op de locatie optreedt.
- De locatie is redelijk representatief voor andere CKW-verontreinigingen.

Voordat de modelleringsactiviteit van start ging, zijn er interviews gehouden met de vier modelleringsgroepen (zie bijlage A). Het doel van de interviews was vast te stellen wat binnen de betrokken instellingen de status was van modellering van natuurlijke afbraak. Daarnaast dienden de interviews ervoor om te inventariseren welke modellen er werden gebruikt en hoe deze werden toegepast. Ook werd tijdens de interviews de opzet van de modelleringsactiviteit besproken.

De modelleringsactiviteit is gestart in november 1997 met een workshop. Daarna zijn nog een tussenworkshop en een eindworkshop gehouden. Hieronder wordt inhoud van deze workshops beknopt besproken.

#### 2.2 Inhoud workshops

##### *Workshop 1 (6 november 1997)*

In deze workshop is de case (Koninginneweg in Vaassen) gepresenteerd en is de doelstelling van de modelleringsactiviteit toegelicht. Het doel van de modellering is in deze workshop als volgt geconcretiseerd: modelleren van pluimontwikkeling op de Koninginneweg Vaassen in alle dimensies (ruimte en tijd). De groepen hebben de locatie-onderzoeksgegevens op het tijdstip 1990 meegekregen. De gegevens van 1997 zijn nog niet aan de modelleringsgroepen ter beschikking gesteld, maar zijn gebruikt om later de resultaten van de modelberekeningen te toetsen.

De groepen hebben naar aanleiding van de workshop een vragenlijst gekregen die als leidraad heeft gediend bij de uitvoering van de modelberekeningen. Ook is aangegeven vanuit welke perceptie de opdracht diende te worden uitgevoerd. In een brief (12 november 1997) aan de modelleringsgroepen is dit als volgt geformuleerd:

Voor het uitvoeren van de modellering is het goed om het een en ander te zien vanuit de perceptie van een opdrachtgever (in 1990). Deze is onder andere erg benieuwd hoe de pluim er in 1997 uitziet. Daarnaast wil hij ook graag weten of zijn buurman die op 350 meter stroomafwaarts van de voormalige wasserij woont op termijn ook te maken krijgt met de grondwaterverontreiniging. De buurman wil namelijk een traditionele handpomp gaan installeren om zijn moestuintje te kunnen

besproeien en vraagt zich af of hij dan ooit CKW gaat oppompen.

*Workshop 2 (29 januari 1998)*

In de tweede workshop hebben de vier groepen de modelleringsresultaten gepresenteerd die zijn gebaseerd op de onderzoeksresultaten van 1990. Nadat deze resultaten zijn besproken, zijn de onderzoeksgegevens van 1997 gepresenteerd. Met deze gegevens zijn de groepen weer verder aan het rekenen gegaan. (De wijze waarop de verschillende groepen het modelleren hebben aangepakt, wordt toegelicht in hoofdstuk 3.)

*Workshop 3 (3 maart 1998)*

In de derde, afsluitende workshop hebben de modelleringsgroepen hun resultaten gepresenteerd, waarbij met name is gekeken welke invloed de nieuwe gegevens hadden op de uitkomsten van de modelberekeningen. Na de presentaties is aan de hand van acht stellingen gediscussieerd over de wijze waarop de ontwikkeling van een verontreinigingspluim onder invloed van natuurlijke afbraak kan worden gemodelleerd en over welke inputgegevens hiervoor nodig zijn.

Op basis van deze stellingen is vervolgens in een gemeenschappelijke discussie een generieke aanpak gedestilleerd waaruit richtlijnen naar voren zijn gekomen over de wijze waarop modellering kan worden ingezet bij de beoordeling van natuurlijke afbraak als saneringsvariant. De resultaten van deze discussies worden beschreven in hoofdstuk 5.





## HOOFDSTUK 3

### AANPAK EN RESULTATEN MODELLERINGSGROEPEN

In dit hoofdstuk wordt de aanpak van de vier modelleringsgroepen beschreven. Daar wordt steeds een onderscheid gemaakt tussen geohydrologie en stoftransport (factoren die bij elk verspreidingsprobleem een rol spelen), biologische afbraak (cruciaal bij natuurlijke afbraak) en de beschrijving van de bron. Dit laatste aspect bleek in de workshops aanleiding te geven tot veel discussie. Het gedrag van de bron blijkt zeer bepalend te zijn voor het uiteindelijke verspreidingsgedrag, wat reden is om het hier als afzonderlijk aspect te vermelden. Het hoofdstuk wordt afgesloten met algemene conclusies en opmerkingen naar aanleiding van de modelleringscase.

#### 3.1 Grondmechanica Delft

##### *Geohydrologie en stoftransport*

Grondmechanica Delft heeft gebruikgemaakt van het computermodel VERA, waarbij gemodelleerd is over één stroombaan. Er is dus uitgegaan van een uniforme grondwaterstroming. Daarnaast is voor adsorptie een lineair verband aangenomen. De benodigde parameters hiervoor zijn gebaseerd op literatuurwaarden.

##### *Biologische afbraak*

Voor het modelleren van reductieve dechlorering van CKW is uitgegaan van sequentiële afbraak, waarbij gebruik is gemaakt van eerste-ordeafbraakconstanten uit NOBIS-rapporten.

##### *Beschrijving bron*

Op basis van de allereerste meetgegevens is zowel een continue als een uitdovende bron niet uitgesloten. De nieuwe meetgegevens van 1997 lieten zien dat de bron niet is uitgedoofd. De uiteindelijke berekeningen zijn daarom voor een continue bron uitgevoerd.

#### 3.2 TNO-NITG/Universiteit Delft

##### *Geohydrologie en stoftransport*

TNO beschouwde een eendimensionaal systeem, waarvoor berekeningen worden uitgevoerd in MODFLOW (stroming) en RT3D (stoftransport en afbraak). Om de grondwaterstromingssnelheid te bepalen, is gebruikgemaakt van waterbalansen. De adsorptie is als lineair beschouwd. De hiervoor benodigde parameters zijn gebaseerd op literatuurwaarden.

##### *Biologische afbraak*

Sequentiële biologische afbraak is via een eerste-ordekinetiek gemodelleerd. De parameterbandbreedte is vastgesteld op basis van literatuurgegevens en is vernaauwd op basis van de metingen.

##### *Beschrijving bron*

TNO ging uit van een continu naleverende bron.

#### 3.3 Tauw/IWACO

##### *Geohydrologie en stoftransport*

Tauw/IWACO ging uit van een tweedimensionaal tweelaagssysteem (in feite een quasi-driedimensionaal systeem). De berekeningen zijn uitgevoerd in MODFLOW (stroming) en RT3D (stoftransport en afbraak). De grondwaterstromingssnelheid is gebaseerd op lokale stijghoogtemetingen en geohydrologische eigenschappen op de locatie. De adsorptie is als lineair beschouwd. De parameters zijn in eerste instantie uit de literatuur gehaald maar zijn later aangepast op basis van de meetgegevens over de kern van de verontreiniging.

#### *Biologische afbraak*

Sequentiële biologische afbraak is via een eerste-ordekinetiek gemodelleerd. De parameterbandbreedte is vastgesteld op basis van literatuurgegevens en is vernauwd op basis van de vrachtberekeningen voor de verschillende componenten.

#### *Beschrijving bron*

Tauw/IWACO ging uit van een uitdovende bron (in twee jaar).

### **3.4 Landbouwniversiteit Wageningen**

#### *Geohydrologie en stoftransport*

De Landbouwniversiteit Wageningen (LUW) heeft in twee dimensies gemodelleerd en heeft gebruikgemaakt van METROPOL. Omdat de pluim een grote breedte had, is onderzoek gedaan naar de mogelijke (geohydrologische) oorzaken daarvan. Parameters in het model zijn gekalibreerd met een kleinste-kwadratenmethode.

#### *Biologische afbraak*

Voor de beschrijving van sequentiële biologische afbraak is uitgegaan van een eerste-ordekinetiek. De parameters zijn gebaseerd op literatuurwaarden.

#### *Beschrijving bron*

LUW heeft voor de beschrijving van de bron meerdere scenario's beschouwd, waarbij de 'uitdooftijd' varieerde van twee tot twintig jaar. Op basis van de verschillende berekeningen kon niet met zekerheid worden bepaald welke van deze scenario's voor deze site van toepassing zijn.

### **3.5 Algemene conclusies en opmerkingen naar aanleiding van de modelleringscase**

De algemene conclusie is dat er - ondanks de beperkte hoeveelheid beschikbare onderzoeksgegevens en ondanks het feit dat deze gegevens niet zijn verzameld uit het oogpunt van modelleren - goede resultaten zijn geboekt. De belangrijkste conclusies over de verontreinigingssituatie en de pluimontwikkeling zijn:

- Het is onduidelijk of er nog een naleverende bron op de locatie aanwezig is.
- De verontreinigingspluim is nog niet volledig stagnant.
- De buurman op 350 meter afstand (stroomafwaarts) krijgt waarschijnlijk tijdelijk het front van de verontreinigingspluim (waarin zich alleen nog VC bevindt) onder zijn tuin. De concentraties zullen echter laag zijn (vermoedelijke enkele tientallen microgrammen per liter).
- De pluim zal zich binnen tien jaar weer gaan terugtrekken.

Alle groepen hebben veel tijd besteed aan de analyse en interpretatie van meetdata. Een grondige data-analyse blijkt een essentieel onderdeel te zijn van het modelleren van de pluimontwikkeling. In het algemeen kan worden geconcludeerd dat het vaak meer tijd kost om gegevens te interpreteren dan om het rekenwerk uit te voeren. Als het bodemonderzoek echter meer zou zijn uitgevoerd vanuit het oogpunt van modelleren, had er veel tijd kunnen worden bespaard.

In het algemeen vonden de groepen de kwaliteit en de hoeveelheid geohydrologische gegevens aan de magere kant. Met name het gebrek aan voldoende peilgegevens en gegevens over de doorlatendheid heeft geleid tot nogal uiteenlopende aannames over de grondwaterstromingssnelheid. Omdat er geen organisch-stofbepalingen voorhanden waren, was het ook moeilijk om een effectieve verspreidingsnelheid in te schatten. Op basis van iteratieve modellering konden onzekerheden in de effectieve verspreidingsnelheid echter worden teruggebracht tot een aanvaardbaar niveau. De onzekerheid in de voorspellingen zal echter in de loop van de tijd toenemen, wat reden is om over een jaar of tien een nieuwe meetronde te houden.

### GENERIEKE AANPAK MODELLERING NATUURLIJKE AFBRAAK

#### 4.1 Inleiding

Nadat de voordrachten van de groepen in workshop 3 waren afgerond, is gediscussieerd over de formulering van richtlijnen waarmee een generieke aanpak van modelleren van natuurlijke afbraak kan worden beschreven. De discussie is gevoerd aan de hand van acht stellingen. Deze stellingen waren geformuleerd op basis van de modelleerresultaten van de case. Na een discussie over de stellingen is gemeenschappelijk een aantal richtlijnen opgesteld. Deze richtlijnen worden in het beslissingsondersteunend model opgenomen om richting te geven aan het voldoende modelleren van natuurlijke afbraak in de praktijk.

Hieronder worden de stellingen gegeven, met een samenvatting van de gevoerde discussie per stelling.

#### 4.2 Stellingen

1. *In het algemeen zijn metingen in zes peilbuizen voldoende (gemeten over een stroombaan: één voor referentie achter de bron, twee in de bron, twee in de pluim en één schoon achter de pluim).*

In het algemeen zullen zes peilbuizen niet voldoende zijn, maar het is ook niet zo dat het aantal een orde groter moet zijn om een goed beeld te krijgen. Bij deze opzet wordt de laterale afperking van de verontreiniging niet gemeten, terwijl deze toch erg belangrijk is. Voor de nauwkeurigheid van de metingen zou het goed zijn om wat extra peilbuizen tussen de bron en de kern van de verontreiniging te plaatsen.

2. *Kennis van geohydrologie is cruciaal.*

Deze stelling wordt door iedereen onderschreven. Er is een discussie over de mate van detail waarmee de geohydrologie bekend moet zijn. In het algemeen is het aan te bevelen om goede stijghoogtemetingen ten opzichte van een referentiepunt te doen. Hieruit kunnen de stromingsrichting en -snelheid worden afgeleid. Pas als deze gegevens bekend zijn, kan er een goede meetopzet voor de verontreinigingssituatie worden opgesteld. Voor het in kaart brengen van de bodemopbouw is het belangrijk dat er een aantal goede boorbeschrijvingen is. Er is een verschil van mening over de bruikbaarheid van regionale grondwatermodellen en gegevens van de TNO-peilbuizen. Enerzijds zijn dit eenvoudige manieren om aan gegevens te komen. Anderzijds zijn deze metingen gedaan om de grondwaterstroming op een grote (dat wil zeggen regionale) schaal in kaart te brengen, waardoor zij veel te onnauwkeurig zijn om toe te passen op kleine schaal (dat wil zeggen: siteschaal). In het algemeen overheerst de mening dat de relevante geohydrologische data op locatieniveau (en niet op regionale schaal) moeten worden verzameld om een betrouwbaar geohydrologisch beeld te verkrijgen.

3. *Literatuurwaarden zijn voldoende voor een modelleringsstudie.*

Alle groepen hebben (voornamelijk in het begin) gebruikgemaakt van literatuurwaarden voor adsorptieparameters en afbraaksnelheden. De literatuur geeft echter een bepaalde range aan waarden die vaak zo ruim is dat dit een zeer ruime spreiding in de resultaten geeft. De metingen zijn vervolgens gebruikt om een keuze te maken uit de parameters uit de literatuur. De modelleringsstudie heeft zich hier echter gericht op beschrijving van een CKW-afbraakketen. Het feit dat afbraakproducten hier gemeten werden, maakte de data bruikbaar om afbraaksnelheden en adsorptieparameters te toetsen. Het verdient echter de voorkeur om afbraaksnelheden ook op een alternatieve wijze te bepalen (bijvoorbeeld via vrachtberekeningen). De op verschillende wijzen verkregen afbraaksnelheden kunnen dan met elkaar worden vergeleken, waarna er een 'best guess' kan worden gemaakt.

4. *Redoxmetingen zijn overbodig.*

Hoewel de redoxmetingen in de voordrachten nauwelijks zijn genoemd, zijn de workshopdeelnemers het erover eens dat een dergelijke meting altijd moet worden uitgevoerd. De resultaten worden echter

niet zozeer in kwantitatieve zin gebruikt maar spelen vooral een rol bij de beslissing of de condities in de bodem überhaupt wel geschikt zijn voor afbraak van de verontreiniging. Dit geldt zeker voor stoffen waarvan de afbraakproducten niet meetbaar zijn.

**5. Een modelleringsstudie kan alleen worden uitgevoerd voor stoffen met een meetbaar afbraakproduct.**

Dit punt is bij de voorgaande stellingen ook al aan bod geweest. Om de afbraak te modelleren van een verontreiniging waarvan het afbraakproduct niet kan worden gemeten, zijn waarschijnlijk meer laboratorium- en veldgegevens nodig. Op zich is het echter goed mogelijk om een modelleringsstudie voor andere stoffen uit te voeren.

**6. Modelleren kan nu voor 10 kf.**

Niemand wil hier expliciet antwoord op geven ten overstaan van de anderen. De stelling wordt wel in algemene zin beantwoord. Voor een nieuwe modelleringsstudie is zeker minder dan 50 kf nodig, wellicht zelfs minder dan de helft. Er moet echter niet uit het oog verloren worden dat een goede data-interpretatie behoorlijk wat tijd kost maar vaak ook geld oplevert omdat het aantal metingen kan worden ingeperkt. Het verdient dan ook de voorkeur om de modellering/data-interpretatie parallel te laten lopen aan de veldonderzoeken, zodat er vanaf het begin veel interactie is.

**7. Meetpunten in de tijd zijn zinvoller dan meetpunten in de ruimte.**

Deze stelling is niet gemakkelijk te beantwoorden. Wel is er een aantal belangrijke punten ter sprake gekomen. Om een modelleringsstudie uit te voeren is het belangrijk om nauwkeurige informatie over de herkomst van de verontreiniging te kennen samen met ofwel één dataset in de tijd ofwel twee datasets in de tijd. Vanwege heterogeniteiten in de bodemeigenschappen en in de verontreinigingssituatie is het echter ook belangrijk om voldoende metingen in de ruimte te hebben. De nauwkeurigheid van de metingen is op zich niet zo heel erg belangrijk. Er zijn immers zo veel aspecten die de meting beïnvloeden dat het zinvoller is om veel metingen in de ruimte te hebben dan een klein aantal zeer nauwkeurige metingen.

**8. Het is mogelijk om een generieke aanpak voor natuurlijke afbraak op te stellen.**

Het is zeker mogelijk om een generieke aanpak op te stellen, mits er bij elke stap goed wordt nagedacht. Als wordt gewerkt met een 'kookboek' dat klakkeloos wordt gevolgd, zullen de resultaten onbetrouwbaar of foutief zijn. Algemene richtlijnen zijn dus met de nodige kanttekeningen wel te geven.

De modelleringsgroepen zien modelleren niet als een doel op zich. Het is belangrijk om het gebruik van modellen (conceptuele modellen en rekenmodellen) te integreren in het hele proces van bodemonderzoek, uitwerking van saneringsstrategieën (inclusief natuurlijke afbraak) en uiteindelijke monitoring van verontreinigingen. Door al vanaf het begin gebruik te maken van modellen kan er efficiënter worden onderzocht, kan er beter saneringsmaatregelen worden uitgewerkt en kan er effectiever worden gemonitord. Of, zoals het in de modelleringsrapportage van TNO is verwoord:

Doel van het modelleren is het toevoegen van fysische informatie omtrent het transportproces aan de gemeten data. Dit moet leiden tot:

- een betere interpretatie van de gemeten aanwezige concentraties;
- een ruimtelijke invulling van de pluim gebaseerd op fysica en metingen;
- een ontwikkeling van de pluim in de tijd, en derhalve ook voorspellingen.

In wezen is het de bedoeling dat combinatie van data en fysica meer oplevert dan de som der afzonderlijke delen. Dit houdt in dat beiden op elkaar afgestemd dienen te worden: een uitgebreid model heeft geen zin als er ook niet intensief is gemeten en andersom.

### **4.3 Algemene richtlijnen modellering natuurlijke afbraak**

In deze paragraaf wordt een aantal belangrijke richtlijnen gegeven die zijn geformuleerd op basis van de gevoerde discussies. Over deze richtlijnen heerst consensus onder alle deelnemers van de modelleringsactiviteit. Wel moet worden benadrukt dat deze richtlijnen ook echt als *richtinggevend* bedoeld zijn en dat ze dus *niet* als kookboek mogen worden gezien. Opgemerkt moet worden dat het numerieke model dat wordt gekozen voor het modelleren van natuurlijke afbraak, eigenlijk niet relevant is. Veel relevanter is de wijze waarop wordt gemodelleerd, inclusief data-interpretatie.

### *Geohydrologie*

De geohydrologie en de bodemopbouw moeten in kaart worden gebracht, waarbij zo een goed mogelijk beeld moet worden verkregen van:

- de stromingsrichting;
- de stromingssnelheid;
- de bodemopbouw.

### *Bodemonderzoek*

Het bodemonderzoek is erop gericht om op zo efficiënt mogelijke wijze de verontreiniging af te perken en alle gegevens te verzamelen die van belang zijn om het optreden van natuurlijke afbraak te bepalen en te kwantificeren. Hiertoe dienen tijdens het bodemonderzoek de volgende dingen te gebeuren:

- Er moeten tien peilbuizen gefaseerd worden geplaatst in de stromingsrichting over de hoofdas van de verontreiniging.
- Er moeten goede boorbeschrijvingen worden gemaakt.
- De fractie organisch stof moet (nauwkeurig) worden bepaald in grondmonsters die worden genomen tijdens de plaatsing van de peilbuizen.
- Er moeten stijghoogtemetingen worden uitgevoerd.
- De redoxtoestand van de bodem moet worden vastgesteld door bijvoorbeeld de concentraties aan elektronenacceptoren ( $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe(II)$ ,  $SO_4^{2-}$  en methaan) te meten of door redoxmetingen uit te voeren.
- Andere relevante geochemische parameters moeten worden bepaald, zoals opgelost organisch koolstof (DOC).
- De concentraties aan verontreinigingen moeten worden bepaald (uitgangs- en afbraakproducten).

### *j/Modellering*

Om goede modelberekeningen te kunnen uitvoeren, zijn de volgende zaken van belang:

- De vracht aan verontreinigingen in de bodem.
- Het zwaartepunt van de verontreiniging.
- Het is belangrijk om de verontreinigingssituatie op twee tijdstippen te kennen. Deze tijdstippen moeten minimaal tien jaar uit elkaar liggen, waarbij een van de tijdstippen kan worden gevormd door het historisch onderzoek (tijdstip van ontstaan).
- Op basis van modelberekeningen wordt een verwachting berekend over de ontwikkeling van de verontreinigingspluim. Hieruit volgt een monitoringschema. Monitoren en modelleren vormen samen een cyclisch proces.

### *Monitoren*

Om vast te stellen of de pluim zich ontwikkelt zoals is voorspeld, is een relatief extensieve monitoring voldoende. Er kan worden gedacht aan bemonstering en analyse van de belangrijkste delen van tien peilbuizen tussen de eens per twee tot vijf jaar (afhankelijk van effectieve stromingssnelheid). De belangrijkste peilbuizen zijn gesitueerd:

- vlak achter de bron;
- rond een zwaartepunt (of rond zwaartepunten);
- stroomafwaarts aan het front van de verontreinigingspluim.







## HOOFDSTUK 5

### MODELLERING IN RELATIE TOT HET BESLISSINGSONDERSTEUNEND MODEL

#### 5.1 Inleiding

De rode draad in het beslissingsondersteunend model bestaat uit vier verkeerslichten, waarbij bij elk verkeerslicht steeds moet worden vastgesteld of natuurlijke afbraak een kansrijke optie, een 'kansoptie' of een kansarme optie is (respectievelijk een groen, oranje of rood licht). Het tweede verkeerslicht in dit model betreft de pluimontwikkeling (verspreiding van de verontreiniging) onder invloed van natuurlijke afbraak.

Modellering is essentieel voor het voorspellen van de pluimontwikkeling. De modellering kan in het ene geval bestaan uit eenvoudige handmatige berekeningen en in andere gevallen uit bijvoorbeeld zeer complexe geohydrologische modellering. Onafhankelijk van hoe er wordt gemodelleerd, moet er voor het bepalen van de kleur van het verkeerslicht een antwoord worden gegeven op de vraag hoe de pluim zich in de toekomst ontwikkelt. Zoals al is beschreven, moet er een goede dataset zijn om via modellering een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de pluimontwikkeling. Het verkrijgen van een goede dataset (oftewel de eisen die aan de input van het verspreidingsmodel worden gesteld) maakt integraal onderdeel uit van het modelleren.

In dit hoofdstuk is aangegeven hoe de pluimontwikkeling onder invloed van natuurlijke afbraak kan worden gemodelleerd om uiteindelijk de kleur van het tweede verkeerslicht te kunnen bepalen. Ook is aangegeven hoe veldgegevens bij voorkeur dienen te worden verzameld om te zorgen voor een optimale input van het model.

#### 5.2 Bepalen kleur van het tweede verkeerslicht

Om de kleur van het tweede verkeerslicht te kunnen bepalen, is het vaak niet nodig om het exacte concentratieverloop in de tijd te kunnen voorspellen. In de meeste gevallen kan de kleur van het tweede verkeerslicht worden bepaald aan de hand van de combinatie van twee grafieken. In de eerste grafiek wordt het verloop van de vracht aan verontreinigingen in de pluim weergegeven en in de tweede grafiek de verspreiding (in stromingsrichting) in de tijd (zie figuur 1). Hieronder wordt een beknopte toelichting op de grafieken gegeven.

##### *Vracht in de pluim*

Onder de *vracht in de pluim* wordt verstaan de totale hoeveelheid opgeloste en geadsorbeerde verontreinigingen. Hoewel de aanwezigheid van puur product (of beter gezegd: een naleverende bron) wel essentieel is voor het modelleren van de pluimontwikkeling, hoeft de hoeveelheid die eventueel in de bodem aanwezig is niet te worden meegenomen voor de grafische weergave (hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 5.3).

Figuur 1 Verandering van de vracht in de pluim in de tijd (A);  
verspreiding in de tijd (B)

#### *Verspreiding in de tijd*

In veel gevallen kan worden volstaan met het in één dimensie (over één stroombaan) modelleren van de pluimontwikkeling. Een stijgende lijn in de grafiek (B1) betekent dat de pluim nog groeit. Een gelijk-blijvende lijn (B2) of een dalende lijn (B3) betekent dat de pluim stagnant of krimpend is.

In de praktijk zal slechts een beperkt aantal combinaties van de twee grafieken voorkomen, zoals A1-B1, A2-B2, A3-B3 en A3-B2. Als bijvoorbeeld de combinatie A1-B1 wordt gevonden, betekent dit dat de nalevering uit de bron groter is dan de afbraak en dat de pluim groeit. Dit is niet vaak acceptabel, wat het verkeerslicht dus op rood zet. Als zich bijvoorbeeld de combinatie A3-B3 voordoet, betekent dit dat de massa die als gevolg van afbraak verdwijnt groter is dan de massa die als gevolg van nalevering in de pluim terechtkomt. Omdat in dit geval ook de pluim krimpt, is er geen sprake meer van verspreiding en verdwijnt de pluim op termijn. Het verkeerslicht kan dus op groen worden gezet.

### **5.3 Opzet modellering**

Er zijn verschillende mogelijkheden om te komen tot de grafieken in figuur 1. In deze paragraaf is op hoofdlijnen aangegeven welke stappen moeten worden doorlopen om de pluimontwikkeling onder invloed van natuurlijke afbraak modelmatig te kunnen voorspellen. De stappen dienen er met name voor om inzicht te geven in welke inputdata essentieel zijn voor de modellering en op welke wijze ze kunnen worden bewerkt. Op hoofdlijnen zijn de volgende vier stappen te onderscheiden:

1. Leg de nulsituatie vast.
2. Stel een geohydrologisch model op.
3. Bepaal de afbraaksnelheid.
4. Voer de modelberekeningen uit.

#### *5.3.1 Nulsituatie*

Voor de uitvoering van (voorspellende) verspreidingsberekeningen is het van belang om eerst het ontstaan van de aanwezige verontreinigingspluim zo goed mogelijk te beschrijven. De nulsituatie wordt dan gedefinieerd als het tijdstip vanaf waar de voorspellende berekeningen worden uitgevoerd.

Voor het vaststellen van de nulsituatie is het noodzakelijk om op minimaal twee tijdstippen een goed beeld te hebben van de verontreinigingssituatie. Afhankelijk van de grondwaterstromingssnelheid moeten deze tijdstippen minimaal vijf tot tien jaar uit elkaar liggen. Het eerste tijdstip is in het ideale geval het moment van ontstaan van de verontreiniging, bijvoorbeeld het moment dat er een calamiteit met een opslagtank plaatsvond. Het tweede tijdstip is de huidige verontreinigingssituatie (minimaal vijf tot tien jaar na dato).

Als er geen of onvoldoende betrouwbare gegevens over het ontstaan van de verontreiniging zijn, kan de nulsituatie worden vastgesteld aan de hand van de verontreinigingssituatie zoals deze bekend is op twee latere tijdstippen (wederom minimaal vijf tot tien jaar uit elkaar). Het is hierbij wel van belang dat de verkregen gegevens zo veel mogelijk op dezelfde plaatsen zijn gemeten. Tot slot is het van belang om te weten of er op dit moment nog een (naleverende) bron aanwezig is.

### 5.3.2 Geohydrologisch model

In veel gevallen is het voldoende om de modellering uit te voeren over één stroombaan. De volgende gegevens zijn in ieder geval noodzakelijk om voldoende betrouwbare berekeningen te kunnen uitvoeren:

- grondwaterstromingsrichting;
- effectieve transportsnelheid.

#### *Stromingsrichting*

De grondwaterstromingsrichting wordt bij voorkeur op de locatie bepaald, bijvoorbeeld door peilingen. Belangrijk is dat er zo veel mogelijk peilingen over een langere periode worden uitgevoerd.

#### *Effectieve transportsnelheid*

De effectieve transportsnelheid is de snelheid waarmee het front van de pluim zich verplaatst. Deze parameter is de meest kritische parameter in het model. De effectieve transportsnelheid is gedefinieerd als:

$$v_{eff} = \frac{v}{R}$$

waarin:  $v_{eff}$  = effe

ctieve transportsnelheid (m/jaar);

$v$  = grondwaterstromingssnelheid (m/jaar);

$R$  = retardatiefactor.

Het is belangrijk om zich te realiseren dat de effectieve transportsnelheid *niet* afhankelijk is van de afbraaksnelheid!

Er zijn verschillende mogelijkheden om de effectieve transportsnelheid te bepalen, bijvoorbeeld:

- op basis van de grondwaterstromingssnelheid en de retardatiefactor (conform formule 1), waarbij zo veel mogelijk gebruik wordt gemaakt van in het veld bepaalde parameters;
- op basis van het tijdstip van het ontstaan van de verontreiniging en de lengte van de huidige pluim;
- op basis van een zwaartepuntenanalyse.

Deze methoden worden toegelicht in de rapportages van de afzonderlijke modelleringsgroepen (zie bijlage B, C, D en E). Er is niet één beste methode voor het bepalen van de effectieve transportsnelheid. De voorkeur gaat ernaar uit om  $v_{eff}$  via meerdere wegen te bepalen en om de uitkomsten met elkaar te vergelijken, waarna er een zo goed mogelijke keuze wordt gemaakt.

### 5.3.3 Afbraaksnelheid

Ook de afbraaksnelheid kan via meerdere wegen worden bepaald. Mogelijkheden zijn:

- literatuurgegevens;
- vrachtberekeningen.

Deze methoden worden toegelicht in de rapportages van de afzonderlijke modelleringsgroepen (zie bijlage B, C, D en E). Opgemerkt moet worden dat in het laboratorium bepaalde (natuurlijke-)afbraakconstanten vaak niet of zeer slecht vertaalbaar zijn naar de veldsituatie. Daarom wordt het afgeraden om dergelijke afbraakconstanten te gebruiken voor de kwantificering van natuurlijke afbraak.

#### *5.3.4 Modelberekeningen*

Als alle hierboven besproken zaken zijn bepaald, kunnen de eigenlijke modelberekeningen worden uitgevoerd. De eerste stap is het fitten van het model op de huidige situatie. Als dit is gebeurd, kunnen de voorspellende berekeningen worden uitgevoerd.



## HOOFDSTUK 6

### CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op basis van de modelleringsresultaten kan over de state of the art van het modelleren van natuurlijk afbraak worden geconcludeerd dat er voldoende kennis en ervaring op modelleringsgebied is om de ontwikkeling van verontreinigingspluimen onder invloed van natuurlijke afbraak te kunnen modelleren. Het detailniveau waarop kan worden gemodelleerd, is in het algemeen voldoende om tot resultaten te komen die kunnen worden gebruikt om beslissingen te ondersteunen over de acceptatie van natuurlijke afbraak als alternatieve saneringsvariant.

Uit de modelleringsactiviteit is naar voren gekomen dat er voldoende software beschikbaar is om modellering van natuurlijke afbraak te kunnen uitvoeren (zoals RT3D, METROPOL en VERA). Voor het verkrijgen van voldoende betrouwbare modelberekeningen is de keuze van de software van secundair belang.

De belangrijkste aspecten die een rol spelen bij het verkrijgen van voldoende betrouwbare modelleringsresultaten, worden bepaald door:

- het 'conceptuele model' dat wordt opgesteld;
- de beschikbaarheid van geohydrologische data;
- de beschikbaarheid van verontreinigingsdata;
- de gehanteerde afbraaksnelheden.

In het algemeen blijkt de beschikbaarheid van voldoende veldgegevens de limiterende factor te zijn bij het verkrijgen van betrouwbare modelleringsresultaten. In de toekomst moet er dus meer aandacht aan worden besteed om voldoende (betrouwbare) inputdata voor de modelberekeningen te verkrijgen.



## BIJLAGE A

### VERSLAG VAN DE INTERVIEWS

**Verslag van interview met ir. Jan Taat en ir. Gert-Jan Mulder van Grondmechanica Delft, gehouden door dr. ir. Timo Heimovaara en drs. Floortje Hanneman MTD op 24 september 1997 van 9.30–11.00**

Grondmechanica Delft (GD) heeft de volgende afdelingen: Grond (dijken, wegen), FOW (funderingen ondergrondse werken), Milieu (in feite alleen bodem, dus geen water en lucht), Verkenningen (veldwerk), Onderzoek (voornamelijk op geotechnisch gebied), Software-ontwikkeling (ontwikkeling van programmatuur, voornamelijk op geotechnisch - geohydrologisch, stabiliteitsberekeningen - gebied) en een IT-afdeling. Op de afdelingen Grond en FOW bevinden zich voornamelijk gebruikers van modellen. Het betreft dan de zogenaamde M-serie, die door GD zelf is ontwikkeld voor externe verkoop. Op de afdeling Verkenningen wordt weinig gebruikgemaakt van modellen. Jan en Gert-Jan zijn zelf onderdeel van de afdeling Milieu.

In 1982 is het programma VERA aangeschaft via INTERA, met als doel dit model verder te ontwikkelen en aan te passen. Het is destijds toegepast bij het berekenen van verspreiding van verontreiniging van sites. Omdat het steeds noodzakelijker werd om ook saneringsmaatregelen te kunnen beschrijven, werd VERA iets minder geschikt. Daarom is ook andere programmatuur aangeschaft. VERA is een 3D-eindige-differentiestoftransportmodel dat multicomponenttransport, chemisch evenwicht en trage processen als niet-evenwichtssorptie en biologische afbraak kan beschrijven. In de toekomst wordt VERA verwerkt in de M-serie. Het is ongeveer het enige model dat chemisch evenwicht in 3D kan beschrijven. Een model dat qua mogelijkheden op VERA lijkt, is HST2D (ontwikkeld door IFConsult in Arnhem).

Naast VERA is binnen de afdeling ook MWELL ontwikkeld, dat verlagingsberekeningen uitvoert. Er is ook beschikking over een spargingprogramma, dat echter nog niet gereed is voor extern gebruik. De ontwikkeling van modellen heeft geen prioriteit en de verantwoordelijkheid van de ontwikkeling ligt bij de beheerder van het model. Behalve de zelfontwikkelde modellen wordt de volgende software gebruikt: MICROFEM, MODFLOW, SLAEM (analytische eindige elementen), ONSAT (van het RIVM), SUTRA, SWANFLOW (voor meerfasestromingsberekeningen).

GD participeert in het Europese samenwerkingsverband Chemical Dynamics in the Subsoil, met de nadruk op de modellering van transport van stoffen in de bodem. In dit samenwerkingsverband zitten verder nog Van Riemsdijk (LUW), IFConsult (samen met GD voor de modellering), NITG (voor veldwerk) en AB-DLO (Jan Dolging, voor labwerk). Daarnaast zitten er per land nog drie groepen in.

GD heeft vroeger gewerkt aan het *CHEMVAL*-project, dat betrekking had op de validatie van chemische transportmodellen. De conclusie was dat analytische berekeningen prima kunnen worden nagedaan door chemische programmatuur, maar dat geavanceerdere berekeningen lastig zijn te valideren. De reden hiervoor is dat de interpretatie van het probleem een erg grote rol speelt bij het modelleren.

In Nederland wordt er door Guus Willemse gewerkt aan stroming en chemisch evenwicht. Er zijn bij GD geen groepen bekend die aan biologische modellering doen. Er wordt weliswaar door biologen al tijden gemodelleerd, maar dat gebeurt weinig in combinatie met hydrologie.

Modelleren wordt bij GD voornamelijk gebruikt als hulpmiddel in de besluitvorming en daarmee dus als middel om inzicht te verkrijgen. Bij de afdeling Milieu (achttien mensen in totaal) is ongeveer één derde

gebruiker van modellen en is één zesde ook betrokken bij ontwikkelingen. Bij heel GD ontwikkelen ongeveer twintig mensen modellen. De koppeling tussen meten en modelleren staat centraal bij GD. Het wordt gebruikt om experimenten numeriek te ontwerpen: eerst simpele berekeningen, dan een meting en dan weer terug naar de berekeningen.

**Verslag van interview met dr. ir. Chris te Stroet (TNO-NITG), gehouden door dr. ir. Timo Heimovaara (IWACO) en drs. Floortje Hanneman MTD (Tauw Milieu) op 24 september 1997 van 11.30-14.30**

TNO-NITG heeft een afdeling Geo-infrastructuur, die de volgende secties heeft: Geochemische Kartering, Geofysisch Onderzoek, Ondergronds Bouwen en Geosaneringsonderzoek. Chris te Stroet maakt onderdeel uit van deze laatste sectie. De sectie heeft veel contact met Geofysisch Onderzoek en met Hydrologie (een sectie binnen een andere afdeling). De sectie Geosaneringsonderzoek telt zo'n acht mensen: Jasper Griffioen (geochemicus), Chris te Stroet (fysisch geointeerd), Rolf Hetterschijt en Marcus van Zutphen (gericht op DNAPL-onderzoek), Koos Uil (regelgeving), Johan Valsta (promovendus op het gebied van transportmodellering, ijking) en Alice Buis (veldwerk). Wil Ewald is het sectiehoofd.

De doelstelling van modellering is bij TNO kennisverwerving, hoewel TNO tegenwoordig sterk marktgericht opereert. Bij de modellering wordt veel gebruikgemaakt van de kennis die bij TNO-breed aanwezig is. De beschrijving van processen staat centraal. Chris zelf houdt zich voornamelijk bezig met data-assimilatie, met de combinatie van metingen en modellen. Zijn doel is met een minimum aan metingen en modelleren een antwoord te kunnen geven op de gestelde vraag. Complexiteit van het model, meting en praktijk moeten goed op elkaar worden afgestemd. Voor praktijkcases worden relatief simpele modellen gebruikt, terwijl complexe modellen vooral dienen om meer inzicht in het probleem op te doen. Voor een goede werking van modellen moet ten eerste het convectieve gedeelte duidelijk zijn, ten tweede het fysisch-chemische gedeelte en ten derde het dispersieve karakter. Daarna komen alle andere zaken.

TNO werkt samen met het KIWA aan een groot project voor de drinkwaterbedrijven. Het onderwerp heeft duidelijke analogieën met saneringsproblemen. Het KIWA zou een interessante partij zijn voor een interview.

Op saneringsgebied wordt er weinig gemodelleerd, omdat het vooroordeel heerst dat modelleren niet nuttig is en bovendien veel te duur. Bij TNO worden stroming, sorptie en afbraak gemodelleerd. Uitgangspunt hierbij is het pakket MODFLOW in combinatie met MT3D. Als dat nodig blijkt te zijn, wordt deze programmatuur aangepast aan nieuwe wensen. Op het moment experimenteert Chris met het zojuist verschenen RT3D.

Chris heeft een aantal bedenkingen bij de opzet van het modelleringsvoorstel. Ten eerste kan het competitie-element worden vermeden door discussies binnenskamers te houden en door in de rapportage geen organisaties te noemen. Daarnaast vraagt Chris zich af of het eindresultaat wel te toetsen is als niet duidelijk is wat er in werkelijkheid gebeurt. Het lijkt Chris een aardig idee om met de hele groep samen te werken in plaats van de groepen individueel te houden. Deze ideeën worden door Floortje en Timo verwerkt.

**Verslag van interview met dr. ir. Sjoerd van der Zee (vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding van de Landbouwuniversiteit Wageningen), gehouden door dr. ir. Timo Heimovaara en drs. Floortje Hanneman MTD op 7 oktober 1997 van 11.00 tot 12.30**

Sjoerd heeft Louise Wipfler gevraagd of zij bereid is om deel te nemen aan de modelleringsactiviteit.

In principe heeft zij toegezegd, maar dit moet nog formeel worden vastgelegd. We hebben Sjoerd uitgelegd wat de (naar aanleiding van vorige interviews) aangepaste opzet van het spel is. Sjoerd heeft een aantal opmerkingen:

- Er is geen objectieve toets waarmee het eindresultaat kan worden beoordeeld.
- Het is niet duidelijk hoe de uiteindelijke mogelijkheden kunnen worden gecombineerd.
- Het is onduidelijk of de resultaten vertaalbaar zullen zijn naar het veld.

Sjoerd maakt deel uit van de vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding. Hierin werkt een aantal mensen aan in-situtechnieken. Meindert Keizer en Sjoerd zelf zijn de vaste medewerkers die op dit gebied werken. Meindert houdt zich bezig met massa-overdracht, chemie en biologie, voornamelijk in het kader van ECOSAT. ECOSAT is een door de LUW ontwikkeld model dat 1D-stroming combineert met geavanceerde chemische processen. Sjoerd houdt zich bezig met vloeistofstroming (die bijvoorbeeld van belang is bij drijfslagen en persluchtinjectie). Volgend jaar neemt hij deel aan een EG-project dat zich richt op vloeistofstroming in combinatie met biologie en chemie. Aan dit project gaat ook een aio werken. Henriëtte Keyzer is aio bij de vakgroep en werkt aan biodegradatie in grondwater. Rink van Dijke is gepromoveerd bij de vakgroep en houdt zich bezig met meefasestroming in het algemeen en MUFIS in het bijzonder. Buiten de vakgroep is er contact met Gosse Schaa, Rulkens en Grotenhuis.

In de vakgroep wordt veel gemodelleerd. De gebruikte modellen worden eigenlijk nooit zelf ontwikkeld. Als basis wordt een model met sourcecode aangeschaft. Dit model wordt vervolgens aangepast voor specifieke problemen. Het programma MT3D wordt – in aangepaste vorm – veel gebruikt. De reden dat programmatuur altijd wordt aangepast, is dat commerciële modellen vaak geen actuele zaken kunnen meenemen: ze lopen altijd achter op de state of the art. De functie van modelleren ligt vooral in het combineren van inzichten. Modellen worden gebruikt om meetgegevens na te rekenen of om conceptuele modellen te bestuderen, bijvoorbeeld om een balans te kunnen opstellen van de verschillende processen en om de invloed van verschillende parameters te kunnen inschatten. Validatie van de modellen gebeurt via testcases en analytische oplossingen.

Er zijn weinig groepen die zich bezighouden met biologische modellering in combinatie met hydrologie. Er wordt wel vrij veel gedaan aan populatiebiologie, een discipline die zeer wiskundig van aard is (zie het tijdschrift *Mathematical Biology*). Sjoerd werkt in EG-verband samen op het gebied van drijfslagen. Hierin worden stroming, transport en het effect van beluchting bestudeerd. In dit kader wordt samengewerkt met München, Noorwegen en Italië. Er zijn ook contacten met de universiteit van Oslo en de landbouwuniversiteit van Aas op het gebied van het transport van tracers in de onverzadigde zone en het transport van anti-vriesmiddelen. Daarnaast wordt er informeel samengewerkt met Majid Hassanizadeh en Hans Bruining van de Technische Universiteit Delft en met Hans van Duijn van het Centrum voor Wiskunde en Informatica. Majid en Hans bestuderen *dense non-aqueous phase liquids* (DNAPL's), terwijl Sjoerd meer naar de LNAPL's kijkt. Sjoerd heeft veel (informele) contacten maar participeert op het moment in weinig projecten waarin daadwerkelijk wordt samengewerkt.



BIJLAGE B

**RAPPORTAGE TNO-NITG**

dr. ir. C.B.M. te Stroet en dr. ir. P. Venema

BIJLAGE C

**RAPPORTAGE GRONDMECHANICA DELFT**

ir. G.J. Mulder en ir. J. Taat  
(Grondmechanica Delft)

BIJLAGE D

**RAPPORTAGE LANDBOUWUNIVERSITEIT WAGENINGEN**

dr. ir. S.T.E.A.M. van der Zee en ir. E.L. Wipfler  
(Bodemhygiëne en Bodemverontreiniging  
Landbouwniversiteit Wageningen)

BIJLAGE E

**RAPPORTAGE TAUW/IWACO**

ir. L. Bakker (Tauw Milieu), drs. F.A. Hanneman MTD (Tauw Milieu),  
ir. M. Heijnen (IWACO), drs. S. Huisman (IWACO)  
en ir. T.F. Praamstra (IWACO)