

Bijlage C I bij sessie Monitoring stabiele eindsituatie  
Hoofdstuk 6 van het rapport BEVER A5: stabiele eindsituatie, d.d. 27 april 2000, TNO—MEP  
projectnummer 30493

## Monitoring van het pluimgedrag

Dit hoofdstuk beschrijft de technisch-inhoudelijke uitwerking van monitoring van de pluim ten behoeve van het vaststellen van een stabiele eindsituatie. Voor een uitgebreide beschrijving van deze materie, waaronder vraagstukken zoals wat te doen bij afwijkingen, waardoor kunnen afwijkingen ontstaan en wie vervullen welke verschillende rollen bij monitoring, wordt verwezen naar het Handboek voor Bodemsaneringstechnieken [6]. De onderstaande tekst is consistent met het Handboek.

### 6.1 Doelen van monitoring

Bij het meten van het gedrag van de verontreinigingspluim in het grondwater zijn twee doelen belangrijk:

- het concentratieverloop in het grondwater van de pluim bepalen;
- de omvang en de stationariteit van de pluim vaststellen.

Er dient te worden vastgesteld in hoeverre het verloop van de grondwater-concentraties overeenstemmen met de verwachting (*verifiërend monitoren*). Neemt de concentratie in de pluim daadwerkelijk af en verloopt de afname voldoende snel om binnen de termijn van 30 jaar een stabiele eindsituatie te bereiken.

Daarnaast is het van belang vast te stellen of de verspreiding van de pluim binnen de perken blijft (*controlerend monitoren*). Als natuurlijke afbraak het dominerende mechanisme is, dient vastgesteld te worden of de pluim groeit, een stationaire omvang heeft bereikt of dat de pluim krimt.

### 6.2 Belangrijke aspecten bij monitoring

Monitoring van een verontreinigingspluim in het grondwater hangt in sterke mate samen met de maatregelen die zijn getroffen, of die juist achterwege zijn gelaten, om de verontreiniging aan te pakken. De in dit hoofdstuk beschreven maatregelen zijn gebaseerd op een aantal inzichten c.q. stellingen van deskundigen, die de huidige perceptie van pluimgedrag en de visie op monitoring het beste beschrijven. Deze inzichten/stellingen zijn:

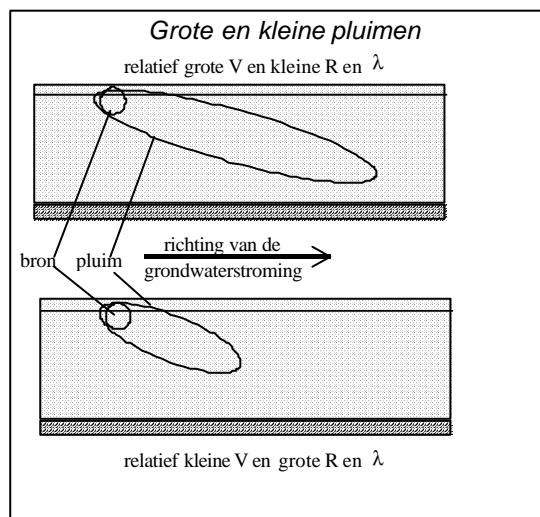
1. *Monitoring dient afgestemd te zijn op het doel.* Het karakteriseren van een pluim vraagt om een andere aanpak dan het vaststellen van de effecten van maatregelen of het vaststellen of de stationaire situatie inmiddels is bereikt.
2. *Monitoring wordt bepaald door het maatgevende transport mechanisme.* Als verdunding en verspreiding de overheersende bodemmechanismen ter plaatse zijn, dient monitoring anders plaats te vinden dan wanneer natuurlijke afbraak domineert.
3. *De exacte concentratieverdeling en de exacte begrenzing van de pluim vaststellen, is niet betaalbaar.* Variatie in bodemeigenschappen en bodemprocessen zorgen voor een grillige verdeling.
4. *Saneringsmaatregelen kunnen worden gebaseerd op algemene karakteristieken van de verontreinigingspluim.* Als voorbeeld kan de ligging van het zwaartepunt en de spreiding rondom het zwaartepunt dienen.
5. *Monitoring en modelvorming zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden.* Vaak wordt in eerste instantie een generieke beschrijving van het transportmechanisme gehanteerd dat geleidelijk, met gebruikmaking van meetresultaten, specifiek(er) wordt gemaakt. Op deze wijze wordt de nauwkeurigheid vergroot.
6. *Bij afbraak spelen meerdere pluimen een rol.* Bij afbraak worden afbraakproducten gevormd en iedere pluim dient afzonderlijk te worden bekeken op bovenstaande aspecten.

Voor meer informatie over de achtergrond van deze stellingen, wordt verwezen naar bijlage 2 waarin een nadere beschouwing staat op de processen en omstandigheden die zorgen voor locale en temporele variaties in concentratie aan verontreinigende stoffen in het grondwater.

### 6.3 Verspreidingsgedrag van bodemverontreiniging

Indien de bronverwijdering niet volledig is, bestaat de restverontreiniging vaak uit een brongebied met concentraties aan verontreinigende stoffen *in mg/kg* bodemmateriaal, en uit een pluim waarin de verontreinigende stoffen *in mg/l* aanwezig zijn, opgelost in het grondwater. De laatste eenheidsmaat is een factor duizend lager dan de eerstgenoemde. Bij een organische verontreiniging bestaat de bron-zone meestal uit een drijflaag (LNAPL) of een zinklaag (DNAPL). Bij het gedrag en de verspreiding van verontreinigingen spelen de volgende transportmechanismen een rol: meevoering met de grondwaterstroming, mechanische dispersie als gevolg van variaties in de gemiddelde grondwaterstroming, adsorptie/desorptie met het vaste bodemmateriaal (retardatie), chemische interactie met andere verbindingen en natuurlijke afbraak onder invloed van micro-organismen. De intensiteit van ieder mechanisme wordt mede bepaald door het aanwezige bodemmateriaal, bijvoorbeeld zand, klei of veen, het organisch koolstofgehalte, de macrochemische omstandigheden zoals pH en redoxpotentiaal, enz..

Als er sprake is van natuurlijke afbraak dan moet rekening worden gehouden met de vorming van afbraakproducten. Vaak zijn daarbij meerdere pluimen aanwezig. Verschillen in mobiliteit en in halfwaardetijd tussen de verschillende afbraakproducten geven onder stationaire omstandigheden verschillen in afstand langs de stroombaan waar het betreffende product wordt aangetroffen. De lengte van de pluim wordt dan ook bepaald door de snelheid waarmee het grondwater door de poriën stroomt (snelheid  $V$ ), de intensiteit waarmee verbindingen reageren met het bodemmateriaal (retardatie  $R$ ) en de snelheid waarmee de verbinding wordt omgezet (de afbraakcoëfficiënt  $\lambda$ ). Zie de onderstaande figuur. Bij afbraak moet er worden gemonitord op stationariteit voor alle tussen-producten uit de afbraakketen tot aan de onschuldige eindproducten (bijvoorbeeld per, tri, cis, VC, etheen, ethaan). Voor het gemak spreken we in dit hoofdstuk verder over pluimgedrag in enkelvoud.



### 6.4 Meten van het verloop van grondwaterconcentraties

#### 6.4.1 Afbraak

Door uitvoering van saneringsmaatregelen behorende bij het toewerken naar een stabiele eindsituatie (bronverwijdering, natuurlijke afbraak bevorderen, etc.) zal de concentratie in de pluim na verloop van tijd afnemen. Direct na de bronverwijdering is de afname in de pluim het eerst te merken vlakbij de bronzone omdat daar de toevoer vanuit de bron afneemt of misschien

zelfs stopt. De afbraak van verontreiniging zal dan groter worden dan aanvoer vanuit de bronzone. De pluim wordt nu als het ware van achteren 'opgegeten'.

#### **6.4.2 Meetlocaties**

Bij het bepalen van de meetlocaties zijn twee uitgangspunten van belang. Allereerst wordt als stelregel gehanteerd dat het gemiddelde gedrag van de (hogere) concentraties in pluim maatgevend is voor het bepalen van het effect van de maatregel en niet het individuele verloop van de concentraties binnen de gehele pluim. Ten tweede zijn de effecten van de heterogeniteit van de bodem en de complexiteit van de transportprocessen vaak niet goed bekend. Daarom wordt aanbevolen met enkele meetlocaties te beginnen. Kies twee of drie locaties langs de lengte-as van de pluim op het gedeelte gelegen tussen de bronzone en het zwaartepunt van de pluim. Voer metingen uit en vul het aantal locaties aan tot dat de ruimtelijke variatie in de meetresultaten niet meer verandert.

#### **6.4.3 Bemonsteringsstrategie**

In plaats van het kiezen van meerdere meetlocaties langs de lengte-as, kan volstaan worden met enkele meetlocaties. In deze bemonsteringspunten wordt nu een groter volume grondwater onttrokken tijdens het bemonsteren. De methode wordt ook wel monitoren met een grotere "support" genoemd. De analyseresultaten zijn dan representatief als gemiddelde waarde voor een groter bodemvolume. Kostenoverwegingen spelen een rol bij het maken van een keuze tussen beide mogelijkheden.

#### **6.4.4 Meetfrequentie**

De periode waarover significante veranderingen worden verwacht, hangt af van de vermindering van de bronsterkte, de afbraak, de stroomsnelheid van het grondwater en de interactie met het vaste bodemmateriaal (retardatie). Binnen deze verwachte periode dienen dan een aantal meettijdstippen vastgesteld te worden. De meetresultaten van ieder meetronde (*ijkmomenten*) worden gebruikt om vast te stellen of de afname voldoende snel verloopt en valt binnen de bandbreedte die verwacht wordt; dit is het *evalueren* van de meetresultaten. Evalueren van de meetresultaten kan leiden tot het vaststellen van de volgende meetronde, tot continuering van de maatregelen, tot intensivering van de maatregelen of tot het beëindigen van de maatregelen als de stabiele eindsituatie is bereikt [3].

## 6.5 Meten van een stationaire pluim

### 6.5.1 Stationariteit

Voor het aantonen van stationariteit is het belangrijk langs de as van de pluim verder te prikken totdat het front van de pluim nauwkeurig is bepaald om vervolgens zo dicht mogelijk nabij het front te meten<sup>1</sup>. Het front heeft een drie-dimensionale vorm. Kortom behalve verspreiding in de horizontale richting is ook verspreiding in de diepte van belang. In beide richtingen kan de concentratie over enkele meters afstand sterk variëren.

Bij natuurlijke afbraak van verontreiniging kan sprake zijn van een groeiende pluim, een stationaire pluim en een terugtrekkende pluim. Bij een groeiende pluim nemen de concentraties in de pluim toe met de tijd. Uiteindelijk bereiken de concentraties een maximum waarde. Als in een meetpunt de maximale waarde bereikt is, is op dat moment het front van de pluim deze meetlocatie gepasseerd.

### 6.5.2 Meetlocaties

Om stationariteit vast te stellen moet derhalve zo dicht mogelijk nabij het front worden gemeten. Nu wordt als stelregel gehanteerd dat het gemiddelde gedrag van het front van de pluim moet worden gecheckt en niet het individuele verloop van de concentraties. Het gevolg is dat metingen op meerdere locaties en op meerdere diepten moeten worden uitgevoerd; er wordt als het ware een “vangnet” voor de pluim gehangen. De mazen van het “vangnet” worden bepaald door de heterogeniteit van de bodem en het gedrag en transport van de verontreiniging. Een pragmatische benadering kan dan gevormd worden door op basis van het conceptuele model met een ‘grof’ net te beginnen. Meetresultaten worden vervolgens gebruikt om het te verfijnen/aan te vullen tot dat de variatie in de metingen niet meer verandert.

### 6.5.3 Bemonsteringsstrategie

Evenals bij het meten van het concentratieverloop, is ook bij het bepalen van omvang en stationariteit van de pluim de hoeveelheid water die voor de meting onttrokken wordt, een belangrijk aspect. Een alternatief voor het “vangnet” kan zijn om bij enkele meetlocaties een groter volume grondwater te onttrekken tijdens het bemonsteren. De analyseresultaten worden hierbij representatief geacht als gemiddelde waarde voor een groter bodemvolume. Kostenoverwegingen bepalen de keuze. De hoeveelheid water, die wordt onttrokken, mag vanzelfsprekend niet zo groot zijn dat het de stroming gaat substantieel gaan beïnvloeden. Optimalisatie van kosten kan worden bereikt door te variëren in aantal locaties en de grootte van de “support” in de locatie.

### 6.5.4 Meetfrequentie

Hoe lang gemeten moet worden alvorens de pluim stationair is, hangt uiteraard af van de afstand tot het front, de afbraaksnelheid en de snelheid van de grondwaterstroming. De laatste is vaak klein (minder dan 10 meter per jaar) zodat er lang gemeten moet worden. En dan is er nog geen zekerheid of de situatie stationair blijft omdat macro-chemische condities kunnen wijzigen; raken de voedingsstoffen op, die mede nodig zijn voor afbraak, dan zal de pluim weer gaan groeien. Het gevolg is dat gedurende een langere periode gemeten moet blijven worden. De meetfrequentie hangt af van de snelheid van verspreiding.

---

<sup>1</sup> Aangezien we de pluim van de verontreinigingen willen karteren en het dus nog niet om permanente monitoring gaat, is het wellicht rendabel om een wegdrukbaar systeem te gebruiken. Hiermee kan tevens op één locatie op meerdere diepten monsters worden genomen. Tijdens de veldwerkzaamheden blijkt vaak dat de ligging van de pluim net even anders is dan (op grond van het conceptuele model) was verwacht. Het is daarom verstandig een aanvullende locatie voor monsterpunten vast te stellen op basis van de eerdere meetgegevens. Dit laatste betekent een voorkeur voor *on-site* analyseren.

## 6.6 Een mogelijke pragmatische invulling van de monitoringstrategie

In deze paragraaf wordt een *mogelijke* vertaling van de eerder gegeven uitleg gegeven. De volgende drie stappen, met verschillende monitoringsdoelstellingen, worden daartoe nader uitgewerkt:

- *karakteriseren* van de pluim
- bepalen van het concentratieverloop in het grondwater (*verifiërend monitoren*)
- bepalen van het stationair zijn van de pluim (*controlerend monitoren*)

Bij alle drie de stappen wordt gebruik gemaakt van de wisselwerking tussen het conceptuele model en het meten in het veld.

### 6.6.1 Karakteriseren van de pluim

Bepaal de afbraakcoëfficiënt aan de hand van beschikbare historische meetgegevens, de toepassing van rekenmodellen of aanvullende laboratorium of veldgegevens [7]. Maak vervolgens gebruik van het conceptuele model om *het front* en *het zwaartepunt* van de verontreinigingspluim te bepalen.

- Schat de ligging van *het front* op basis van het gedrag en transport van de verontreiniging. Hiervoor kunnen eenvoudige analytische oplossingen worden gehanteerd (bijvoorbeeld met programma's als AT123D of CXTFIT).
- Schat de ligging van *het zwaartepunt* met gebruikmaking van eenvoudige analytische oplossingen (AT123D of CXTFIT). Voor een ééndimensionale benadering van de verspreiding langs een stroombaan met poriewatersnelheid  $V$  (m/jaar), retardatiefactor  $R$  en eerste orde afbraakcoëfficiënt  $\lambda$  (1/jaar) geldt voor de ligging van het zwaartepunt van de stationaire pluim, bij afbraak als maatgevend transportmechanisme,  $x_1 = V/(R \lambda)$ . Voor een niet-stationaire pluim kan 0,1 (tot 0,5) maal de afstand tot het front als schatting genomen kunnen worden.

Ga vervolgens de lengte van de pluim karteren:

1. Start met vier tot zes locaties verdeeld over de lengte-as van de pluim. Begin bij het geschatte zwaartepunt tot voorbij het geschatte front van de pluim. Houdt hierbij rekening met het uitwijken van de pluim naar de diepte door eventueel op verschillende diepten te bemonsteren.
2. Indien vastgesteld is dat het front zich tussen twee meetlocaties bevindt, kan eventueel met een tweede meetronde worden ingezoomd door tussen de beide meetlocaties nieuwe locaties te plaatsen. De ligging en de steilheid van het front wordt dan nauwkeuriger vastgesteld.

Uiteraard is het zo dat als in een eerder stadium de ligging en de grootte van de pluim, en dus ook de ligging van het front, al voldoende gekarakteriseerd is, voorgaande stap(pen) kunnen worden overgeslagen.

### 6.6.2 Meten van concentratieverloop

Ten behoeve van het meten van gevolgen van (bron)maatregelen worden de volgende stappen voorgesteld:

1. Bemonster eenmalig op meerdere locaties en meerdere diepten in het gedeelte van de verontreinigingspluim *gelegen tussen bron en zwaartepunt*. Kies hier bijvoorbeeld twee dwarsraaien (transecten) loodrecht op de as van de verontreinigingspluim. Kies vervolgens drie bemonsteringslocaties op iedere dwarsraai en selecteer drie bemonsteringsdiepten voor iedere locatie.
2. Als reeds voldoende informatie over *de pluim tussen de bron en het zwaartepunt* beschikbaar is uit het eerdere karakterisatie onderzoek, dan kan de voorgaande stap worden overgeslagen.

3. Bepaal in hoeverre met een gering aantal locaties, bijvoorbeeld één of twee, een beeld gevormd kan worden van het pluimgedrag; dit hangt af van de spreiding in het concentratiebeeld dat in de vorige stap is verkregen. Indien de concentratiemetingen uit stap 1 een zeer wisselvallig beeld geven is het aan te bevelen eerst een beter beeld te verkrijgen door met het conceptuele model eerst vast te stellen welke transportprocessen deze variatie bepalen en aansluitend vast te stellen op welke wijze gemonitord moet worden. Indien slechts één meetlocatie wordt gekozen, dan moet deze dicht bij de bron liggen. Indien meerdere meetlocaties worden gekozen mogen de locaties meer verspreid worden in de richting van het zwaartepunt.
4. Stel de ontwikkeling van de concentratie in de tijd vast op de gekozen locaties. Hiervoor zijn meerdere meetronden nodig. Een richtfrequentie kan zijn één (à twee) maal per jaar. Toets de frequentie aan de verwachte snelheden waarmee processen verlopen (stroming, afbraak, etc.). Als de processen sneller of trager verlopen, is het aan te bevelen de frequentie te verhogen of te verlagen.
5. Vergelijk de meetresultaten met de verwachting gebaseerd op het conceptuele model (*evalueren*). Stuur eventueel bij. Bijsturing kan betekenen een verandering van meetfrequentie, een intensivering of een extensivering van de maatregelen of het beëindigen van de fysieke maatregelen als een stabiele eindsituatie is bereikt. De resultaten van de *evaluatie* dienen te worden teruggekoppeld met het bevoegde gezag.

### 6.6.3 Meten van het stationair zijn van de pluim

Ten behoeve van het meten van het stationair zijn van de verontreinigingspluim worden de volgende stappen voorgesteld:

1. Bemonster eenmalig op meerdere locaties en meerdere diepten in het gedeelte van de verontreinigingspluim *gelegen nabij het front*. Kies hier bijvoorbeeld één of twee dwarsraaien (transecten) loodrecht op de as van de verontreinigingspluim. Kies vervolgens drie bemonsteringslocaties op iedere dwarsraai en selecteer drie bemonsteringsdiepten voor iedere locatie.
2. Als reeds voldoende informatie over de concentratieverdeling *nabij het front van de pluim* beschikbaar is uit het eerdere karakterisatie onderzoek, dan kan de voorgaande stap worden overgeslagen.
3. Bepaal met het conceptuele model en de spreiding van het concentratiebeeld uit stap 1 of met één à twee locaties een beeld gevormd kan worden van de concentratieontwikkeling nabij front. Indien de concentratiemetingen uit stap 1 een zeer wisselend beeld geven, stel dan eerst vast welke transportprocessen deze variatie veroorzaken en aansluitend de wijze waarop gemonitord moet worden.
4. Stel de ontwikkeling van de concentratie in de tijd vast op de gekozen locaties. Hiervoor zijn meerdere meetronden nodig. Een richtfrequentie kan zijn één (à twee) maal per jaar. Toets de frequentie aan de verwachte snelheden waarmee processen verlopen (stroming, afbraak, etc.). Als de processen sneller of trager verlopen, is het aan te bevelen de frequentie te verhogen of te verlagen.
5. Vergelijk de meetresultaten met de verwachting gebaseerd op het conceptuele model (*evalueren*). Stuur eventueel bij. Bijsturing kan betekenen een verandering van meetfrequentie, een intensivering of een extensivering van de maatregelen of het beëindigen van de fysieke maatregelen als een stabiele eindsituatie is bereikt. De resultaten van de *evaluatie* dienen te worden teruggekoppeld met het bevoegde gezag.

De nauwkeurigheid kan ook worden vergroot door de meetresultaten in de Stappen 1 tot en met 3 te gebruiken in combinatie met een uitgebreider (numeriek) model dan de conceptuele modelbeschrijving zoals die is gebruikt bij de beschrijving van de pluimkarakteristieken. Indien de voorspelde resultaten met het (numerieke) model overeenkomen met gemeten concentraties, kan een betrouwbaardere voorspelling worden gegeven van de ontwikkeling van de pluim in de toekomst. Met de verwachte resultaten kan vervolgens een monitoringsysteem op maat worden ontworpen.

Bijlage C.2 bij sessie Monitoring stabiele eindsituatie  
Bijlage 2 uit rapport BEVER A5: stabiele eindsituatie, d.d. 27 april 2000, TNO-MEP  
projectnummer 30493

## Bijlage 2

### Nuanceringen bij conclusies van meetresultaten

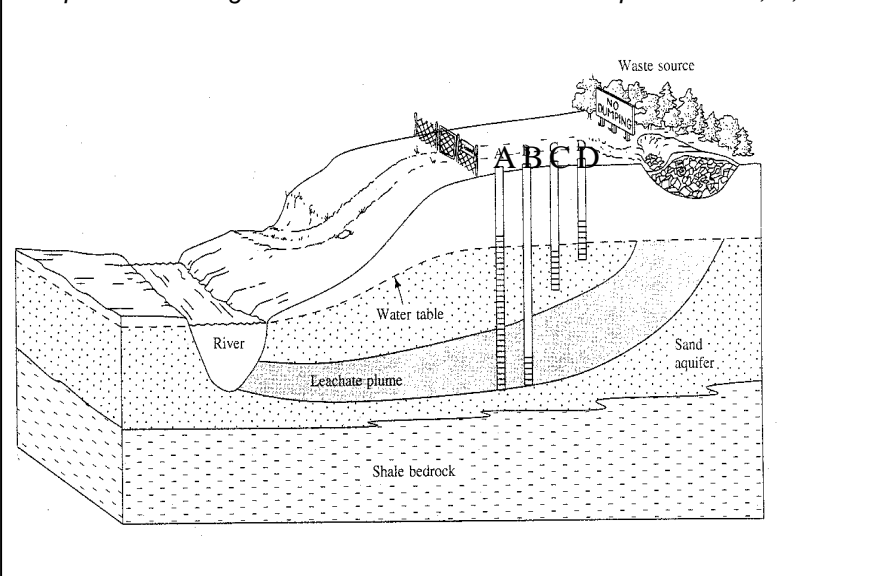
Meetresultaten dienen in alle gevallen te leiden tot het trekken van conclusies over het gedrag en de verspreiding van verontreinigende stoffen. De ondergrond is evenwel complex en de processen die zich er in afspelen zijn vaak niet eenduidig interpreteerbaar. Het is dan van belang te letten op 'valkuilen' die aanwezig kunnen zijn. In deze bijlage worden er enkele van belicht.

### Verwijderingsprocessen

Zoals in hoofdstuk 6 is besproken, is bij een stationaire pluim de aanvoer van de verontreiniging vanuit het brongebied praktisch gelijk aan de massa die uit de pluim verdwijnt. Verwijdering van massa kan plaatsvinden door:

- bronverwijdering;
- onopzettelijke onttrekkingen of oppervlaktewatersystemen (zie onderstaande figuur);
- een actief saneringssysteem van onttrekkingsputten of een bioscherm;
- micro-organismen in de bodem.

*Een pluim afkomstig van een vuilstortlokatie met vier peilbuizen A, B, C en D*

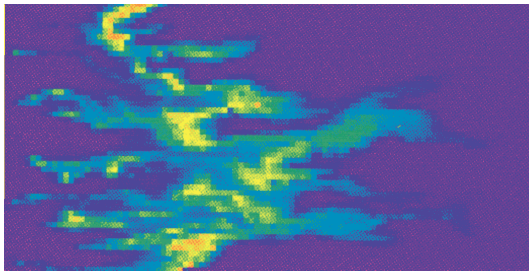


Voor de eerste categorie dient bekeken te worden of dit een acceptabele situatie is. Bij monitoring van de tweede categorie ligt het voor de hand om stroomafwaarts van de bron het grondwater te bemonsteren; eventueel aangevuld met bemonstering van het grondwater in de pluim indien het systeem een sanerende werking dient te hebben en de concentraties derhalve af moeten nemen. Monitoring als verificatie van de werking van biologische afbraak is lastiger te ontwerpen.

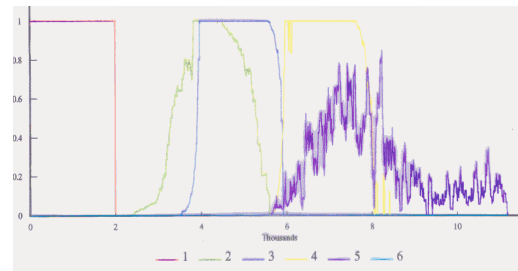
## Presenteren van concentratieverdeling door contourlijnen

Bij het bepalen van de aard en omvang van een bodemverontreiniging zijn we gewend te denken in lijnen van gelijke concentraties (contourlijnen). Meestal worden als contourlijnen de interventie- en/of streefwaarde gebruikt. Vaak worden ze als gladde lijnen gepresenteerd die, met wat in- of uitstulpingen, een nette afbakening van de pluim pretenderen. Een bijbehorende doorbraakcurve van de concentratie tegen de tijd voor een bepaald punt in de pluim is dan ook een geleidelijk stijgende lijn tot een maximale waarde behorende bij die locatie. De werkelijkheid is echter veel grilliger door de invloed van heterogeniteit in de bodem en het complexe verloop van de geochemische en biologische processen. Een voorbeeld van een meer realistische pluim is weergegeven in de onderstaande figuur (linkerafbeelding).

De rechterafbeelding geeft de bijbehorende doorbraakcurven weer langs vijf punten op een rechte lijn. Uit de figuur valt af te leiden dat het niet altijd zo zal zijn dat in punten gelegen op een lijn langs de as van de pluim de doorbraakcurven een steeds grotere dispersie, en dus afnemende concentraties vertonen. Pluimen kunnen zich eerst verspreiden en vervolgens weer convergeren naar de meer oorspronkelijke blokvorm van de verontreiniging. We zien dan ook dat een 'blokvorm' vervormt tot een dispersief front, daarna weer terugkomt tot een 'blokvorm' om vervolgens steeds meer een dispersie karakter te gaan vertonen.



*Realistisch beeld van het voorkomen van een pluim*



*Doorbraakcurven in vijf opeenvolgende meetlocaties (conservatieve tracer)*

Bovenstaande maakt dat concentraties in punten gelegen op korte afstand van elkaar sterk kunnen verschillen. Dit heeft tot gevolg dat het bepalen van de exacte concentratieverdeling en de exacte begrenzing van de pluim niet kosteneffectief mogelijk is. Wel kunnen de karakteristieken van de pluim, bijvoorbeeld de ligging van het zwaartepunt, gebruikt worden. Deze karakteristieken zeggen voldoende over de tijd- en volumegemiddelde eigenschappen van de pluim.

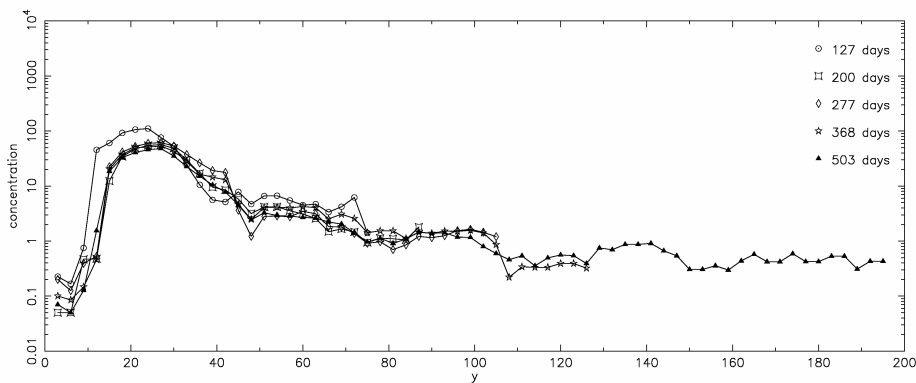
## Zinvol monitoren in relatie tot werkelijke concentraties

Het in detail uitkarteren van de pluim is gelukkig meestal niet nodig om verantwoord te kunnen saneren. Waar het namelijk om gaat is het aangeven van het verspreidingsgedrag van de pluim en de effecten van getroffen maatregelen, bijvoorbeeld verwijdering van de bron. In eerste instantie is het belangrijk om vast te stellen of de pluim groeit, of de pluim krimpt of dat ze stationair blijft; anders gezegd neemt de massa toe, neemt ze af of blijft ze gelijk. Dit kan worden beantwoord door het verloop van concentraties op strategische punten in de tijd te bepalen (indien concentraties worden geïntegreerd over het oppervlak van de pluim verkrijgen we de massa; dus concentratieverloop zeggen impliciet iets over het massaverloop in de tijd wat we eigenlijk willen weten). Indien de ligging van het zwaartepunt en de spreiding van de pluim uit de gemeten concentraties kunnen worden beschreven, dan ligt grosso modo de situatie vast en kan worden aangegeven of de pluim stationair is door deze twee variabelen in de tijd te volgen. Als de pluim stationair is, biedt de aanpak perspectief als er verder geen kwetsbaar object bedreigd wordt.

### Bepaling van natuurlijke afbraak in het veld

Een vaak verondersteld alternatief is dat de afbraak bepaald kan worden uit de maximale waarden van de doorbraakcurven langs de as van de pluim. Deze nemen namelijk af bij toenemende afstand vanaf de bron. Indien de afname van deze maximale concentraties significant is te bepalen, dan kan hieruit een afbraakconstante worden afgeleid wanneer aangenomen wordt dat afbraak het dominante mechanisme is. Met gebruikmaking van de afbraakconstante kan vervolgens het transportgedrag worden beschreven en de mate van stationariteit worden voorspeld of ingeschat.

Een valkuil bij deze methodiek is dat andere transportmechanismen zoals niet-evenwichtssorptie of dispersie, als gevolg van een zeer sterk heterogene bodem van zand en kleilensjes, hetzelfde gedrag in concentratieverloop over de lengte van de as van de pluim vertoont (zie onderstaande figuur). Indien de afbraak wordt afgeleid uit een momentopname is het derhalve zeer belangrijk dat met zekerheid vaststaat dat afbraak het dominante mechanisme is in de pluim.



Figuur B.4 Concentratieverloop over de lengte-as van een gemeten pluim (> 10.000 metingen) van een conservatieve tracer (Bromide) in een zeer sterk heterogene aquifer op vijf verschillende tijdstippen (Made-site U.S.A.).

Bijlage C.3 bij sessie Monitoring Stabiele eindsituatie  
Hoofdstuk 9.2 en 9.3 van rapport BEVER A5: stabiele eindsituatie, d.d. 27 april 2000, TNO-MEP  
projectnummer 30493

## 9.1 Kennisleemte aanpakken

In het voorafgaande zijn een aantal begrippen geformuleerd en uitgewerkt. De belangrijkste zijn:

- stabiele eindsituatie;
- bronverwijdering;
- kosteneffectiviteit;
- ijkmomenten en monitoring;
- stationaire situatie.

Van geen van bovenstaande begrippen staat onomstotelijk vast hoe ze gemeten (stabiele eindsituatie, stationaire situatie), afgewogen (bronverwijdering, kosteneffectiviteit) en vastgesteld (30 jaar, ijkmomenten) moeten worden. De hoofdstukken 3 tot en met 7 beschrijven een aantal voorstellen waarmee, indien wenselijk, de uitvoeringspraktijk vrij snel aan de slag zou kunnen. Voor de korte termijn kan daarmee aan de grootste behoefte naar praktische instrumenten worden voldaan onder het motto: roeien met de riemen die we hebben. Maar voor de middellange toekomst zal het naar verwachting niet toereikend zijn.

Om voldoende vooruitgang te blijven boeken is het noodzakelijk dat er vervolgstudies worden uitgevoerd. De belangrijkste onderwerpen daarbij zijn:

- Risico's ondergrond: wat achten we acceptabel in de ondergrond, en
- Kosteneffectiviteit: wat hebben we over voor het saneren van diepere verontreinigingen.

Naast studies en onderzoeken die hierover opgezet kunnen en moeten worden, is het van groot belang om aan de slag te gaan om nieuwe ervaringen op te doen. Aldus vindt een proces van leren en verbeteren plaats.

## 9.2 Inventarisatie van kennisvragen

Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste gesignaleerde kennisvragen. Zij kunnen naar hun aard nader onderverdeeld worden in:

- 1) natuurwetenschappelijke vragen en leemten waarvoor fundamenteel strategisch onderzoek noodzakelijk is (bijvoorbeeld: onderzoek naar de processen op het grens gebied tussen bodemsysteem en oppervlaktewater);
- 2) technische vragen waarvoor praktijk gericht onderzoek noodzakelijk is (bijvoorbeeld: hoe pragmatisch en verantwoord de verspreiding van de pluim te monitoren);

Beide typen vragen bevatten naast hun inhoudelijke kant, ook beleidsmatige aspecten en maatschappelijke relevantie.

De kennisvragen 9.3.1. tot en met 9.3. 8. kunnen gerekend worden tot de eerste categorie van fundamentele onderzoeksvragen. Bij 9.3.9. tot en met 9.3.15. gaat het om vraagstukken van technisch-inhoudelijke aard.

### 9.2.1 Hoe duurzaam is een “stationaire” situatie?

Een stationaire situatie houdt in dat de verwijderingsprocessen van de verontreiniging gelijke tred houden met de toevoer vanuit de restverontreiniging waardoor de pluim op zijn plek blijft.

Afhankelijk van de processen die bijdragen aan de verwijdering, is het mogelijk dat de snelheid van verwijdering afneemt of op termijn zelfs helemaal stopt. Als voorbeeld kan worden genoemd dat de mogelijkheid van de bodem om gechloreerde koolwaterstoffen anaeroob (reductief) af te breken sterk afhangt van de hoeveelheid beschikbare koolstof. Wanneer deze koolstof (bijvoorbeeld opgelost organische koolstof, DOC of co-verontreinigingen zoals BTEX) opdraait, komt ook de afbraak van de gechloreerde verbindingen stil te liggen en vindt mogelijk een verdere verspreiding plaats. Ook veranderingen in pH waardoor zware metalen opeens mobiel worden en veranderingen in beluchting waardoor BTEX langzamer worden afgebroken, hebben gevolgen voor de duurzaamheid van de verwijderingsprocessen in de bodem. Daarnaast kunnen veranderingen in bodemgebruik zoals veranderingen in grondwater stromingssnelheid en - richting door extra onttrekkingen of door ontgravingen en werken, de duurzaamheid van de verwijderingsprocessen negatief beïnvloeden.

*Deze kennisleemte met betrekking tot duurzaamheid is een sterk argument om zoveel mogelijk vracht te verwijderen.*

### **9.2.2 Hoe verloopt de interactie tussen bron en pluim, en wat is het effect van ingrijpen hierin?**

De bodemverontreinigingsgevallen waar dit rapport zich op richt zijn meer dan tien jaar oud (de gevallen van vóór 1987). Er is een bepaalde evenwichtssituatie ontstaan, waarbij de voeding vanuit de bron min of meer constant is in de tijd. Indien nu door bronverwijdering of door grondwateronttrekking hierop wordt ingegrepen zal deze situatie zich wijzigen. Wat zijn daarbij de belangrijkste processen en effecten? Hoe effectief is een bronmaatregel ten aanzien van reductie van de flux? Wat gebeurt er precies wanneer we ingrijpen in de verontreinigingssituatie in de ondergrond?

### **9.2.3 Welke processen dragen bij aan de verwijdering van verontreinigingen uit de bodem?**

Hoewel de laatste tijd vooral “natuurlijke afbraak” veel aandacht krijgt is dit niet het enige verwijderingsproces voor verontreinigingen uit de bodem. Als andere voorbeelden van (mogelijk) permanente verwijdering uit het bodemsysteem kunnen worden genoemd:

- De permanente vastlegging van PAK en AZO verbindingen aan bijvoorbeeld humus,
- De vervluchtiging van stoffen naar de atmosfeer,
- De sorptie aan anorganische verbindingen van zware metalen.

### **9.2.4 Welke processen bepalen het “stationair” worden van pluimen met zware metalen?**

In principe kunnen ook pluimen met zware metalen of andere anorganische verbindingen (arseen, cyanide, nitraat, chloride) stationair worden zodra de vastleggingsprocessen in evenwicht zijn met de toevoer vanuit de restverontreiniging. Echter, met betrekking tot zware metalen is het begrip “irreversibele” vastlegging niet wetenschappelijk onderbouwd en/of praktisch gedefinieerd. Een irreversibele vastlegging hangt af van bodemcondities (zuurstofvoorziening, pH, organisch stof gehalte) en van het (toekomstig) bodemgebruik. De effecten van (variabele) bodemkarakteristieken op de vastlegging is in de praktijk onvoldoende uitgezocht.

### **9.2.5 Wat is het maximaal toelaatbaar risico van grondwater-verontreiniging in de diepere ondergrond?**

Indien het grondwater verontreinigd is worden de organismen in de ondergrond per definitie eraan blootgesteld. Wat is hierbij het maximaal toelaatbaar risico?

Natuurlijke afbraak door micro-organismen is een belangrijk onderdeel van het gedachtegoed dat ten grondslag ligt aan *stabiele eindsituatie*. Impliciet wordt daarbij een verschuiving van de balans in het ondergrondse ecosysteem juist geaccepteerd. Sterker nog: het zou misschien zelfs moeten worden toegejuicht. Dankzij de natuurlijke selectie immers krijgen de organismen die wel bestand zijn tegen de verontreiniging, en die hun metabolisme erop kunnen aanpassen, extra kans. Dit zijn de organismen die voor de natuurlijke afbraak zorgen.

### **9.2.6 Wat is de interactie tussen bodemsysteem en oppervlakte water?**

Indien een verontreiniging via het grondwater richting het oppervlaktewater wordt getransporteerd kan dit “nieuwe” mogelijkheden scheppen. Mogelijkerwijs worden bepaalde stoffen die in de bodem slecht afbreekbaar zijn in het grensvlak tussen bodem en oppervlakte water wel goed afgebroken. Met name op grensvlakken sediment –water of oeverzones zijn zeer dynamische omstandigheden aanwezig met steile gradiënten in bijvoorbeeld concentraties (zuurstof, pH).

### **9.2.7 Hoe beïnvloedt een “immobiele” stof in de bovengrond de kwaliteit van de ondergrond?**

De effecten van de bovengrond op de ondergrond zijn onvoldoende uitgezocht. Stoffen die “immobiel” in de bovengrond aanwezig zijn en vallen onder bodemgebruikswaarden kunnen bij verandering van milieu omstandigheden of bodemgebruik alsnog mobiel worden en in de ondergrond belanden.

### **9.2.8 Hoe beïnvloedt de ondergrond de kwaliteit van de bovengrond?**

In de ondergrond aanwezige of gevormde vluchtige verbindingen kunnen door verdamping in de bovengrond en atmosfeer terecht komen. Het gedrag van deze vluchtige verbindingen in de onverzadigde zone (effect grondwater fluctuaties, lateraal transport) is onvoldoende uitgezocht. Daarnaast is onvoldoende inzicht in de verwijderingsprocessen zoals afbraak die op kunnen treden tijdens het transport van de verbindingen door de onverzadigde zone.

### **9.2.9 Hoe dient monitoring plaats te vinden?**

Momenteel worden verontreinigingen niet gedurende langere tijd gemonitord. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat meestal wordt gekozen voor relatief snelle en intensieve saneringsmaatregelen die binnen een tijdsbestek van enkele jaren worden afgerond. Uitzonderingen hierop zijn stortplaatsen en locaties waar is gekozen voor IBC maatregelen. De noodzaak van een langdurige monitoring die uit kan lopen tot circa 30 jaar, vraagt nieuw te ontwikkelen snelle, goedkope betrouwbare meettechnieken. Gedacht kan worden aan het verder ontwikkelen van recent ontwikkelde *insitu* meetmethoden (sensoren) waarbij aflezing automatisch en zo mogelijk op afstand kan plaats vinden.

### **9.2.10 Welke metingen dienen op de “ijkmomenten” plaats te vinden?**

Om het gedrag van een verontreiniging in beeld te brengen wordt momenteel volstaan met het uitvoeren van puntmetingen aan concentraties die zowel in ruimte als in tijd een beperkt inzicht geven. Bij het interpreteren van deze metingen moet rekening worden gehouden dat (sterke) variaties kunnen plaats vinden op ruimtelijke en temporele schaal. Hiervoor zijn in principe twee oplossingen mogelijk:

- het opvoeren van het aantal metingen qua frequentie en qua dichtheid van het meetnet,
- het geïntegreerd uitvoeren van metingen met bijvoorbeeld bemonsteringen met een groter onttrekkingsdebiet gedurende een bepaalde periode.

De haalbaarheid en wenselijkheid van beide meetstrategieën zou beter in kaart moeten worden gebracht.

### **9.2.11 Welke factoren bepalen de frequentie van de “ijkmomenten”?**

Er zijn geen duidelijke handvatten die aangeven hoe vaak in het veld gemeten moet worden om het gedrag van een verontreiniging te volgen. De frequentie zal afhangen van de snelheid van de processen. Mogelijk kan door een modellering uit te voeren een indruk worden verkregen over een zinvolle meetfrequentie. Indien er een balans is tussen verspreiding en afbraak van een verontreiniging, is het bijvoorbeeld voor de hand liggend dat de pluim de komende decennia op zijn plek blijft en niet groeit of krimpt. Hoe lang duurt deze periode en wanneer zijn er veranderingen te verwachten?

### **9.2.12 Hoe bepaal je of een situatie stationair is?**

Hiervoor bestaan nog geen goede methoden. Stilstand is moeilijker door meten vast te stellen dan beweging. Puntmetingen kunnen door ruimtelijke en temporele variaties een vertekend beeld geven. De bruikbaarheid van pompproeven waarmee fluxmetingen op verschillende posities in de pluim kunnen worden uitgevoerd zou op praktische bruikbaarheid moeten worden onderzocht.

### **9.2.13 Hoe kunnen de mogelijkheden van de bodem om verontreinigingen af te breken in kaart worden gebracht?**

Om de mogelijkheden van de bodem aan te geven voor natuurlijke afbraak in relatie tot bodem karakteristieken en verontreiniging is het ontwikkelen van “bodempotentiekaarten” zinvol als beheers- en planningsinstrument. Voor dit type kaarten moeten de wetenschappelijke kennis, de ervaringsgegevens van de adviesbureaus en de al in kaart gebrachte bodemkarakteristieken op een logische en bruikbare wijze worden gekoppeld.

### **9.2.14 Nut en noodzaak van een ‘ecologische hoofdstructuur’ voor grondwater**

Het valt te overwegen om bij de grondwaterbescherming een soort ecologische hoofdstructuur voor grondwater te definiëren: binnen deze ecologische hoofdstructuur heeft het begrip “kosteneffectief” een andere lading dan daarbuiten. Binnen de ecologische hoofdstructuur moet men verder gaan met het verwijderen van vracht en dus tegen hogere kosten dan daarbuiten.

#### **9.2.15 Omgaan met onzekerheid**

Met het nieuwe beleid blijven verontreinigingen voor langere tijd aanwezig in het bodemsysteem. Veelal worden extensieve technieken ingezet die geleidelijk, over een periode van meerdere jaren, de verontreiniging verwijderen. De kennis van de ondergrond is echter beperkt. Er kan slechts een beperkt beeld van de ondergrond worden gevormd. Bij het ontwerpen van maatregelen zijn dan ook methoden en technieken nodig om gestructureerd om te gaan met onzekerheid.