

RIJKSINSTITUUT VOOR
VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU
BILTHOVEN

Rapport nr. 715201006

Tracerexperiment uitgevoerd in april/mei 1996
ten behoeve van de
In situ biorestauratie te Asten

A.J. Scheuter

september 1997

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht en ten laste van het Directoraat-Generaal Milieubeheer, Directie Bodem (opdrachtbrieven DGM1264259 en DGM3004265, dd 12/10/1984 en DGM12691025, dd 26/09/1991), projectnummer 715201 (eerder projectnummer 715202).

VERZENDLIJST

1 t/m 4	Directeur van de directie Bodem - mr. A.B. Holtkamp
5	plv. Directeur-Generaal Milieubeheer - dr.ir. B.C.J. Zoeteman
6 t/m 10	Dhr. R.E. Bol, Mobil Oil B.V.
11 t/m 13	Ing. J.J.M. Baltussen, Iwaco
14	Ing. J. Smittenberg, Iwaco
15	Ir. W. van de Kerkhof, Miltop
16	Dhr. H.J.J. Lucius, Heijmans Milieutechniek B.V.
17	Mw. M. Akkers, Heijmans Milieutechniek B.V.
18	Dhr. Stilkenboom, Milieutechniek 2000
19	Ir. D.H. Eikelboom, TNO-IMW
20	Ing. A. van Lier, Gemeenschappelijke Technische Dienst O-Brabant
21	Dr. D. Janssen, R.U. Groningen afdeling Biochemie
22 t/m 24	Ing. A. Glissenaar, Interlox Chemie B.V.
25	Dhr. W. van Eck, Gemeente Asten
26	Ir. F.A.M. Swinkels, Inspectie Milieuhygiëne Eindhoven
27	Ing. T.P.J. van Lamoen, PWS Noord-Brabant
28 t/m 32	P. Banens, Provincie Noord-Brabant
33	Drs. G. Krajenbrink, Stichting Waterleidinglaboratorium Oost
34	Depot Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie
35	Directie RIVM
36	Ir. F. Langeweg
37	Dr. H.A. van 't Klooster
38	Ir. E.R. Soczo
39	Dr.ir. F.A. Swartjes
40	Mw.ir. H. van de Weerd
41	Auteur
42 t/m 47	Afdelingshoofden LBG
48	Bureau Projecten- en Rapportenregistratie
49	Hoofd Bureau Voorlichting en Public Relations
50	RIVM bibliotheek
51 t/m 61	Reserve ten behoeve van Bureau Rapportenbeheer

INHOUDSOPGAVE

VERZENDLIJST	2
LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	4
SUMMARY	5
SAMENVATTING	6
1 INLEIDING	7
2 MATERIALEN EN METHODE	8
2.1 Locatie	8
2.2 Tracer	8
2.3 Monstername	8
2.4 Monsteranalyse	8
3 DOSERING CHLORIDE	10
3.1 Geen dispersie	10
3.2 Dispersie bij eendimensionale stroming	11
4 UITVOERING EXPERIMENT	14
5 RESULTATEN	16
5.1 Begin concentratieverhoging	16
5.2 Doorbraak	17
5.3 Afzonderlijke debieten	18
5.4 Aandeel infiltratiewater in opgepompt water	19
5.5 Berekening stroombanen	20
5.5.1 Resultaten	20
5.5.2 Bepaling invloedssfeer onttrekkingen uit resultaten	23
6 DISCUSSIE	24
6.1 Koppeling met resultaten reiniging	25
6.1.1 Waarnemingsfilters E, K en H	26
6.1.2 Waarnemingsfilters I en A	26
6.1.3 Waarnemingsfilter B	27
6.1.4 Bodem	28
7 CONCLUSIES	30
LITERATUUR	31
BIJLAGE 1 Overzicht locatie	32
BIJLAGE 2 Resultaten tracerexperiment	33
BIJLAGE 3 Overzichtstabel resultaten	35
BIJLAGE 4 Theorie simulaties	36
BIJLAGE 5 Berekening stroombanen tijdens sanering	39
BIJLAGE 6 Invloedssferen van de onttrekkingen zoals volgt uit de metingen	41

LIJST VAN TABELLEN

Tab.nr.	Titel	Pag.
1	Tijdsduur vanaf moment dat concentratie gaat oplopen tot doorbraak.	17
2	Het gemiddelde debiet, Φ_i , per filter gedurende het tracerexperiment.	18
3	Het aandeel van het geïnfiltreerde water in het opgepompte water bepaald uit de chlorideconcentratie bij doorbraak, met de ligging van de onttrekking op de locatie.	19
b1	Overzicht resultaten tracerexperiment voor de verschillende onttrekkingen.	35

LIJST VAN FIGUREN

Fig.nr.	Titel	Pag.
1	Maximale concentratie die in de onttrekkingsfilters gemeten kan worden als functie van de doseringstijd.	13
2	Infiltratie- en onttrekkingsdebiet ten tijde van het tracerexperiment.	15
3	Stroombanen rondom de onttrekkingen ten tijde van het tracerexperiment.	21
4a,b	Verloop benzine-gehaltenes als functie van de tijd in de waarnemingspunten in het midden van de locatie (Z1, Z2, Z3 en X18) en aan de rand (Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 en Z9).	29
b1a,b,c, d,e,f	Verloop chlorideconcentratie als functie van de tijd in het infiltratiewater, de ondiepe onttrekking en de onttrekkingsfilters 1 tot en met 25.	33
b2	Het berekende concentratieverloop met behulp van EXACT op vier dieptes in de bodem.	34
b3a,b	Concentratieverhoging op verschillende diepten indien de infiltratie van 250 mg.l ⁻¹ gedurende 10 uur en 300 uur voortgezet wordt.	37
b4a,b	Concentratieverhoging op verschillende diepten bij een debiet van 33 m ³ .dag ⁻¹ en 70 m ³ .dag ⁻¹ .	38
b5	Stroombanen rondom de onttrekkingen tijdens de sanering.	39

SUMMARY

A tracer experiment in the framework of the project 'in situ bioremediation of oil-polluted soil' was carried out at a location in Asten (Noord-Brabant) at the end of the remediation. The aim of the experiment was to trace to what extent the infiltrated water flowed uniformly through the soil by studying the flow paths and residence times of the groundwater. The remediation technique chosen used water to supply oxygen (in the form of hydrogen peroxide) and to bring nutrients to the location to stimulate the microbiological degradation of pollutants.

Chloride was applied in such doses to the infiltration water as to bring the chloride concentration to about 400 mg.l⁻¹. The concentration was measured daily in 25 withdrawals. The measuring frequency was increased the moment the concentration in the withdrawal rose to 2 or 3 times a day. Breakthrough curves were determined in this way.

Although large differences in withdrawals were observed at the moment of chloride breakthrough, the results in three of the areas within the location did show some similarities. The chloride concentration started to rise soon after the start of the experiment and broke through in the area east of the commercial property after 235 hours. In the withdrawals on the west side of the tank island, no breakthrough was measured and in some withdrawals there was not even a rise in the concentration. Drain stoppage, possibly due to faulty infiltration drains, could be the reason that no rise in concentration was measured. The differences in breakthrough times can probably be ascribed to soil characteristics, for example, the permeability.

Higher breakthrough concentrations were measured in the withdrawals from the middle of the location than those from the edge; this is because at the edge more water coming from outside the location is withdrawn and more dilution appears.

The rapid breakthrough of chloride occurring in the withdrawals in the area east of the commercial property led to the conclusion that a limited amount of soil is flushed here. The infiltrated water flowed via the shortest flow paths to the withdrawals, with the groundwater between the withdrawals being stagnant. This also explains the high concentrations of petrol found in the groundwater at some points in this area. The rise in the chloride concentration measured in the withdrawals occurring between the commercial property and the tank island were as expected; however, preferential flow probably also took place here to some extent. In conclusion, the above results could explain the large differences in the measured levels of petrol in soil and concentrations of petrol in the groundwater.

SAMENVATTING

Ter afsluiting van de praktijksanering in het kader van het project "in situ biorestauratie van een met olie verontreinigde bodem", is een tracerexperiment op de locatie te Asten uitgevoerd. Bij deze saneringstechniek wordt gebruikt gemaakt van water om zuurstof (in de vorm van waterstofperoxyde) en nutriënten aan de locatie toe te voeren ter stimulering van de microbiologische afbraak van de verontreiniging. Voor een goed eindresultaat is het van belang dat de bodem uniform doorstroomd wordt. Het doel van het tracerexperiment was na te gaan in hoeverre dit bereikt is door de stroombanen en verblijftijden van het grondwater te onderzoeken.

In het infiltratiewater werd chloride gedoseerd, zodanig dat de concentratie aan chloride ongeveer 400 mg.l⁻¹ was. Dagelijks werd in alle 25 onttrekkingen de concentratie gemeten. De meetfrequentie werd verhoogd naar twee of driemaal per dag op het moment dat de concentratie in een onttrekking begon op te lopen. Op deze manier werden doorbraakcurves bepaald.

Tussen de onttrekkingen traden grote verschillen op in het moment van chloridedoorbraak. Toch vertoonden de onderlinge resultaten in drie gebiedjes op de locatie enige overeenkomsten. Ten oosten van de bedrijfswoning begon de chlorideconcentratie al snel op te lopen en trad na ongeveer 235 uur doorbraak op. In het gebiedje tussen de bedrijfswoning en het tankeiland trad na ongeveer 310 uur doorbraak op. In de onttrekkingen ten westen van het tankeiland is geen doorbraak gemeten, waarvan in sommige zelfs geen concentratieverhoging.

De verschillen in doorbraaktijd kunnen waarschijnlijk toegeschreven worden aan de bodemkarakteristieken zoals bijvoorbeeld de doorlatendheid.

In de onttrekkingen in het midden van de locatie worden hogere doorbraakconcentraties gemeten dan in die aan de rand, omdat aan de rand meer water van buiten de locatie onttrokken wordt en dus meer verdunning optreedt.

Uit de snelle chloridedoorbraak bij de onttrekkingen in het gebiedje ten oosten van de bedrijfswoning wordt geconcludeerd dat de bodem hier slechts beperkt doorstroomd wordt. Het geïnfiltreerde water stroomt via de kortste banen naar de onttrekkingen en grondwater tussen de onttrekkingen is stagnant aanwezig. Dit blijkt ook uit enkele hoge benzineconcentraties die hier nog steeds gevonden worden.

De onttrekkingen tussen de bedrijfswoning en het tankeiland laten een verwacht beeld zien. Toch is waarschijnlijk ook hier in enige mate voorkeurstroming opgetreden.

Betwijfeld wordt of de infiltratiedrains ten westen van het tankeiland nog goed werken. Verstopping van deze drains zou de reden kunnen zijn dat geen concentratieverhoging van chloride is gemeten.

Aan de hand van de resultaten uit het tracerexperiment kunnen de grote verschillen die te zien zijn in de gemeten benzinegehalten in de bodem en -concentraties in het grondwater verklaard worden.

1 INLEIDING

In situ biorestauratie is een techniek voor de verwijdering van verontreiniging uit bodem en grondwater zonder dat hiervoor afgraving plaatsvindt. Micro-organismen ter plaatse breken de verontreiniging af tot onschadelijke producten. Deze micro-organismen hebben hiervoor voldoende zuurstof en nutriënten als nitraat en fosfaat nodig. Een neutrale zuurgraad (pH 7) bevordert in het algemeen de afbraaksnelheid.

In de bodem zijn zuurstof en nutriënten niet in voldoende mate aanwezig. Via infiltratie van water kunnen deze stoffen in opgeloste vorm aan de bodem toegevoerd worden. Als extra water aan de bodem toegevoerd wordt, moet ook grondwater onttrokken worden om afstroming van de locatie en daardoor verspreiding van de verontreiniging te voorkomen. Tevens kon een deel van de benzine van de locatie verwijderd worden door uitspoeling.

In maart 1990 werd op een locatie, verontreinigd met benzine te Asten (Noord-Brabant), een biorestauratieproject gestart. De verontreiniging in de bodem bevond zich op een diepte van 200 tot 400 cm-maaiveld, waar de hoogste gehalten gevonden werden tussen 300 en 350 cm-maaiveld. Het grondwater was verontreinigd tot 10 m-maaiveld. De sanering werd zes jaren later, in mei 1996 beëindigd.

Door middel van drains werd water met extra zuurstof en nutriënten op een diepte van 100 cm-maaiveld in de bodem geïnfiltreerd. Met behulp van een 25-tal onttrekkingsputten werd grondwater onder de verontreinigingsvlek op een diepte van 450 tot 550 cm-maaiveld onttrokken. Eén onttrekkingsput werd op een diepte van 650 tot 1350 cm-maaiveld geïnstalleerd voor de onttrekking van het verontreinigde grondwater dieper in de bodem.

Aanleiding tracerexperiment

Bij in situ biorestauratie is het van zeer groot belang dat *voldoende* zuurstof en nutriënten aan de bodem toegevoerd worden, en dat deze stoffen beschikbaar zijn op *alle* plaatsen waar zich verontreiniging bevindt. Het infiltratie- en onttrekkingsstelsel werd zodanig ontworpen dat aan deze voorwaarde voldaan zou worden. Getracht werd de grondwaterstand op de locatie te verhogen zodat zich een uniform verticaal stromingsprofiel zou instellen. Het geplande infiltratie- en onttrekkingsdebiet was $600 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$ en $660 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$.

Enige tijd na de start van de sanering bleek het niet mogelijk de grondwaterstand op de locatie voldoende te verhogen. Een ander probleem was dat slechts 10% van de geplande debieten kon worden gehaald. De combinatie van een vacuumbemaling, een grondwaterstand van circa 350 cm-maaiveld, de bovenzijde van de onttrekkingsfilters op 450 cm-maaiveld en een lage doorlatendheid van de bodem, veroorzaakte een steile afpompingsegel rondom de onttrekkingen waardoor bodemlucht werd aangezogen (Wever et al., 1993). Ook bleken het infiltratie- en onttrekkingsdebiet van elkaar afhankelijk te zijn; een verhoging van het onttrekkingsdebiet had ook een verhoging van het infiltratiedebiet tot gevolg. Onzekerheid ontstond of uniforme grondwaterstroming aangenomen kan worden.

Analyseresultaten van de monsters gaven telkens grote verschillen in de benzineconcentratie te zien tussen de verschillende waarnemingsfilters. Slechts weinig benzine werd teruggevonden in het opgepompte grondwater. Deze resultaten deden vermoeden dat het infiltratiewater via voorkeursbanen door de bodem percoleerde.

Om dit te onderzoeken is op de locatie een tracerexperiment uitgevoerd. Met behulp van een tracer wordt het infiltratiewater gelabeld en kan de richting en snelheid van de verplaatsing van het grondwater onderzocht worden. Het doel van het experiment was de stroombanen en verblijftijden van het grondwater op de locatie te onderzoeken.

2 MATERIALEN EN METHODE

2.1 Locatie

De locatie waarop het tracerexperiment uitgevoerd is, was 25 x 25 m² groot. Alleen het ondiepe regime wordt in beschouwing genomen. Het volume van het grondpakket in dit ondiepe deel bedroeg 2500 m³. In dit volume bevond zich ongeveer 625 m³ grondwater. Bij een infiltratiedebiet van circa 70 m³.dag⁻¹, was de gemiddelde verblijftijd van het geïnfiltreerde water op de locatie 9 dagen.

2.2 Tracer

De belangrijkste eis die aan een tracer gesteld wordt, is dat het niet door biologische of chemische omzettingen uit het grondwater verdwijnt of aan de bodemdeeltjes adsorbeert. Verder mag een tracer geen schadelijke stof zijn en moet het eenvoudig detecteerbaar zijn. Sulfaat, nitraat en chloride worden in het algemeen als goede mogelijke tracers beschouwd. Voor deze toepassing vallen nitraat en sulfaat echter af in verband met mogelijke opname door de micro-organismen. Chloride wordt het meest toegepast, zo ook hier.

Chloride werd al vanaf het begin van de sanering in de vorm van ammoniumchloride (NH₄Cl) op de locatie geïnfiltreerd en was bovendien al in het grondwater aanwezig voor de start van de sanering. Bij het begin van de tracerproef was het in het grondwater aanwezig met een concentratie van ongeveer 80 mg.l⁻¹. In Par. 3.2 wordt voorbeeldsgewijs berekend hoe hoog de chlorideconcentratie in het infiltratiewater moet zijn en hoe lang deze verhoogde concentratie op het infiltratiewater gedoseerd moet worden om goede resultaten te verkrijgen uit het experiment.

2.3 Monstername

Het grondwater werd slechts door één vacuumpomp van de locatie onttrokken. De leidingen van de afzonderlijke onttrekkingsputten kwamen in een bak uit op een verzamelleiding die met de vacuumpomp in verbinding stond. Op alle afzonderlijke leidingen in deze bak was een aftapkraan gemonteerd waar eenvoudig monsters genomen konden worden van het opgepompte grondwater. Van iedere onttrekking werd dagelijks minstens één monster (250 ml) getrokken, waarvan de chlorideconcentratie meteen bepaald werd. Om de dag werden monsters van 100 ml genomen die bewaard werden voor eventuele duplo-bepalingen voor het geval dat de analyseresultaten hier aanleiding toe zou geven. Om de dag werd de tijd bijgehouden die nodig was om de monsterfles vol te trekken.

2.4 Monsteranalyse

Een exact bekende hoeveelheid monster werd geanalyseerd door titratie met 0,1 mol.l⁻¹ zilvernitraat (AgNO₃). Als gevolg van de neerslagreactie $\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl (s)}$ verandert de potentiaal van de oplossing. Wanneer alle chloride-ionen zijn neergeslagen treedt een potentiaalsprong op. De titrator (Mettler Compact Titrator) berekent met de opgegeven constanten zoals concentratie titrant, buretvolume, valentie, monstervolume, etc. de chlorideconcentratie van het monster in mg.l⁻¹.

Met behulp van een controlestandaard van 0,1460 gram natriumchloride in 1000 ml water, werd iedere dag de berekende waarde van het apparaat gecontroleerd.
Er is gewerkt volgens SOP-nummer LBG/219/00 (Bepaling van chloride in watermonsters met behulp van de autotitrator Mettler OL20).

3 DOSERING CHLORIDE

Het is niet eenvoudig een tracerexperiment uit te voeren op een zo grote locatie, waar in het grondwater reeds een hoge concentratie chloride aanwezig is. De kans bestaat dat geen concentratieverhoging gemeten kan worden als te weinig extra chloride geïnfiltreerd wordt of als de metingen niet lang genoeg voortgezet worden. Tevoren moet bepaald worden met welke concentratie geïnfiltreerd moet worden en gedurende welke tijdperiode, zodat waardevolle resultaten verkregen kunnen worden.

Hierbij moet met een aantal factoren rekening gehouden worden: de reeds aanwezige hoeveelheid chloride, het infiltratiedebiet, de verblijftijd, eventuele afstroming, verdunning in de onttrekkingsfilters omdat meer water opgepompt wordt, enz.

In november 1992 is reeds geprobeerd een tracerexperiment op de locatie uit te voeren. Dit experiment is echter mislukt; er kon geen concentratieverhoging in de onttrekkingen gemeten worden, hoewel gedurende zestien dagen gemeten is.

Op het moment dat deze proef uitgevoerd werd was de chlorideconcentratie in het grondwater op de locatie opgelopen tot 100 mg.l^{-1} . Op de locatie is ongeveer 625 m^3 water aanwezig tussen 100 en 550 cm-maaiveld; in totaal was dus ongeveer 63 kg chloride aanwezig.

Gedurende slechts 10 uur werd water geïnfiltreerd met een chlorideconcentratie van ongeveer 250 mg.l^{-1} . Een hogere chlorideconcentratie was mogelijk schadelijk voor de micro-organismen in de bodem.

Het infiltratiedebiet was op dat moment ongeveer $33 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$. De verblijftijd van het grondwater op de locatie was ongeveer 19 dagen. In totaal werd ongeveer 3,4 kg chloride extra geïnfiltreerd, terwijl per dag ongeveer 3,3 kg via de dosering van ammoniumchloride aan de bodem toegevoegd werd.

Met berekeningen waarbij het concentratieverloop als functie van de tijd bepaald kan worden op verschillende dieptes in de bodem, kan nu aangetoond worden waarom geen concentratieverhoging gemeten kon worden. Dit wordt gedaan met behulp van transportvergelijkingen voor twee gevallen: het geïnfiltreerde water stroomt zonder enige opmenging naar een onttrekkingsput en tijdens dit transport treedt dispersie op.

3.1 Geen dispersie

De situatie waarbij geen dispersie van de tracer optreedt in het grondwater, is interessant om te beschouwen, omdat op deze manier de maximaal mogelijke concentratie berekend kan worden die gemeten zou kunnen worden. Deze zou op kunnen treden als voorkeurstroming plaatsvindt.

Het geïnfiltreerde water met de verhoogde concentratie aan tracer beweegt zich als een front door de bodem, zonder dat daarbij enige uitwisseling met het water in de omgeving optreedt. Het onttrekkingsdebiet is echter groter dan het infiltratiedebiet; als het water met verhoogde concentratie in de onttrekkingsput aankomt, vindt opmenging plaats met water van buiten de locatie dat extra opgepompt wordt om afstroming te voorkomen.

Bij het heersende infiltratiedebiet van $31 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$ en onttrekkingsdebiet van $51 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$ en een chlorideconcentratie in het pakketje van 250 mg.l^{-1} en buiten de locatie van 40 mg.l^{-1} , wordt de concentratie in de onttrekking:

$$\frac{33 \cdot 250 + 18 \cdot 40}{51} = 176 \text{ mg/l}$$

De concentratie die maximaal gemeten zou kunnen worden is dus 176 mg.l⁻¹. Maar dat deze concentratie gemeten wordt, in een dergelijk groot systeem, met deze lange verblijftijden, is zeer onwaarschijnlijk.

3.2 Dispersie bij eendimensionale stroming

Dispersie is het proces dat verspreiding van de tracer over een steeds groter gebied veroorzaakt. Het is een niet-stationair, irreversibel proces waarbij de tracer mengt met een hoeveelheid water zonder tracer. Om dispersie te begrijpen moet het proces op microschaal, dat wil zeggen in de poriën van het grondpakket, beschouwd worden. Op microschaal varieert de stroomsnelheid van het infiltratiewater met de grootte van de porie. Ook kan de stroomsnelheid afwijken van de gemiddelde stroomsnelheid omdat de richting bepaald wordt door de ligging van de open-poriën. Bovendien speelt moleculaire diffusie van de tracer een rol. Beide processen worden onder de term dispersie gevat.

Stroming in eendimensionale richting wordt aangenomen omdat vanwege de grootte van het infiltratie- en onttrekkingsdebiet de stroomrichting naar beneden gericht zal overheersen.

Het water dat beschouwd wordt, beweegt zich vanuit de infiltratiedrains naar de onttrekkingsfilters. Tijdens dit transport vindt uitwisseling plaats met het grondwater uit de omgeving via dispersie. De volgende vergelijking geeft de verandering van de concentratie in het water weer indien het stroomt van punt z naar het diepere $z+\Delta z$:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} A \Delta z = [\Phi_V c]_z - [\Phi_V c]_{z+\Delta z} + \left\{ -D' \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_z + D' \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z+\Delta z} \right\} A \quad (1)$$

Deze vergelijking gaat over in:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial z} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

Met:

$$v = \frac{\Phi_V}{n A}$$

$$D = \frac{D_0}{\tau} + \alpha_L v \approx \alpha_L v$$

Hierin is:

A	= oppervlakte	[m ²]
C	= concentratie	[g.m ⁻³]
D	= dispersiecoëfficiënt	[m ² .h ⁻¹]
D'	= dispersiecoëfficiënt (= D/n)	[m ² .h ⁻¹]
D ₀	= diffusiecoëfficiënt	[m ² .h ⁻¹]
n	= porositeit	
t	= tijd	[h]
z	= diepte	[m]
α _L	= longitudinale dispersiviteit	[m]
τ	= tortuositeit	
Φ _v	= debiet	[m ³ .h ⁻¹]

Bovenstaande vergelijking kan opgelost worden indien het water stroomt door een homogeen poreus medium in een oneindig lange kolom. De oplossing luidt dan:

$$C = \frac{1}{2} C_0 \operatorname{erfc} \left[\frac{z - vt}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (3)$$

Erfc(x) is de complementaire errorfunctie.

De concentratie als functie van de plaats en tijd kan nu als volgt berekend worden:

$$C(z,t) = C_i + \frac{1}{2} (C_0 - C_i) \operatorname{erfc} \left[\frac{z - vt}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (4)$$

C_i is de initiële concentratie, dit is de concentratie die reeds aanwezig is. C₀ is de concentratie in het infiltratiewater.

Vanaf het moment dat de dosering van de tracer stopt, kan de concentratie niet meer berekend worden met vergelijking 4. Een extra term, die de dispersie in het nieuw geïnfiltreerde water waarin geen tracer meer aanwezig is, verdisconteert, moet hieraan toegevoegd worden. Indien de concentratie in dit nieuw geïnfiltreerde water gelijk is aan de initiële concentratie wordt de concentratie op plaats z en tijd t gegeven door:

$$C(z,t) = C_i + \frac{1}{2} (C_0 - C_i) \operatorname{erfc} \left[\frac{z - vt}{2\sqrt{Dt}} \right] - \frac{1}{2} (C_0 - C_i) \operatorname{erfc} \left[\frac{z - v(t-t_0)}{2\sqrt{D(t-t_0)}} \right] \quad (5)$$

met t₀ = tijdstip waarop dosering stopt.

De vergelijkingen 4 en 5 kunnen alleen toegepast worden voor een oneindig lange kolom grond die volledig verzadigd is met water. De locatie in Asten waarop de tracerproef is uitgevoerd is niet oneindig diep en niet volledig verzadigd met water.

Toch worden deze vergelijkingen gebruikt als benadering om de mogelijke concentratieverhoging in de onttrekkingsfilters te berekenen en de tijd die daarvoor nodig is. Volledige verzadiging wordt gesimuleerd door aanpassing van de porositeit.

Met behulp van het computerprogramma EXACT (Van Genuchten, 1986) is een tracerexperiment op de locatie in Asten gesimuleerd. In Bijlage 4 is dit uitgewerkt.

Uit de resultaten van de simulatie blijkt dat tijdens het eerste experiment dat uitgevoerd is, geen concentratieverhoging in de onttrekkingsfilters gemeten kon worden. De dosering van extra chloride gedurende slechts 10 uur was te kort. Na 410 uur (17 dagen) was een maximale concentratie te verwachten van 104 mg.l^{-1} . Dit was slechts een verhoging van 4 mg.l^{-1} ; het is niet waarschijnlijk dat dit gemeten had kunnen worden.

Berekend kan worden hoelang de dosering voortgezet moet worden om wel meetresultaten te verkrijgen. Dit is uitgevoerd voor infiltratieconcentraties van 250 en 350 mg.l^{-1} , bij infiltratiedebieten van 33 en 70 $\text{m}^3.\text{dag}^{-1}$. In onderstaande figuur wordt de maximaal te meten concentratie in de onttrekkingen uitgezet tegen het aantal uren dosering van de tracer.

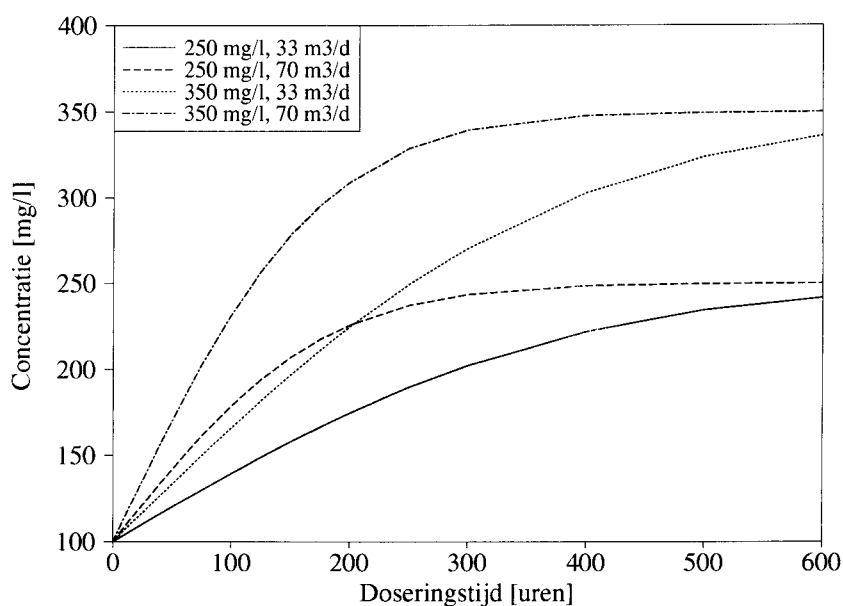


Fig. 1 Maximale concentratie die in de onttrekkingsfilters gemeten kan worden als functie van de doseringstijd.

Uit bovenstaande figuur blijkt dat het zeer lang duurt voordat in de onttrekkingen de concentratie gemeten kan worden waarmee ook geïnfiltrerd wordt; zelfs bij een debiet van $70 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$ moet hiervoor gedurende 600 uur chloride in het infiltratiewater gedoseerd worden. Om toch na enige tijd een concentratieverhoging te kunnen meten, moet chloride dus met een hoge concentratie gedoseerd worden.

Na 300 uur kan een concentratieverhoging gemeten worden van ongeveer 125 mg.l^{-1} als met 350 mg.l^{-1} geïnfiltrerd is gedurende tenminste 200 uur bij een debiet van $33 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$ en een verhoging van ongeveer 210 mg.l^{-1} bij een debiet van $70 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$. Een hoger debiet is dus tevens positief voor de metingen.

4 UITVOERING EXPERIMENT

Het tracerexperiment is uitgevoerd op de locatie in Asten in april 1996. Gedurende 14 dagen werd extra chloride in het infiltratiewater gedoseerd. De doseerinstallatie van waterstofperoxyde kon hiervoor gebruikt worden. In de voorraadvaten was water met een chlorideconcentratie van 100 g.l^{-1} aanwezig. In totaal is ongeveer 4 m^3 van dit water gebruikt.

De doseerpomp werd zodanig afgesteld dat de concentratie in het infiltratiewater ongeveer 400 mg.l^{-1} was. Deze concentratie liep gedurende het experiment steeds verder op, ondanks het regelmatig terugdraaien van de gedoseerde hoeveelheid, omdat de concentratie in het opgepompte water hoger werd. Doseertijd en -concentratie werden afgeleid uit Fig. 1.

In de 25 onttrekkingen werd tenminste éénmaal per dag de chlorideconcentratie gemeten. Op het moment dat de concentratie begon op te lopen, werden frequenter monsters genomen en geanalyseerd. Doorbraak was opgetreden als de concentratie per tijdseenheid niet veel meer veranderde, indien de concentratieverhoging in één dag minder dan 5% bedroeg. Om doorbraak te kunnen vaststellen hoefde de concentratie niet noodzakelijk gelijk te zijn aan de concentratie in het infiltratiewater. Er werd namelijk meer water aan de locatie onttrokken dan geïnfiltrerd, zodat verdunning in de onttrekkingen optrad. Vergelijking van de concentratie bij doorbraak met de infiltratieconcentratie geeft informatie over de verhouding in het opgepompte water tussen het geïnfiltrerde en van buiten de locatie afkomstige water (zie Par. 5.4). Aan de hand van de resultaten kunnen conclusies getrokken worden over de stroombanen van het grondwater op de locatie. Het experiment werd na 14 dagen beëindigd, hoewel de chlorideconcentratie nog niet in alle onttrekkingen opgelopen was.

Elf dagen voor het begin van het experiment, werden het infiltratie- en onttrekkingsdebiet geoptimaliseerd. Een aantal onttrekkingen stond dicht, waarschijnlijk vanaf juli 1993: de onttrekkingen 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 21 en 22. De onttrekkingen 4, 11, 16, 19 en 21 werkten niet of waren afgekoppeld.

Nadat de onttrekkingen die dicht stonden weer in bedrijf waren genomen, en het infiltratie-debiet iets verhoogd was, nam ook het ondiepe onttrekkingsdebiet toe. Fig. 2 geeft het verloop van het infiltratie- en onttrekkingsdebiet tijdens het tracerexperiment.

Bij de monsternamen van de nulsituatie traden problemen op. Lekkage op de verschillende verbindingstukken in de onttrekkingsleidingen was er de oorzaak van dat van sommige onttrekkingen geen monster getrokken kon worden. Nadat alle verbindingstukken aangedraaid waren, konden wel monsters getrokken worden, en is het onttrekkingsdebiet verder toegenomen, zoals blijkt uit Fig. 2.

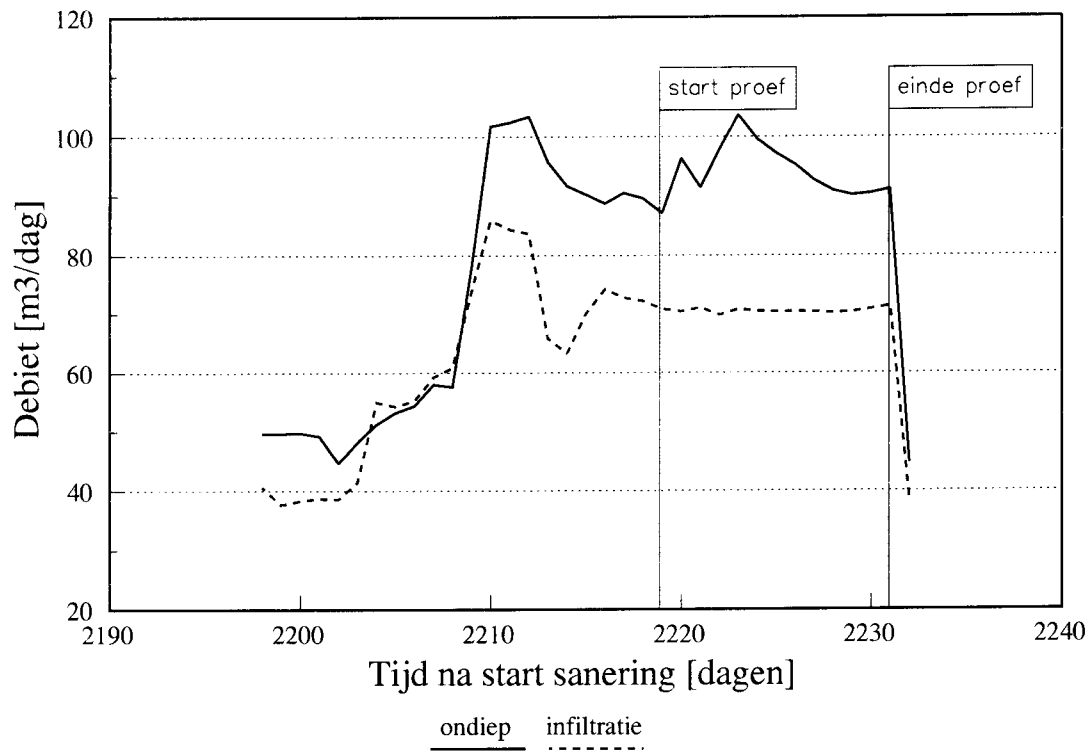


Fig. 2 Infiltratie- en onttrekkingsdebiet ten tijde van het tracerexperiment.

5 RESULTATEN

In Bijlage 2 wordt het concentratieverloop van chloride als functie van de tijd weergegeven voor de afzonderlijke onttrekkingen. Tevens wordt in deze bijlage het met EXACT berekende concentratieverloop in de tijd weergegeven, waarvoor de omstandigheden tijdens het experiment gesimuleerd zijn.

Opmerkelijk is dat er grote verschillen bestaan in de resultaten tussen de verschillende onttrekkingen, terwijl het slechts een kleine locatie betreft. Slechts van enkele onttrekkingen (7 en 14) sluit het gemeten concentratieverloop aan bij de simulatie.

Uit de simulatie blijkt dat de concentratie aan chloride in de onttrekkingen na circa 95 uur zou moeten oplopen. Na ongeveer 280 uur zou de concentratieverandering per tijdseenheid moeten afnemen; de concentratie neemt nog slechts weinig toe. Hoewel de dosering na 300 uur gestopt is, zou de maximale concentratie in de onttrekkingen pas na 390 uur bereikt moeten worden. Deze concentratie is dan 483 mg.l⁻¹. Hierna zou de concentratie snel af moeten nemen tot het oorspronkelijke niveau.

5.1 Begin concentratieverhoging

De grote verschillen in de metingen bestaan onder andere in het moment waarop de chlorideconcentratie in de onttrekkingen begint op te lopen. In de onttrekkingsfilters 3, 5, 6, 8 en 10 is de concentratie 42 uur na aanvang al verdubbeld. In filter 8 werd het snelst een concentratieverhoging waargenomen; reeds na 20 uur. Bij de andere onttrekkingen ligt het tijdstip waarop de concentratie begint op te lopen later:

- in 2, 9 en 12 na 70 uur,
- in 14 na 90 uur,
- in 1, 7 en 13 ligt het tijdstip tussen 110 en 140 uur,
- in 20 en 22 na 165 uur en
- in 15 en 17 na 235 uur.

In de filters 18, 23, 24 en 25 wordt geen concentratieverhoging gemeten. Deze onttrekkingsfilters liggen allemaal dichtbij elkaar, in dezelfde hoek van de locatie. Omdat geen concentratieverhoging wordt gemeten, wordt betwijfeld of de infiltratiedrains in dit gebied nog goed werken. Mogelijk zijn deze dichtgeslibd met zand of verstopt geraakt door biomassagroei. Omdat het de rand van de locatie betreft, en dus het uiteinde van de drains, is mogelijk de druk in de drains niet hoog genoeg meer om infiltratie te bewerken.

In de filters 23 en 24 wordt aan het begin van het experiment een verhoogde concentratie gemeten. Een dag na de start is deze teruggelopen naar de waarde die ook in de andere filters gemeten wordt.

In vergelijking met het berekende moment waarop de concentratie begint op te lopen (zie Bijlage 2), is dit moment in 3, 5, 6, 8, 9 en 10 veel sneller aangebroken. De concentraties in 1, 2, 12 en 14 beginnen iets te vroeg op te lopen, terwijl 7 en 13 gelijk met de simulatie lopen. In de andere onttrekkingen is dit moment later aangebroken (20, 22 en 15, 17), terwijl in 18, 23, 24, 25 dit moment nog niet gekomen was.

5.2 Doorbraak

Doorbraak van chloride heeft plaatsgevonden als de chlorideconcentratie per tijdseenheid niet veel meer veranderde.

Er bestaan ook grote verschillen in de tijdsduur waarin doorbraak bereikt is.

De eerste doorbraak wordt na 190 uur (ongeveer 8 dagen) gemeten. Deze vond plaats bij de onttrekkingsfilters 5, 6 en 8. In de filters 3, 10 en 14 breekt de chloride na ongeveer 235 uur (10 dagen) door, en in de filters 1 en 2 een dag later na 260 uur. Na ongeveer 280 uur heeft de concentratie het doorbraakniveau bereikt in filter 9. De laatste doorbraak is gemeten in filter 12 na 310 uur, 13 dagen. In de filters 7, 13, 15, 17, 20 en 22, is geen doorbraak geconstateerd, hoewel de concentratie al wel opliep.

Onderstaande tabel geeft de tijdsduur waarin doorbraak bereikt is. Dit is de tijd tussen het moment dat de concentratie begint op te lopen en waarop doorbraak bereikt is. Niet in alle onttrekkingen is die doorbraak bereikt, omdat het experiment twee weken na aanvang gestopt werd.

Tabel 1. Tijdsduur vanaf moment dat concentratie gaat oplopen tot doorbraak.

Onttrekking	Doorbraaktijd [h]
1, 14	140
5, 6	150
8	170
2, 3, 10	190
9	210
12	240
7, 13	> 185
20, 22	> 145
15, 17	> 75

Hoewel in onttrekking 8 het eerst een concentratieverhoging waargenomen werd, is de doorbraaktijd vanaf dit moment niet het kortst in deze onttrekking. In onttrekking 14 begon de concentratie pas na 90 uur op te lopen, maar de doorbraaktijd is, evenals in onttrekking 1, korter.

De doorbraaktijd is dus niet automatisch korter bij die onttrekkingen waar de concentratie korte tijd na de start van het experiment al begint op te lopen. De grootte van de onttrekkingsdebeten speelt bij de doorbraak van chloride ook een rol. Deze debieten zijn niet gelijk voor alle onttrekkingen. Hiermee moet rekening worden gehouden bij de interpretatie van de resultaten, zie Hoofdstuk 6.

Indien weer vergeleken wordt met de simulatie, blijkt doorbraak in de volgende onttrekkingen eerder op te treden: 3, 5, 6, 8, 10 en 14. In de onttrekkingen 1, 2, 7 en 9 treedt doorbraak ongeveer gelijktijdig met de simulatie op, terwijl die in de andere onttrekkingen later of niet optreedt.

5.3 Afzonderlijke debieten

Bij het nemen van monsters van het grondwater dat via de onttrekkingen opgepompt wordt, bleek dat het monsterflesje bij sommige onttrekkingen sneller volliep dan bij andere. Blijkbaar is de hoeveelheid water die per tijdseenheid opgepompt wordt, niet gelijk voor alle onttrekkingen. Indien hierin verschillen optreden bij het nemen van monsters, zal dit ook het geval zijn tijdens de procesvoering van het onttrekkingsysteem.

Om de afzonderlijke debieten te kwantificeren is tijdens de monsternamen enige malen de tijd opgenomen voor het oppompen van 500 ml uit de onttrekkingen. Deze tijd is een maat voor het debiet dat tijdens de normale procesvoering via de onttrekking opgepompt wordt.

Het totale ondiepe onttrekkingsdebiet is gelijk aan de som van de debieten per onttrekking. In formulevorm:

$$\Phi_{tot} = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_{25}$$

Indien de tijd opgenomen wordt voor het oppompen van 500 ml, kan hieruit een debiet, Φ' , berekend worden. Dit debiet is niet het werkelijke debiet omdat het met behulp van een andere pomp bepaald is, maar het is wel een maat voor het werkelijke debiet. De volgende vergelijking geeft dit weer.

$$\Phi_{tot} = a * (\Phi'_1 + \Phi'_2 + \dots + \Phi'_{25})$$

Voor het debiet in de afzonderlijke onttrekkingen geldt nu, dus voor $i=1, \dots, 25$:

$$\Phi_i = a * \Phi'_i$$

Gedurende het tracerexperiment is drie maal op deze manier het debiet, Φ' , bepaald. Hieruit is het gemiddelde debiet voor iedere onttrekking berekend, die in Tabel 2 weergegeven worden.

Tabel 2. Het gemiddelde debiet, Φ_i , per filter gedurende het tracerexperiment.

Fil-ter	Debiet [m ³ .d ⁻¹]	Fil-ter	Debiet [m ³ .d ⁻¹]	Fil-ter	Debiet [m ³ .d ⁻¹]	Fil-ter	Debiet [m ³ .d ⁻¹]
1	3,5	7	4,1	13	7,8	20	3,6
2	5,3	8	4,5	14	4,9	22	2,0
3	5,8	9	3,6	15	4,9	23	3,2
5	8,5	10	7,3	17	6,4	24	3,3
6	6,2	12	5,6	18	1,9	25	4,0

Via de onttrekkingen 5, 10 en 13 wordt veel water per tijdseenheid aan de locatie onttrokken. Het debiet dat via de onttrekkingen 18 en 22 opgepompt wordt, is erg laag.

5.4 Aandeel infiltratiewater in opgepompt water

Doordat meer water onttrokken wordt dan geïnfiltreerd, wordt gedeeltelijk water afkomstig van buiten de locatie opgepompt. Deze randvoorwaarde is opgelegd om afstroming van de locatie te voorkomen. De concentratie waarbij doorbraak optreedt in een onttrekking geeft informatie over de hoeveelheid water die onttrokken wordt van buiten de locatie.

De concentratie bij doorbraak wordt bepaald door een deel geïnfiltreerd water met een hoge concentratie en een deel water uit de omgeving met een lage concentratie. De volgende vergelijking geeft dit weer:

$$a * C_{inf} + (1-a) * C_{omg} = C_{opgepompt}$$

Hierin is a het aandeel van het geïnfiltreerde water in het onttrokken water. Indien deze vergelijking omschreven wordt, kan dit aandeel berekend worden door:

$$a = \frac{C_{opgepompt} - C_{omg}}{C_{inf} - C_{omg}}$$

De concentraties van het infiltratiewater en het opgepompte water zijn bekend. Aangenomen wordt dat in het water buiten de locatie de concentratie aan chloride 40 mg.l^{-1} is.

In Tabel 3 wordt van de filters waar doorbraak is opgetreden de relatieve hoeveelheid van het geïnfiltreerde water in het opgepompte water weergegeven. Vanaf het moment dat doorbraak is opgetreden, is deze relatieve hoeveelheid bepaald voor alle daaropvolgende metingen. In de tabel worden de gemiddelden gegeven. Tevens wordt in deze tabel de tijd gegeven waarop doorbraak is opgetreden en of het filter aan de rand of in het midden van de locatie ligt.

Tabel 3. Het aandeel van het geïnfiltreerde water in het opgepompte water bepaald uit de chlorideconcentratie bij doorbraak, met de ligging van de onttrekking op de locatie.

Onttrekking	Hoeveelheid [%]	Plaats onttrekking	Tijdstip doorbraak [uur]
1	66	rand	282
2	78	rand	282
3	85	rand	213
5	94	midden	188
6	96	midden	188
8	95	midden	188
9	69	rand	234
10	91	midden	236
12	62	rand	312
14	82	midden	236

De onttrekkingen waarvan de fractie geïnfiltreerd water in het opgepompte water het hoogst is, liggen alle in het midden van de locatie. In deze onttrekkingen begint de concentratie al na korte tijd op te lopen en vindt sneller doorbraak plaats.

5.5 Berekening stroombanen

Stroombanen van het grondwater dat vanaf de infiltratiedrains naar de onttrekkingsfilters stroomt, laten zien in welke mate het verontreinigde grondpakket doorstroomd wordt met water. Het is niet vanzelfsprekend dat een infiltratie- en onttrekkingsstelsel zo optimaal werkt dat het gehele grondpakket uniform doorstroomd wordt. Berekening van de stroombanen kan inzicht hierin geven.

De stroombanen kunnen in beeld worden gebracht met behulp van verschillende computerprogramma's. Het programma FLOP3N (Veling, 1991) lijkt geschikt om de situatie op de locatie in Asten te simuleren.

Dit programma berekent exacte oplossingen in drie dimensies voor de stroombanen in een stationaire toestand en houdt rekening met een kleine filterlengte ten opzichte van de dikte van het grondpakket. Tevens wordt rekening gehouden met de natuurlijke grondwaterstroming. Op deze manier wordt van een aantal op te geven grondwaterdeeltjes bij de onttrekking getraceerd waar deze aan de oppervlakte het pakket ingekomen zijn en via welke weg ze naar de onttrekking gestroomd zijn.

Voor de berekening is aangenomen dat het infiltratiewater uniform over het oppervlak verdeeld wordt. Een coördinatenrooster wordt zodanig over de locatie gelegd, dat de natuurlijke grondwaterstroming gesimuleerd kan worden als stromende van links naar rechts met een verhang van 7 mm. Er wordt slechts één bodemlaag beschouwd; aangenomen is dat zich geen ondoorlaatbare lagen in de bodem bevinden tot een diepte van 18 m-maaiveld. Met heterogeniteiten in de bodem kan ook geen rekening gehouden worden; het is immers niet bekend waar deze zich bevinden.

Met het computerprogramma zijn twee berekeningen uitgevoerd. Bij de eerste berekening is de situatie tijdens het tracerexperiment gesimuleerd. Per onttrekking zijn de debieten ingevoerd die tijdens het tracerexperiment gemeten zijn. De onttrekkingen die tijdens het tracerexperiment niet werkten, zijn ook voor deze berekening buiten beschouwing gelaten. Omdat de debieten ongeveer het dubbele waren van die tijdens de sanering, is ook een tweede berekening uitgevoerd met lagere debieten. Het gemiddelde onttrekkingsdebiet van $52 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$ over de gehele saneringsduur is voor deze berekening gebruikt. De debieten per onttrekking zijn gelijk gesteld, met alle onttrekkingsfilters in werking.

5.5.1 Resultaten

In onderstaande figuur wordt een bovenaanzicht van de locatie gegeven met de 6 berekende stroombanen rondom iedere werkende onttrekkingsfilter. De figuur geeft een driedimensionaal resultaat weer: de onttrekkingen liggen op een diepte van 450 tot 550 cm-maaiveld en de infiltratiedrains op een diepte van 100 cm-maaiveld. De berekening start vanaf de onttrekking en stopt op het moment dat de stroombaan ter hoogte van de infiltratiedrains aangekomen is.

De stroombanen zijn gemarkeerd met +, * en o, het resultaat na respectievelijk 10, 20 en 30 dagen. Dit betekent dat een grondwaterdeeltje dat zich op deze punten op de stroombaan bevindt respectievelijk na 10, 20 en 30 dagen in de onttrekking zal zijn aangekomen. Na 30 dagen is de berekening overigens beëindigd; enkele stroombanen zijn dan nog niet op ter hoogte van de infiltratiedrains gekomen.

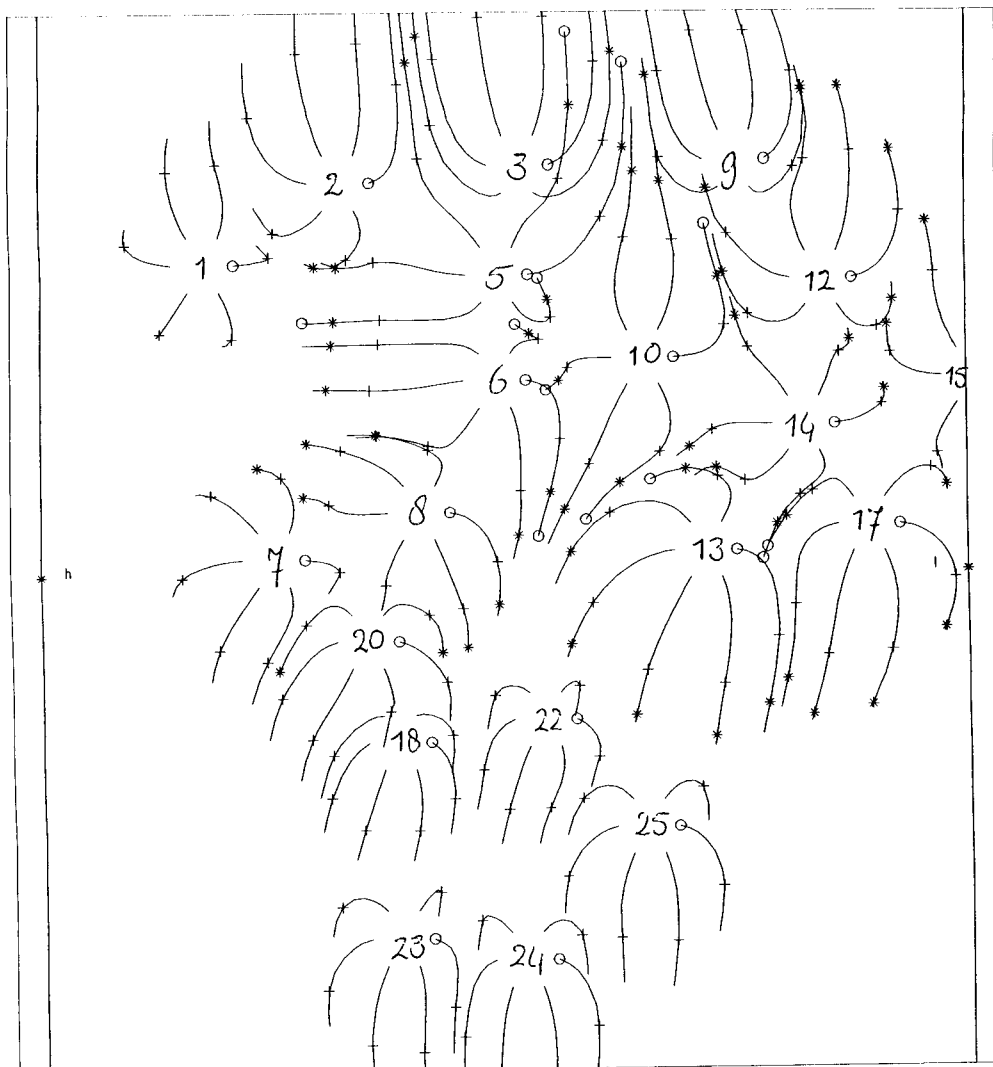


Fig. 3 Stroombanen rondom de onttrekkingen ten tijde van het tracerexperiment.

De figuur geeft duidelijk weer tot hoever de invloed van de afzonderlijke onttrekkingen zich uitstrekt aan het infiltratieoppervlak.

Een zij-aanzicht daarentegen zou de invloed in de diepte en de tijd aan elkaar relateren. Vanwege de vele stroombanen is op een zij-aanzicht niets te onderscheiden.

De figuur laat grote verschillen zien tussen de onttrekkingen. Terwijl sommige stroombanen al na ongeveer 18 dagen de laag bereiken waarin zich de infiltratiedrains bevinden, hebben andere stroombanen daar meer dan 30 dagen voor nodig.

De stroombanen die het snelst het oppervlak bereiken zijn die van de onttrekkingen 1, 18, 22, 23, 24, 25. Deze onttrekkingen hebben de laagste debieten. Uit bovenstaande figuur blijkt dat deze onttrekkingen ook de kleinste invloedssfeer hebben, het grondpakket rondom de filters van waaruit het grondwater onttrokken wordt. Een kleine invloedssfeer wordt ook gevonden bij onttrekkingen 7 en 20 hoewel het langer duurt voordat deze

stroombanen het niveau van de infiltratiedrains bereikt hebben. Deze onttrekkingen bevinden zich overigens aan de rand van de locatie waar de minste interactie is met andere onttrekkingen.

Door de lage debieten hebben deze onttrekkingen een kleine invloedssfeer. Omdat er bovendien geen concurrentie met andere filters is, bereiken de stroombanen het snelst het oppervlak waar het water geïnfiltreerd wordt. Deze onttrekkingen pompen geen dieper gelegen grondwater op.

Bij de onttrekkingen 2, 3, 9, 12, 15 en 17, die ook aan de rand liggen, duurt het langer voordat de stroombanen het infiltratieoppervlak bereiken. Deze onttrekkingen hebben grotere debieten en tevens een grotere invloedssfeer.

De onttrekkingen in het midden van de locatie, 5, 6, 8, 10, 13 en 14 ondervinden een grote concurrentie van andere onttrekkingen. De stroombanen hier zijn beduidend langer en strekken zich het verst uit. Enkele van deze onttrekkingen hebben overigens zeer hoge debieten.

Bij de onttrekkingen 3, 5, 6, 10, 13, 14 en 17 zijn één of meerdere stroombanen die eerst dieper gelegen grondwater onttrekken. Sommige stroombanen verplaatsen zich met de tijd alleen verder de diepte in. Na 30 dagen bevinden zij zich op ongeveer 900 cm-maaiveld. Opvallend is dat dit de onttrekkingen zijn met de hoogste debieten. De stroombanen waar het om gaat strekken zich allemaal uit naar het midden van de locatie, daar waar de meeste interactie met andere onttrekkingen is.

De stroombanen van de onttrekkingen die aan de rand van de locatie liggen, strekken zich het verst uit naar de buitenkant van de locatie. Hier kan het grondwater het makkelijkst onttrokken worden, omdat geen interactie met andere onttrekkingen plaatsvindt.

Geconcludeerd kan worden dat de invloedssfeer toeneemt met de grootte van het debiet, terwijl het infiltratieoppervlak minder snel bereikt wordt. Dit wordt veroorzaakt door de grotere horizontale doorlatendheid van de bodem ten opzichte van de vertikale.

De resultaten van het tracerexperiment laten vreemd genoeg een tegenovergesteld beeld zien: bij onttrekkingen met hoge debieten wordt het snelst een concentratieverhoging van chloride gemeten. Kennelijk is de verticale doorlatendheid van de bodem groter dan de horizontale.

In Bijlage 5 wordt in Fig. b5 het resultaat gegeven van de tweede berekening, die waarbij getracht is de situatie tijdens de sanering te simuleren. Doordat de aparte debieten voor alle onttrekkingen hetzelfde zijn, vertonen alle stroombanen vrijwel hetzelfde beeld. Opvallend is dat ook hier door de kleinere debieten de stroombanen sneller op het niveau van de infiltratiedrains aankomen. De onderlinge interactie is minimaal. Er zijn geen stroombanen die zich de diepte in verplaatsen.

Zowel in Fig. 3 als in Fig. b5 in Bijlage 5 zijn tussen de stroombanen plaatsen te zien waar het grondwater niet onttrokken wordt. Omdat de stroombanen kleiner zijn bij de simulatie van de saneringssituatie, zijn hier meer plaatsen te zien dat bij de simulatie van het tracerexperiment. Ook uit de simulaties blijkt dus dat stagnant grondwater op de locatie aanwezig is.

In het eindrapport van de sanering (Scheuter et al., 1997) wordt geconcludeerd dat het grondwater waar nog hoge benzineconcentraties gevonden worden, stagnant aanwezig is. Deze verklaring kan ook onderbouwd worden met behulp van deze simulaties.

5.5.2 Bepaling invloedssfeer onttrekkingen uit resultaten

Zoals al gezegd komen de resultaten van het tracerexperiment niet overeen met de resultaten van de uitgevoerde simulatie. Het grondwater rondom de onttrekkingen ten oosten van de bedrijfswoning hebben de kortste verblijftijden en deze worden nog korter voor de onttrekkingen in het midden van de locatie. In plaats van een uitgebreidere invloedssfeer, lijken deze filters juist hun grondwater uit een kleiner gebied te onttrekken. Bij de onttrekkingen in het midden van de locatie is de chlorideconcentratie na doorslag slechts iets minder dan de concentratie in het infiltratiewater, zodat geconcludeerd wordt dat deze onttrekkingen ook niet in hoge mate dieper gelegen grondwater onttrekken.

Onder grove aannames kunnen uit de resultaten de invloedssferen van de verschillende onttrekkingen bepaald worden. De verticale afstand van de infiltratiedrains tot het midden van de onttrekkingsfilters is 4 meter. Uit de doorslagcurves kan het tijdstip bepaald worden waarop de chlorideconcentratie het midden hield tussen de doorslagconcentratie en de concentratie in het infiltratiewater. Met behulp van de verticale afstand en deze tijd kan een verticale stroomsnelheid worden afgeleid. Door voor alle onttrekkingen deze verticale stroomsnelheid op het debiet te delen wordt een indicatie verkregen van het oppervlak waaruit grondwater onttrokken wordt. Indien aangenomen wordt dat het grondwater in een cilinder om het filter onttrokken wordt, kan het oppervlak van deze cilinder berekend worden. Waarschijnlijker is het dat de afpompingslijnen de vorm van een paraboolvormige trechter aangenomen hebben. Voor de berekening van deze parabool zijn echter te weinig gegevens beschikbaar. De interactie tussen de verschillende onttrekkingsfilters is bij deze analyse niet meegenomen. De op deze manier bepaalde invloedssferen zijn dus een illustratie en zullen niet het werkelijke beeld weergeven.

In Bijlage 6 is een figuur gegeven waarin de invloedssferen rondom de onttrekkingen weergegeven zijn.

6 DISCUSSIE

Om conclusies te kunnen trekken uit het tracerexperiment moeten bovenstaande resultaten gecombineerd worden. Tabel b1 in Bijlage 3 is een overzichtstabel van de resultaten en Fig. b1 in Bijlage 1 een overzicht van de ligging van de onttrekkingsfilters op de locatie. Tevens moet een koppeling gemaakt worden met de reinigingsresultaten van de sanering.

Opvallend is dat de onttrekkingen die bij elkaar in de buurt staan ongeveer dezelfde resultaten te zien geven. Ten oosten van de bedrijfswoning vond over het algemeen snel doorbraak plaats; kort na aanvang van het experiment begon de concentratie op te lopen en de tijd tot doorbraak is korter dan verwacht werd. In de onttrekkingen tussen de bedrijfswoning en het tankeiland begon de chlorideconcentratie later op te lopen en werd niet overal doorslag bereikt. Ten westen van het tankeiland werd helemaal geen concentratieverhoging gevonden en waren de debieten per onttrekking laag.

Globaal kan de locatie dus in drie gebiedjes verdeeld worden, waar de resultaten van het tracerexperiment met elkaar overeenkomen. Waarschijnlijk zijn de bodemeigenschappen, zoals doorlatendheid, verschillend in deze drie gebiedjes. Dit betekent dat de bodem zeer heterogeen is; op kleine afstanden bestaan verschillen in bodemtype en -eigenschappen. Dit wordt ondersteund door de boringen die gemaakt zijn voor de start van de sanering, bij het nader onderzoek van de proeflocatie (Verheul et al., 1988).

Uit de tabellen 3 en b1 (Bijlage 3) blijkt dat de ligging van de onttrekking, aan de rand of in het midden van de locatie, invloed heeft op de concentratie waarbij doorbraak optreedt. In het midden van de locatie worden hogere doorbraak-concentraties bereikt. Er wordt dus weinig water uit de omgeving onttrokken. Uitzondering op dit beeld zijn de onttrekkingen 13 en 22, maar deze onttrekkingen liggen in het gebiedje met waarschijnlijk een lagere bodemdoorlatendheid. In put 13 is het onttrekkingsdebiet overigens wel hoog.

In de onttrekkingen aan de rand van de locatie zijn de doorbraakconcentraties lager, met uitzondering van onttrekking 3. De invloed van deze onttrekkingen reikt vanzelfsprekend tot buiten de locatie, waar een deel van het opgepompte water vandaan komt, waarin chloride in een lagere concentratie aanwezig is.

De snelle doorbraak, zoals deze optrad bij de onttrekkingen in het gebiedje ten oosten van de bedrijfswoning, wijst op een beperkte doorstroming van de bodem. Al het geïnfiltrerde water stroomt via de kortste banen naar de onttrekkingen.

De doorbraaktijd bij de onttrekkingen aan de rand van de locatie lijkt langer te zijn en de concentratieverhoging per tijdseenheid minder groot, toch treedt waarschijnlijk voorkeurstroming op. Dit is echter minder duidelijk aan te wijzen doordat een groter deel van het opgepompte water van buiten de locatie afkomstig is.

De onttrekkingen waarbij een snelle doorbraak optreedt, hebben niet alle een gelijk debiet. Bij een hoger debiet zal de invloedstraal van de onttrekking groter zijn. Indien de chlorideconcentratie dan toch in gelijke mate oploopt met de onttrekkingen met de lagere debieten, zal de doorstroming van de bodem beter zijn. Zo heeft onttrekking 8 een lager debiet dan onttrekking 5, terwijl de resultaten als tijdstip van doorbraak, doorbraaktijd en aandeel infiltratiewater vergelijkbaar zijn. Geconcludeerd wordt daarom dat rond onttrekking 5 minder voorkeurstroming voorkomt.

Onttrekking 13 heeft ook een hoog debiet, maar toch is hier geen doorbraak geconstateerd. Voorkeurstroming speelt hier dus een kleinere rol.

In het gebied ten westen van het tankeiland, werd in de daar geplaatste onttrekkingen geen concentratieverhoging gemeten. Het lijkt alsof hier geen water geïnfiltreerd werd. Van deze onttrekkingen had onttrekking 18 een zeer laag debiet.

In de onttrekkingen 23 en 24 wordt als beginconcentratie een hogere concentratie gemeten dan in de andere onttrekkingen. Na één dag is de concentratie vrijwel gelijk geworden aan de andere beginconcentraties. Deze hogere concentratie aan het begin wijst erop dat de onttrekkingsfilters buiten werking zijn geweest voor enige tijd, hoewel ze niet dicht zijn gezet zoals andere onttrekkingen. De chlorideconcentratie op de locatie is namelijk hoger geweest dan de concentratie die bij het begin van de tracerproef in het grondwater gevonden werd (zie Scheuter et al., 1995). Doordat geen goede doorstroming plaatsvond met nieuw infiltratiewater, is de chlorideconcentratie hoog gebleven.

De chlorideconcentratie in onttrekking 23 neemt af gedurende het tracerexperiment, terwijl deze in de onttrekkingen 24 en 25 vrijwel constant blijft. Hieruit wordt geconcludeerd dat onttrekking 23 voor een groot deel water uit de omgeving oppompt en 24 en 25 water dat aanwezig is op de locatie. Omdat de concentratie op de laatste dag van het experiment nog steeds daalde ten opzichte van de vorige meting, en dus nog geen evenwicht is bereikt, kan niet berekend worden in welke mate deze put water uit de omgeving onttrekt.

6.1 Koppeling met resultaten reiniging

In Bijlage 1, het overzicht van de locatie met de onttrekkingsfilters en de waarnemingsfilters, zijn tevens de waarnemingsfilters A tot en met K weergegeven, waarin regelmatig benzineconcentraties zijn gemeten.

In de saneringsresultaten werden, net als in de doorslagtijden van de verschillende onttrekkingen, grote verschillen gevonden. In sommige waarnemingsfilters waren de restconcentraties laag, terwijl op enkele andere punten nog hoge concentraties aan benzine in het grondwater gevonden werden (Scheuter et al., in voorbereiding). In waarnemingsfilter B werd in het ondiepe deel nog $4869 \mu\text{g.l}^{-1}$ benzine gevonden, in I $479 \mu\text{g.l}^{-1}$ en in E was de concentratie nog $953 \mu\text{g.l}^{-1}$. In K werd $222 \mu\text{g.l}^{-1}$ aan benzine gevonden, terwijl in de andere filters de concentratie lager was dan $80 \mu\text{g.l}^{-1}$.

De vraag dringt zich op waarom deze grote verschillen tussen de waarnemingsfilters bestaan en waarom op sommige plaatsen nog hoge benzineconcentraties gevonden werden, terwijl in het opgepompte grondwater nauwelijks nog benzine aanwezig was. Ook is reeds zeer veel zuurstof aan de locatie toegevoerd, maar toch zijn de benzinecomponenten op sommige plaatsen niet omgezet door de micro-organismen.

Uit de resultaten van het tracerexperiment is reeds geconcludeerd dat bij een groot deel van de onttrekkingen een beperkte doorstroming van de bodem optreedt. Het geïnfiltreerde water stroomt in zeer korte tijd naar de onttrekkingen en wordt opgepompt, terwijl grondwater dat zich tussen de onttrekkingen bevindt stagnant aanwezig kan zijn. Dit heeft twee gevolgen voor de sanering:

- 1 benzinecomponenten spoelen niet uit;
- 2 geen zuurstoftoevoer en dus ook geen mineralisatie.

In deze paragraaf worden de saneringsresultaten die gevonden zijn per waarnemingsfilter in verband gebracht met de resultaten van het tracerexperiment. Hierbij moet in het oog gehouden worden dat alleen de filters H, I, J en K op dezelfde diepte afgewerkt zijn ten opzichte van het maaiveld. Omdat de bodem niet homogeen is, is het gecompliceerd deze filters met de andere te vergelijken. Ook wordt rekening gehouden met het feit dat enkele onttrekkingen lange tijd buiten bedrijf geweest zijn en pas weer tijdens het tracerexperiment opengezet zijn.

Tevens worden de resultaten van de verschillende bodembemonsteringspunten hiermee in verband gebracht.

6.1.1 Waarnemingsfilters E, K en H

De waarnemingsfilters E, K en H liggen ten oosten van de bedrijfswoning. Hoewel de concentraties aan verontreiniging zijn afgenomen in de filters E en K, gaat dit erg langzaam. Op de einddatum worden nog steeds te hoge concentraties gevonden. De verhouding tussen de concentraties van de verschillende componenten blijft vrijwel constant; vluchtige componenten verdwijnen dus niet sneller.

De onttrekkingen 3, 5, 9 en 10 liggen in de omgeving van waarnemingsfilter E, waarvan 10 lange tijd dicht heeft gestaan. In al deze onttrekkingen vond snel chloridedoorslag plaats. Geconcludeerd is dat voorkeurstroming optreedt, hetgeen in onttrekking 5 in mindere mate het geval is. Hierdoor wordt de bodem tussen de onttrekkingen niet of nauwelijks doorstroomd; het grondwater dat zich op deze plaatsen bevindt, is stagnant. Vandaar dat het verwijderingsproces van de verontreiniging in dit waarnemingsfilter zo langzaam verloopt.

Deze verklaring kan ook toegepast worden op waarnemingsfilter K. In dit filter worden ook nog te hoge concentraties gevonden. Dit filter staat buiten de locatie en is half omgeven door onttrekkingen die snel doorslaan.

Filter H ligt op korte afstand van filter E. Onttrekking 5, waar minder voorkeurstroming optreedt, laat zijn invloed waarschijnlijk meer gelden in het gebied rond filter H dan rond E. Op deze manier wordt verklaard waarom in H geen hoge concentraties meer gevonden worden.

6.1.2 Waarnemingsfilters I en A

Het verloop in filter I geeft een vreemd beeld te zien. In de eerste periode van de sanering (tot circa 600 dagen na aanvang) werd steeds meer verontreiniging aangetroffen op dit waarnemingspunt. Hierna bleven de concentraties min of meer constant. Pas na ongeveer 1800 dagen trad een daling op. Op een diepte van 800 cm-maaiveld heeft deze daling zich sterker ingezet dan op 450 cm-maaiveld.

Waarnemingsfilter I is omgeven door de onttrekkingen 11, 13, 21 en 22, waarvan 11 en 21 niet werken, 13 een normaal beeld laat zien en 22 slechts een zeer klein debiet onttrekt. Deze onttrekkingen stonden overigens allemaal dicht voor aanvang van het tracerexperiment. Van de onttrekkingen die open stonden, lagen 20, 23, 24 en 25 het dichtst bij filter I. Uit het tracerexperiment bleek echter dat 23 en 24 lange tijd buiten werking zijn

geweest. Het is niet waarschijnlijk dat de onttrekkingen 20 en 25 grondwater uit het gebied rond waarnemingsfilter I oppompten.

Toch worden in de filters I2 en I3, op respectievelijk 450 en 350 cm-maaiveld, incidenteel hoge zuurstofconcentraties gevonden (Scheuter et al., in voorbereiding). Ook is de concentratie aan koolstofdioxyde vrijwel gelijk aan die in de filters H, J en K gevonden wordt. Mogelijk traden dus toch biologische omzettingen op. Een hoge zuurstofconcentratie wijst op doorstroming van de grond.

Tijdens het tracerexperiment spoelt via onttrekking 22 benzine uit. Indien deze onttrekking niet dicht was gezet, waren de concentraties in I waarschijnlijk lager geweest. Indien meer onderhoud aan de onttrekkingen gepleegd was zodat onder andere 11 en 21 in bedrijf gehouden waren, was waarschijnlijk ook een beter resultaat behaald.

De restconcentraties aan verontreiniging op 450 cm-maaiveld in waarnemingsfilter A, die slechts op zeer kleine afstand van I ligt, zijn zeer laag in vergelijking met filter I. De verschillen kunnen op zeer kleine afstand dus erg groot zijn.

Onttrekking 13 ligt dicht bij waarnemingsfilter A. Reeds voordat deze onttrekking dichtgezet is, waren de concentraties in het ondiepe deel bij A laag geworden. De invloed van deze onttrekking reikte waarschijnlijk niet tot I. Dit is de enige verklaring die aangevoerd kan worden voor het grote verschil tussen beide filters.

6.1.3 Waarnemingsfilter B

Waarnemingsfilter B ligt ten westen van het tankeiland. Slechts vier maal tijdens de sanering zijn monsters genomen van waarnemingsfilter B. De eerste keer gebeurde dit op dag 897.

De benzineconcentratie in deze waarnemingsfilter stijgt gedurende de sanering. Zelfs de concentratie aan vluchtige verbindingen zoals BTX en ethylbenzeen is op dag 2207 hoger dan bij een eerdere meting op dag 1765 (zie Scheuter et al., in voorbereiding).

In de omgeving van dit waarnemingsfilter liggen de onttrekkingen 18, 19, 22, 23, 24 en 25. Onttrekking 19 was niet meer aangesloten ten tijde van het tracerexperiment. De onttrekkingen 18 en 22 zijn lange tijd dicht gezet en een paar dagen voor de tracerproef weer in gebruik genomen. De onttrekkingen 23 en 24 hebben gedurende de hele saneringsperiode open gestaan, maar zijn enige tijd buiten werking geweest. Het is niet bekend hoelang de onttrekkingen stil gestaan hebben, maar er werd pas weer water opgepompt nadat voor het begin van het experiment onderhoud gepleegd was.

In het onttrokken water van de putten 18 en 22 is benzine aanwezig, olfactorisch duidelijk waarneembaar. Rond waarnemingsfilter B is dus nog verontreiniging aanwezig, van waaruit nalevering plaats kan vinden. Was eerder onderhoud gepleegd aan het onttrekkingssysteem in de directe omgeving van filter B, dan had waarschijnlijk meer verontreiniging verwijderd kunnen worden.

In de monsters van de onttrekkingen 23, 24 en 25 werd geen benzine geroken. Op grond van het tracerexperiment wordt betwijfeld of de invloed van deze onttrekkingen tot aan filter B reikt.

6.1.4 Bodem

De verontreiniging die aan de bodemdeeltjes geadsorbeerd is, laten een heel andere verdeling over de locatie zien dan de verontreiniging in de waarnemingsfilters. Worden in het grondwater random hoge concentraties gevonden, de gehalten in de bodem vertonen enige samenhang.

In het centrum van de oorspronkelijke verontreinigingsvlek worden de hoogste gehalten gevonden. Naar buiten toe, worden de gehalten aan verontreiniging lager.

De waarnemingspunten Z1, Z2, Z3 en X18 liggen in het midden van de locatie waar nog hoge gehalten gevonden worden. Op Z5, die naast waarnemingsfilter E ligt, zijn de gehalten het hoogst.

Waarnemingspunt X16 ligt aan de rand van de verontreinigingsvlek, net als Z4. Hier worden al geruime tijd lage gehalten gevonden.

Opvallend is dat in het midden van de locatie nog steeds de hoogste gehalten gevonden worden. Juist hier hebben de onttrekkingen enige tijd stil gelegen, waarschijnlijk vanaf juli 1993 na ongeveer 1200 dagen.

In onderstaande figuren wordt het benzinegehalte op de Z-punten in het midden van de locatie en op X18 (Fig. 4a) en aan de rand van de locatie (Fig. 4b) als functie van de tijd gegeven.

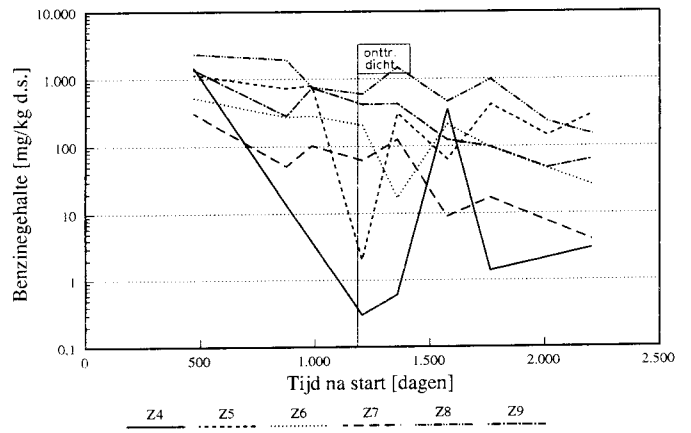
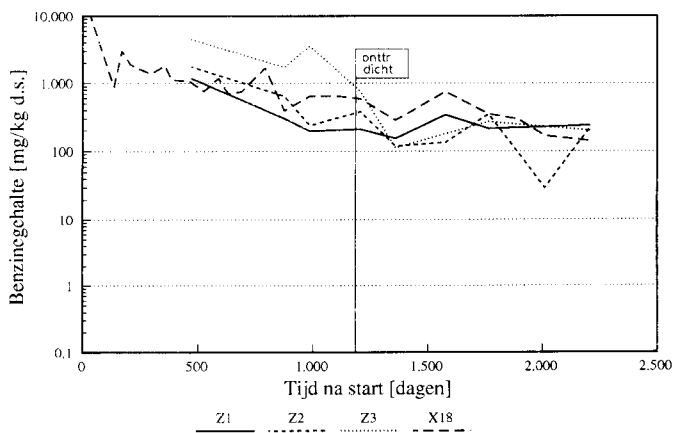


Fig. 4a,b Verloop benzine-gehaltenes als functie van de tijd in de waarnemingspunten in het midden van de locatie (Z1, Z2, Z3 en X18) en aan de rand (Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 en Z9).

Uit Fig. 4 blijkt dat de gehaltenes in de waarnemingspunten in het centrum van de locatie niet veel meer afnemen vanaf dag 1400. Van X18 is alleen het gehalteverloop van 300 tot 350 cm-maaiveld weergegeven. In de andere lagen daalt het gehalte wel langzaam verder. Het stilleggen van de onttrekkingen lijkt als gevolg te hebben gehad dat het verwijderingsproces in het midden van de locatie vrijwel tot stilstand is gekomen. Op de andere waarnemingspunten dalen de gehaltenes verder, met uitzondering van Z5. Waarnemingspunt Z5 ligt echter in de buurt van filter E. Uit het tracerexperiment is geconcludeerd dat de directe omgeving van filter E slechts zeer beperkt doorstroomd werd. Dit had dus ook tot gevolg dat de bodemgehaltenes hier slechts weinig verlaagd werden.

7 CONCLUSIES

De belangrijkste reden om een tracerexperiment op de locatie uit te voeren, was om te onderzoeken of voorkeurstroming optrad. Dit zou enorme consequenties hebben voor het verloop van de sanering, de saneringsduur, en de manier waarop benzine verwijderd wordt. Door koppeling van de resultaten van het tracerexperiment met de restconcentraties in de peilfilters, wordt duidelijk waarom op sommige plaatsen nog hoge concentraties gevonden worden en op andere lage. Ditzelfde geldt voor de bodemgehaltenes.

Ten aanzien van de uitvoering van het experiment wordt geconcludeerd:

- chloride is een uitstekende tracer;
- de tijd waarin extra chloride gedoseerd is, was voldoende lang;
- de concentratie waarmee chloride gedoseerd werd, was voldoende hoog;
- door onderhoud aan het onttrekkingssysteem kon het infiltratiedebiet omhoog gebracht worden tot circa $70 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$ en het ondiepe onttrekkingsdebiet tot $95 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$.

Ten aanzien van de resultaten wordt geconcludeerd:

- grote spreiding in resultaten, globaal te verdelen in drie groepen: ten oosten van de bedrijfswoning snelle doorbraak, tussen bedrijfswoning en tankeiland minder snelle doorbraak, ten westen van het tankeiland geen concentratieverhoging na 312 uur;
- het berekende concentratieverloop komt slechts in enkele gevallen overeen met het gemeten concentratieverloop;
- de onttrekkingsdebieten per filter verschillen: hoogste debiet $8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$, laagste $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{dag}^{-1}$;
- aan de rand van de locatie in circa 30% van het opgepompte water afkomstig van buiten de locatie, in het midden ongeveer 5%;
- alleen water uit de directe omgeving van de onttrekkingen wordt opgepompt (steile afpompingskegels);
- bij die onttrekkingen met een snelle chloridedoorbraak treedt voorkeurstroming op, dat wil zeggen dat slechts een beperkt deel van de bodem doorspoeld wordt;
- de infiltratiedrains in het gebied ten westen van het tankeiland werkten waarschijnlijk niet meer (vanwege verstopping/verzanding).

Ten aanzien van de koppeling met resultaten reiniging wordt geconcludeerd:

- in de waarnemingsfilters E en K worden nog hoge benzineconcentraties gevonden vanwege voorkeurstroming waardoor het grondwater rond deze filters stagnant aanwezig is;
- de onttrekkingen rond filter I hebben lange tijd dicht gestaan of werkten niet waardoor de concentraties aan verontreiniging niet afgenomen zijn;
- in het gebied rond filter B werd waarschijnlijk geen water geïnfiltrerd en werkten de onttrekkingen niet optimaal;
- in het midden van de locatie werden de hoogste verontreinigingsgehaltenes in de bodem gevonden; deze zijn sinds het dichtzetten van de onttrekkingen in het midden niet veel meer afgenomen, waarschijnlijk als gevolg hiervan;
- omdat de invloed van de onttrekkingen niet ver reikt, is het een verkeerde beslissing geweest de onttrekkingen in het midden van de locatie dicht te zetten.

LITERATUUR

M.Th. van Genuchten en W.J. Alves (1982), Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation, U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1661.

M.Th. van Genuchten (1986), Program EXACT, Analytical Solution of the Advection-Diffusion Equation, Unpublished Manuscript.

A.J. Scheuter, D. Wever, R. van den Berg, J. Baltussen en M. Kluivers (1995), Interimrapportage praktijksanering "In situ biorestauratie" te Asten, RIVM-rapportnr. 715201005.

A.J. Scheuter, R. van den Berg, D. Wever (1997), Eindrapportage praktijksanering "In situ biorestauratie" te Asten, Evaluatie van de technische en financiële haalbaarheid, RIVM-rapportnr. 715201008.

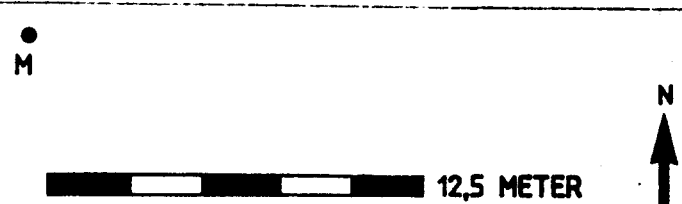
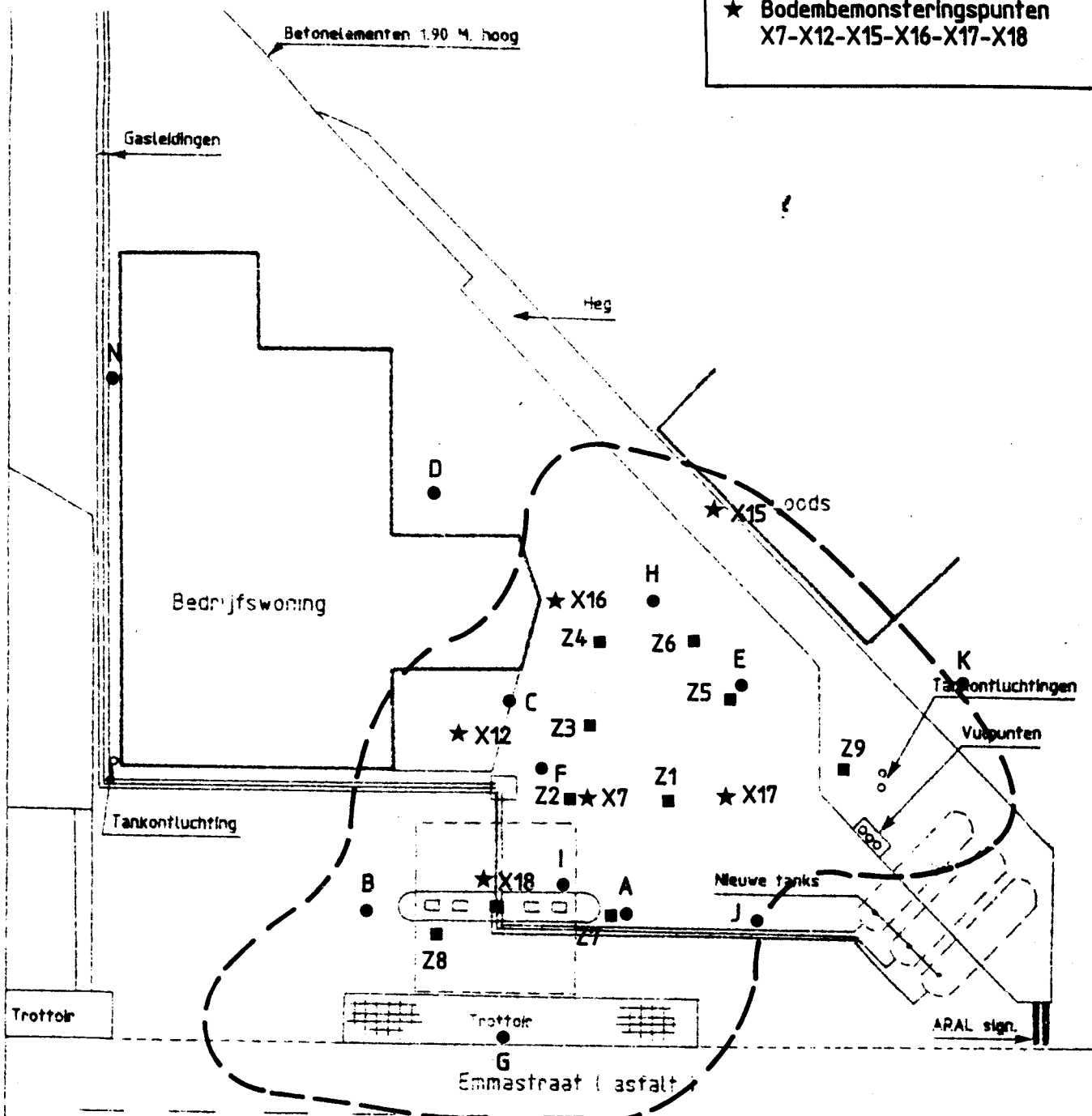
E.J.M. Veling (1991), FLOP3N - Pathlines in Three-Dimensional Groundwater Flow in a System of Homogeneous Anisotropic Layers, RIVM-rapportnr. 719106001.

J.H.A.M. Verheul, D.H. Eikelboom en R. van den Berg (1988), In situ biorestauratie van een met olie verontreinigde bodem. Selectie, beschrijving en nader onderzoek van de proeflocatie, RIVM-rapportnr. 728518001.

D. Wever, J. Baltussen, J. Bierling, en R. van den Berg (1993), Interimrapportage praktijksanering "In situ biorestauratie" te Asten, RIVM-rapportnr. 715202001.

BIJLAGE 1 Overzicht locatie

- Legenda:**
- Peilbuizen A t/m M
L: gelegen achter nissenhut
 - Extra bodembemonsteringspunten Z1 t/m Z9
 - ★ Bodembemonsteringspunten X7-X12-X15-X16-X17-X18



<p>IWACO</p> <p>Adviesbureau voor water en milieu Postbus 525 5201 AM 's-Hertogenbosch Stationsplein 21-22 's-Hertogenbosch Tel: 073 874111 Fax 120726</p>	<p>Project IN-SITE BIORESTAURATIE ASTEN</p>		<p>Rapport 331.9740</p>	
	<p>Opdrachtgever R.I.V.M.</p>	<p>Beleker T.A.</p>	<p>Graden</p>	<p>Datum 09-12-92</p>
	<p>LOCATIE PEILBUIZEN + CONTOURLIJN VERONTREINIGING +</p>			
	<p>PUNTEN BODEMMONSTERS</p>			

BIJLAGE 2 Resultaten tracerexperiment

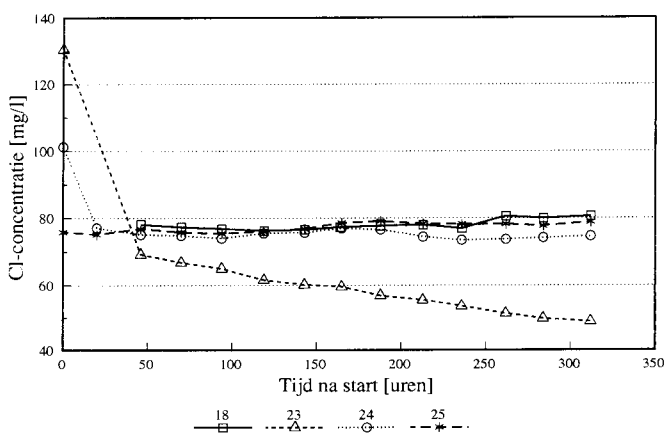
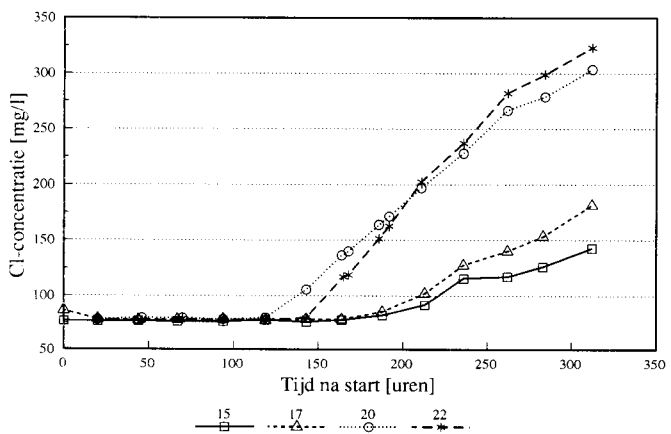
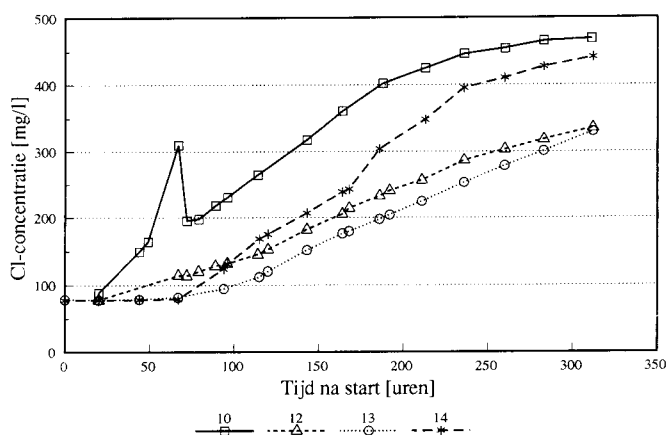
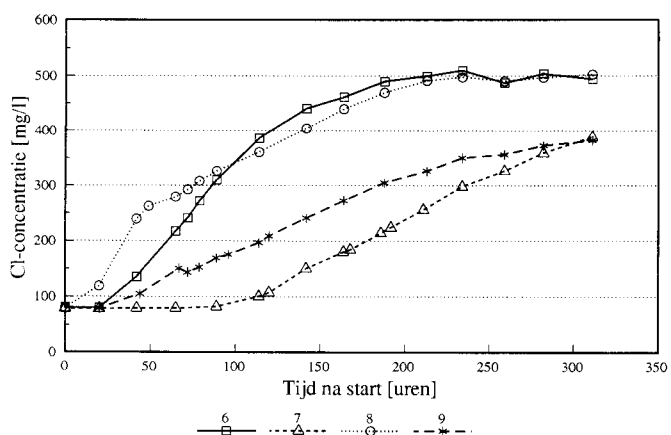
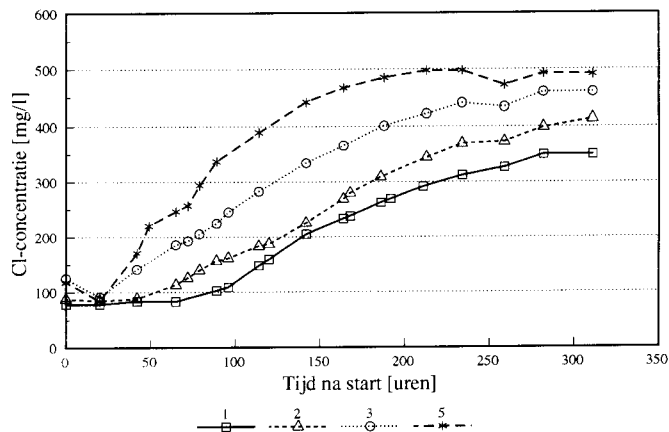
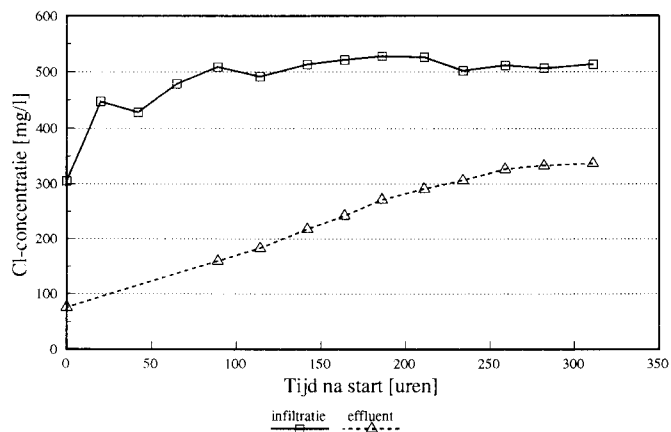


Fig. b1a,b,c,d,e,f Verloop chlorideconcentratie als functie van de tijd in het infiltratiewater, de ondiepe onttrekking en de onttrekkingsfilters 1 tot en met 25.

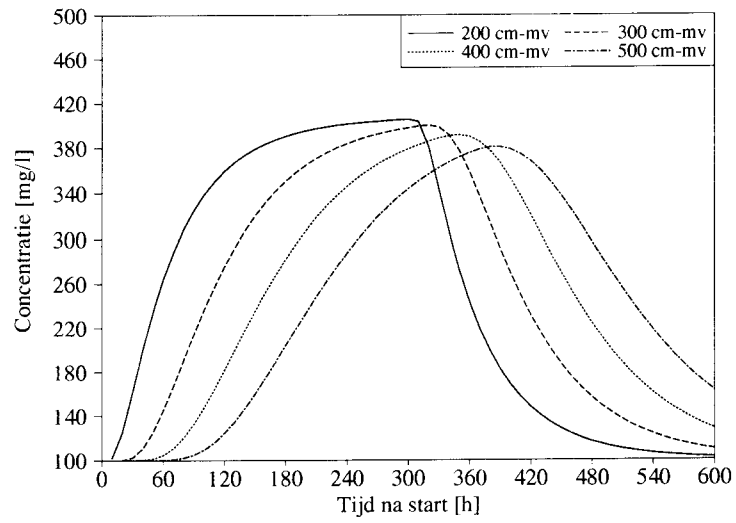


Fig. b2 Het berekende concentratieverloop met behulp van EXACT op vier dieptes in de bodem.

BIJLAGE 3 Overzichtstabel resultaten**Tabel b1.** Overzicht resultaten tracerexperiment voor de verschillende onttrekkingen.

Onttrekking	Vóór start	Start conc. verhoging [h]	Tijdstip doorbraak [h]	Doorbraak-tijd [h]	Max. conc. [mg.l ⁻¹]	Debiet [m ³ .dag ⁻¹]	Aandeel infiltratie [%]	In monsters	Ligging
1	open	125	260	140	350,3	3,5	66		rand
2	open	70	260	190	412,7	5,3	78		rand
3	open	40	230	190	459,1	5,8	85		rand
5	open	40	190	150	497,1	8,5	94		midden
6	open	40	190	150	509,9	6,2	96		midden
7	open	125	-	> 185	388,0	4,1	-		rand
8	dicht	20	190	170	502,3	4,5	95		midden
9	open	70	280	210	382,0	3,6	69	biomassa	rand
10	dicht	40	230	190	468,9	7,3	91	benzine	midden
12	open	70	310	240	335,4	5,6	62		rand
13	dicht	125	-	> 185	329,9	7,8	-		midden
14	dicht	90	230	140	441,7	4,9	82		midden
15	dicht	235	-	> 75	142,8	4,9	-		rand
17	dicht	235	-	> 75	181,4	6,4	-		rand
18	dicht	-	-	-	80,6	1,9	-	benzine	rand
20	open	165	-	> 145	303,4	3,6	-		rand
22	dicht	165	-	> 145	323,2	2,0	-	benzine	midden
23	open	-	-	-	130,4	3,2	-		rand
24	open	-	-	-	101,2	3,3	-		rand
25	open	-	-	-	79,1	4,0	-		rand

BIJLAGE 4 Theorie simulaties

In Par. 3.2 wordt de differentiaalvergelijking gegeven, die de concentratieverandering beschrijft als functie van zowel advectieve stroming als dispersie. Voor de oplossing van deze differentiaalvergelijking is een concentratie C_0 als randvoorwaarde opgelegd. De randvoorwaarde luidt:

$$\begin{aligned} C(0,t) &= C_0 & 0 < t < t_0 \\ C(0,t) &= 0 & t > t_0 \end{aligned}$$

Door als randvoorwaarde een concentratie te nemen, wordt echter niet gegarandeerd dat er vanaf $z=0$ ook een massaflux ter grootte van vC_0 de kolom in gaat. Er wordt namelijk niet tegengegaan dat op $z=0$ al een dispersieflux tegengesteld aan de advectieve stroming is. Om een massaflux van vC_0 te garanderen bij het intreden van de kolom kunnen beter de volgende randvoorwaarden gebruikt worden:

$$\begin{aligned} \left(-D \frac{\partial C}{\partial z} + vC\right) \Big|_{z=0} &= vC_0 & 0 < t < t_0 \\ \left(-D \frac{\partial C}{\partial z} + vC\right) \Big|_{z=0} &= vC_0 & t > t_0 \end{aligned}$$

De oplossingen van de differentiaalvergelijking met de verschillende randvoorwaarden hebben alle de volgende vorm:

$$\begin{aligned} C(z,t) &= C_i + (C_0 - C_i)A(z,t) & 0 < t < t_0 \\ C(z,t) &= C_i + (C_0 - C_i)A(z,t) - (C_0 - C_i)A(z,t-t_0) & t > t_0 \end{aligned}$$

In de oplossing die in Par. 3.2 gebruikt is, is $A(z,t)$:

$$A(z,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{z-vt}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

De oplossing die uitgaat van bovengenoemde randvoorwaarde is ingewikkelder; $A(z,t)$ ziet er dan als volgt uit (Van Genuchten en Alves, 1982):

$$A(z,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{z-vt}{2\sqrt{Dt}} \right] + \sqrt{\frac{v^2 t}{\pi D}} \exp \left[-\frac{(z-vt)^2}{4Dt} \right] - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{vz}{D} + \frac{v^2 t}{D} \right) \exp \left(\frac{vz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{z+vt}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

Deze oplossing is in het Fortran-programma EXACT (Van Genuchten, 1986) geprogrammeerd, zodat de concentratie als functie van plaats en tijd eenvoudig berekend kan worden.

Tijdens de eerste tracerproef was het infiltratiedebiet ongeveer $33 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$, er werd gedurende 10 uur met een concentratie van 250 mg.l^{-1} chloride geïnfiltrerd, terwijl de concentratie op de locatie 100 mg.l^{-1} bedroeg. Het vochtgehalte wordt gesteld op 25% (niet volledig verzadigd) en de dispersiviteit, α_L , wordt gesteld op 0,25 m.

Fig. b3a geeft het resultaat van de berekening met het programma EXACT voor 6 verschillende dieptes in de bodem. In Fig. b3b wordt het concentratieverloop op 4 dieptes in de bodem weergegeven indien de dosering gedurende 300 uur voortgezet zou zijn.

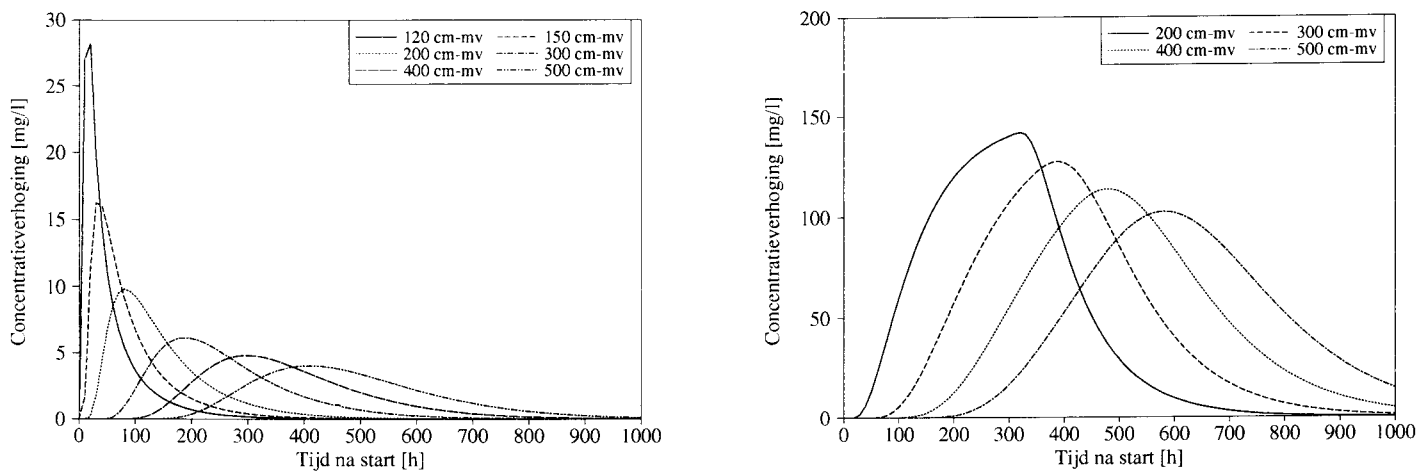


Fig. b3a,b Concentratieverhoging op verschillende diepten indien de infiltratie van 250 mg.l^{-1} gedurende 10 uur en 300 uur voortgezet wordt.

Uit Fig. b3a blijkt dat in de onttrekkingsfilters een concentratieverhoging van ongeveer 4 mg.l^{-1} zou kunnen optreden. Deze verhoging is, mede doordat meer grondwater onttrokken dan geïnfiltrerd wordt, niet te meten. Alleen op een diepte van 20 tot 50 cm onder de infiltratiedrain treden respectabele concentratieverhogingen op.

Bij dosering gedurende 300 uur zou de concentratieverhoging in de onttrekkingen maximaal 102 mg.l^{-1} zijn, deze treedt echter pas na 580 uur (24 dagen) op. Na 14 dagen zou slechts een verhoging van ongeveer 25 mg.l^{-1} te meten zijn.

De volgende figuren geven de concentratieverhoging als functie van de tijd indien chloride met 350 mg.l^{-1} gedoseerd zou worden bij een infiltratiedebiet van $33 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$ en bij een infiltratiedebiet van $70 \text{ m}^3.\text{dag}^{-1}$.

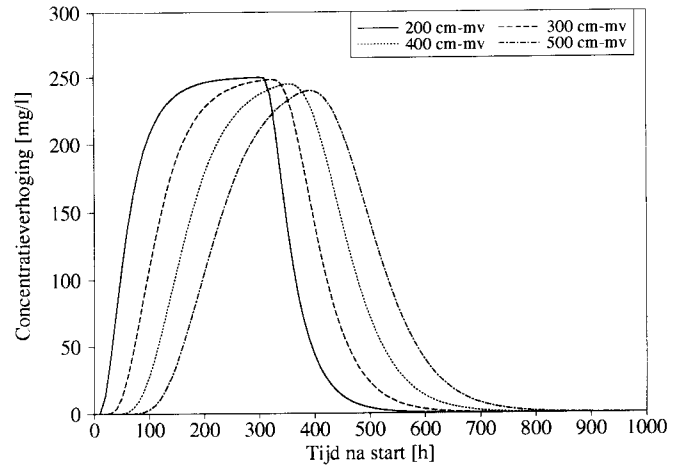
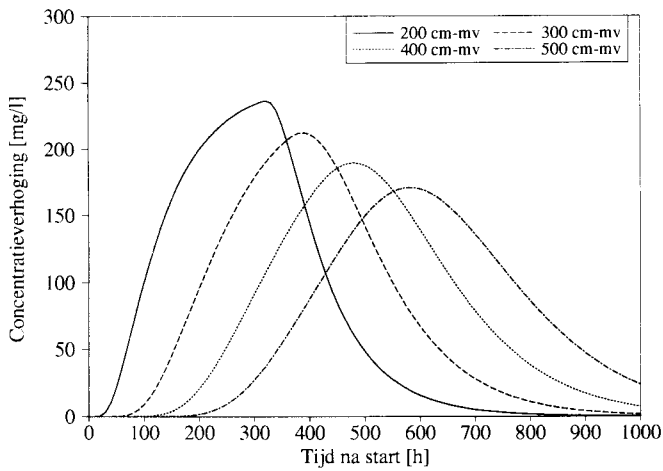


Fig. b4a,b Concentratieverhoging op verschillende diepten bij een debiet van 33 m³.dag⁻¹ en 70 m³.dag⁻¹.

Uit bovenstaande figuur blijkt dat bij een hoger debiet de chloride sneller doorslaat; de concentratieverandering per tijdseenheid is groter en in een kortere tijd wordt de chloride naar 5 m-maaiveld getransporteerd. Door het hogere debiet heeft dispersie een kleinere invloed op het transport van de chloride.

BIJLAGE 5 Berekening stroombanen tijdens sanering

Tijdens de sanering waren zowel het infiltratie- als het onttrekkingsdebiet het grootste deel van de tijd kleiner dan die ingesteld tijdens het tracerexperiment. De resultaten van het experiment kunnen daardoor een enigszins vertekend beeld geven van de invloed van de individuele onttrekkingsfilters tijdens de sanering. Daarom zijn de stroombanen ook berekend bij het gemiddelde onttrekkingsdebiet gedurende de hele sanering.

In onderstaande figuur wordt een bovenaanzicht gegeven van de stroombanen rond de onttrekkingen bij het gemiddelde onttrekkingsdebiet tijdens de sanering. Aangenomen is dat alle onttrekkingen in werking waren met een constant debiet gedurende de gehele saneringstijd. De debieten van de afzonderlijke onttrekkingen zijn alle even groot.

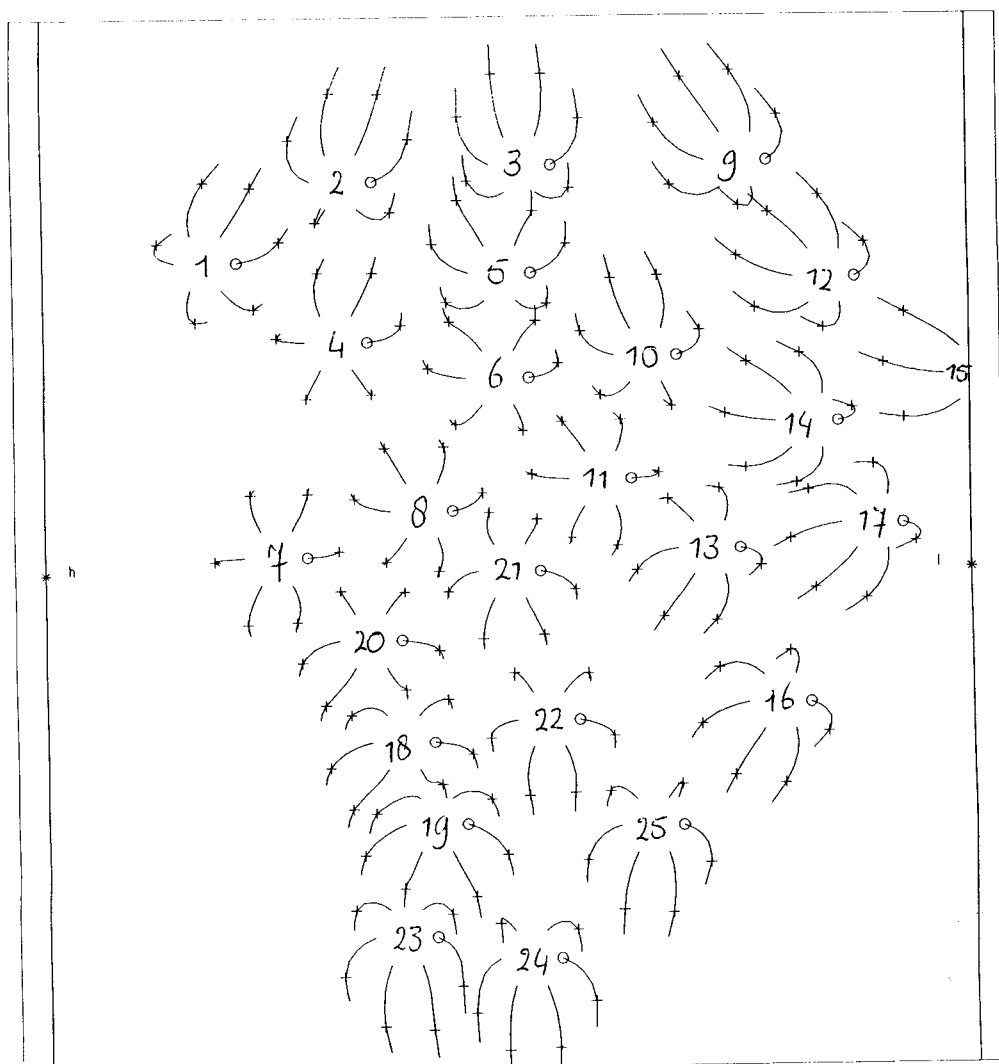


Fig b5. Stroombanen rondom de onttrekkingen tijdens de sanering.

Alle stroombanen bereiken het oppervlak tussen 16,5 en 18,3 dagen, dat is sneller dan bij het grotere debiet tijdens het tracerexperiment. Er zijn geen grote verschillen in de tijden omdat de debieten voor alle onttrekkingen gelijk zijn. Bovendien is er nauwelijks interactie tussen de onttrekkingen. Hierdoor is het aantal plaatsen tussen de onttrekkingen waar geen stroombanen lopen ook groter dan bij hogere debieten en meer concurrentie tussen de onttrekkingen.

Op het plaatje lijkt het alsof sommige stroombanen al na ongeveer 10 dagen het oppervlak bereiken, terwijl andere banen bijna de 20 dagen bereiken. Het is echter op dit plaatje niet te zien dat de stroombanen recht naar boven lopen.

Aan het begin van het tracerexperiment stonden de onttrekkingen in het midden van de locatie dicht of waren afgekoppeld (zie Hst. 4), waarschijnlijk vanaf juli 1993.

De stroombanen komen vanaf dit tijdstip dus niet meer overeen met de berekende banen uit Fig. b5. Het totale debiet bleef echter wel ongeveer constant; het debiet per onttrekking was dus groter. Waarschijnlijk hebben de stroombanen van de onttrekkingen aan de rand zich dus verder uitgestrekt en duurde het langer voordat zij het infiltratieoppervlak bereikten. Doordat de putten aan de rand voor een deel water uit de omgeving onttrekken, heeft dit waarschijnlijk tot gevolg gehad dat minder grondwater van de locatie onttrokken is. De stroombanen hebben waarschijnlijk niet de hele locatie omvat, waardoor een deel van het grondwater op de locatie stagnant aanwezig was. Op deze plaatsen werd geen benzine meer uitgespoeld. In verhouding werd meer water vanuit de omgeving onttrokken, waardoor benzineconcentratie in het opgepompte water lager is geworden door verdunning.

