
De tri-verontreiniging bij Hilversum

Een kwestie van DNAPL's

Hans Peter Broers
Eduard van Duffelen

Stoffen als tri en per kunnen als zware, dichte vloeistof door meerfasenstroming in diepere aquifers binnendringen. Stoffen met deze eigenschappen worden DNAPL's genoemd. Voor de tri-verontreiniging waarmee waterleidingbedrijven in de omgeving van Hilversum sinds 1977 kampen is nagegaan of de aanwezigheid van pure tri in de ondergrond als bron van de problemen fungeert. Op grond van concentratiegegevens uit de grondwatermeetnetten en uit de interceptieputten is aannemelijk gemaakt dat dit inderdaad het geval is en dat de verontreinigingsbron tot een diepte van 50 m is weggezakt. Uit reacties van het concentratieverloop op veranderingen in de grondwaterstromingsrichting kon de positie van de ondergrondse bron beter worden geschat. Het verdient aanbeveling in het grondwaterbeschermingsbeleid speciale aandacht te besteden aan het verspreidingsgedrag van DNAPL's.

Inleiding

In 1977 werd door Gemeentewaterleidingen Amsterdam (GWA) ontdekt dat het opgepompte grondwater op het pompstation Westerveld bij Hilversum was verontreinigd met trichlooretheen (tri). Na een inventariserend hydrologisch onderzoek werd een interceptie-systeem geïnstalleerd om de drinkwaterproductie veilig te stellen (Van den Akker 1978, Schuurmans 1978). Twee interceptieputten stroomopwaarts van de winning vingen sinds 1980 het met tri verontreinigde water af. Als wellicht eerste integraal waterbeheerproject in Nederland werd het bovengronds gezuiverde water gebruikt om de Laarder Waschmeren op peil te houden. Na sluiting van de GWA-winning te Westerveld is de interceptie door Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN) overgenomen ter bescherming van de winplaats Laren. Voor dat doel werden de interceptieputten verplaatst naar het noordoosten.

Ten tijde van de installatie van het interceptiesysteem werd aangenomen dat het systeem ongeveer 15 jaar dienst zou moeten doen, waarna de verontreinigingsvlek zou zijn opgeruimd. De concentraties in het door de interceptieputten opgepompte water namen in die periode echter nauwelijks af. Uit onderzoek buiten de landsgrenzen bleek eind jaren '80 dat trichlooretheen zich gedraagt als een zogenaamde DNAPL: een Dense Non-Aqueous

Hans Peter Broers werkt in deeltijd bij het Interfacultair Centrum Hydrologie Utrecht (ICHU), Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht, Postbus 80021, 3508 TA Utrecht en bij het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Postbus 6012, 2600 JA Delft, e-mail: hpbroers@earth.ruu.nl en h.broers@nitg.tno.nl.

Eduard van Duffelen verrichtte de DNAPL-studie als stage in het kader van de studie Fysische Geografie aan de Universiteit Utrecht. Hij werkt tegenwoordig bij Arcadis Heidemij Advies BV, Zuiderparkweg 284, Postbus 1018, 5200 BA 's-Hertogenbosch, telefoon: (073) 680 92 11, fax: (073) 614 46 06, e-mail: e.duffelen@arcadis.nl.

Phase Liquid (Schwille, 1988). DNAPL's zijn stoffen met een grotere dichtheid dan water en die niet met water mengen. Trichlooretheen (tri) en tetrachlooretheen (per) zijn twee van de meest voorkomende DNAPL's. Het onderzoek zorgde voor nieuwe inzichten in de stromingseigenschappen van deze stoffen. Door de slechte mengbaarheid van DNAPL's stroomt de verontreinigende pure vloeistof als gevolg van dichtheidsverschillen naar de diepte. In het licht van deze inzichten is de verontreiniging bij Hilversum opnieuw bekeken (Duffelen, 1996). Het onderzoek was er op gericht te achterhalen of er in het geval van Hilversum aanwijzingen zijn voor de aanwezigheid van puur produkt in de ondergrond. Vervolgens is geprobeerd te achterhalen op welke diepte en in welk gebied dit pure produkt zich zou kunnen bevinden.

Dienepfels?

De problematiek van DNAPL-verontreinigingen heeft met name te maken met de fysische en chemische eigenschappen van de stoffen. Van belang zijn het soortelijk gewicht (tri: 1,46 kg/l), de viscositeit (over het algemeen lager dan water), de grensvlakspanning tussen het water en de DNAPL (tri: 0,035 N/m) en de zogenoemde 'wettability'. De 'wettability' bepaalt de verdeling van de verschillende vloeistoffen over het medium waarin ze zich bevinden. Aquifers zijn in principe 'water wet': water is in direct contact met het korrel skelet. DNAPL's zijn in het algemeen 'non-wetting' vloeistoffen ten opzichte van water, waardoor zij bij infiltratie in een verzadigd pakket bij voorkeur de grotere poriën zullen opzoeken en het water als film rond de korrels aanwezig blijft. Een infiltrerende DNAPL zal ten gevolge van dichtheidsverschillen neerwaarts stromen. Om het water uit de poriën te verdrijven moet de DNAPL voldoende drukhoogte hebben om de capillaire krachten te overwinnen die het water in de poriën vasthouden. Dit gebeurt in een verticale DNAPL-vinger wanneer er voldoende aanvulling is van bovenaf. De capillaire druk die nodig is om water uit een laag met poriediameter r te verdrijven is gelijk aan:

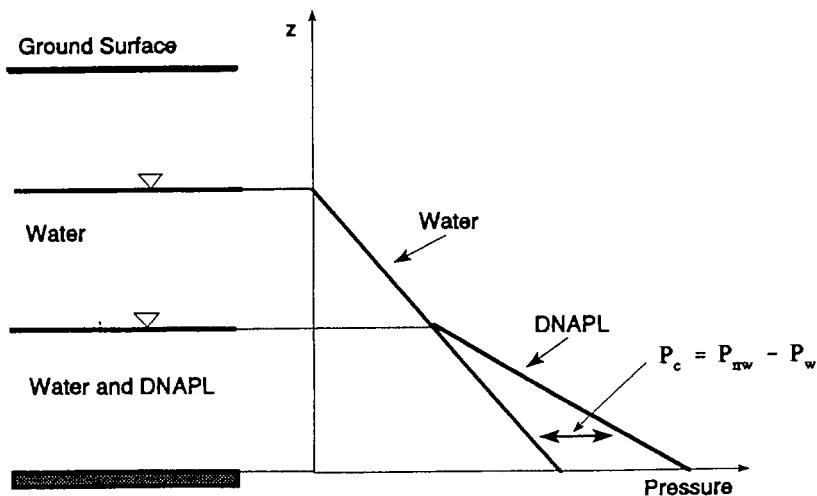
$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}$$

waarin (Bear, 1979):

P_c	=	capillaire druk	[Pa],
σ	=	de grensvlakspanning	[N/m],
θ	=	de contacthoek	[°]
en r	=	de poriestraal	[m].

Hieruit blijkt dat voor het binnendringen van een kleinere porie een evenredig hogere capillaire druk nodig is.

Voor een 'non-wetting' vloeistof die infiltreert in een oorspronkelijk waterverzadigd medium vormt een laag met kleine poriediameter dus een barrière. De infiltrerende DNAPL zal zich boven een dergelijke laag gaan verzamelen waardoor een zogenaamde 'pool' of zinklaag ontstaat (figuur 1).



Figuur 1: De opbouw van de drukhoogte in de verzadigde ondergrond bij een zinklaag (bron: Pankow en Cherry, 1996).

Als er door aanvulling van bovenaf voldoende drukhoogte kan worden opgebouwd, zal een DNAPL uiteindelijk in staat zijn de kleinere poriën binnen te dringen waardoor de zinklaag aan de onderzijde wordt gedraineerd. De vorming van zinklagen is overigens niet beperkt tot heterogene media. Ook in homogene zanden kunnen structuren voorkomen die voor DNAPL-infiltratie belemmerend werken. Zelfs kleine heterogeniteiten maken het voorspellen van de uiteindelijke plaats van puur produkt tot een hachelijke zaak (Kueper & Frind, 1991).

Als de aanvulling van bovenaf stopt, zal op termijn ook de neerwaartse migratie van DNAPL tot een einde komen. Door het leegstromen van poriën neemt namelijk de drukhoogte af totdat de drukhoogte onvoldoende is om de onderliggende 'poriekeel' te passeren. DNAPL die op die manier geïsoleerd achter blijft, wordt restverzadiging genoemd. Deze restverzadiging kan tot 25% van het poriënvolume innemen.

In de DNAPL-terminologie worden zinklagen en restverzadiging gezamenlijk aangeduid als 'puur produkt'. Vanuit de restverzadiging en zinklagen lossen de DNAPL's langzaam op in het grondwater. De stroming van het grondwater zorgt vervolgens voor het transport van de opgeloste stof. Dit proces is nadrukkelijk niet aan dichtheidsstroming onderhevig: de opgeloste gehalten zijn daarvoor te laag. De maximale oplosbaarheid van tri is bijvoorbeeld 1,1 g/l, ofwel 1.100.000 µg/l. Deze relatief lage oplosbaarheid is er de oorzaak van dat het langs stromende grondwater op een verontreinigde locatie tot honderden jaren verontreinigd kan worden (Anderson, 1992). Het gevaar is daarbij dat reeds minimale hoeveelheden van de gechloroerde koolwaterstoffen schadelijk voor de volksgezondheid zijn. De drinkwaternorm voor tri (1 µg/l) ligt honderdduizenden malen beneden de maximale oplosbaarheid van tri in water. In de praktijk wordt in grondwater zelden meer dan 10% van de maximale oplosbaarheid gemeten (110.000 mg/l). Alleen dicht bij de bron van de verontreiniging kunnen hogere concentraties worden aangetroffen. Door de kloof tussen oplosbaarheid en drinkwaternormen kan een relatief kleine bron van puur produkt echter vele duizenden kubieke meters drinkwater onbruikbaar maken.

Aanwijzingen voor de aanwezigheid van puur produkt

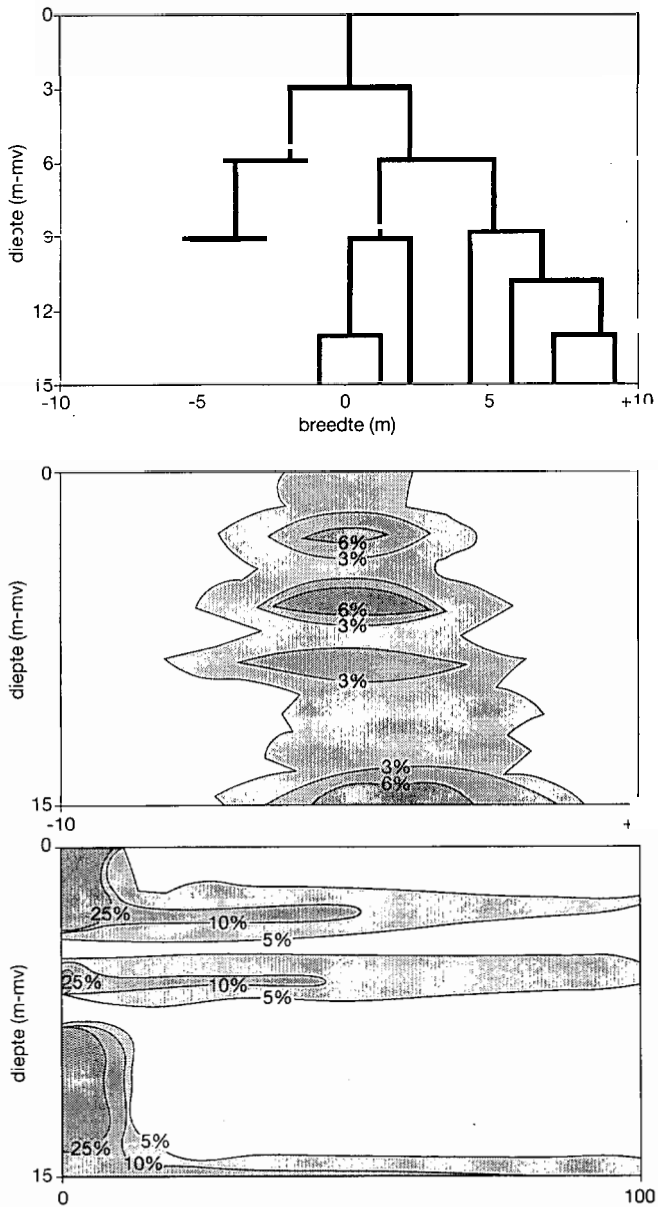
Het verkrijgen van direct bewijs van de aanwezigheid van puur produkt blijkt een lastige opgave en is sterk aan toeval onderhevig (Feenstra, 1994). Het is bovendien gevaarlijk omdat bij het boren in de bronzone zinklagen en daaronder gelegen fijne lagen doorboord kunnen worden waardoor de DNAPL verder de diepte in wordt gestuurd. Een veelbelovender werkwijze is het 'teruginterpreteren' van de mogelijke diepte en verbreiding van een verwachte bronzone met puur produkt vanuit concentraties in de pluimzone. Die benadering is uitgetoet in Hilversum waar een uitgebreide set meetgegevens van de pluim verontreinigd grondwater voorhanden was.

De gekozen werkwijze vereist inzicht in het theoretisch verwachtingspatroon van pluimvorming uit DNAPL-bronzones. Anderson e.a. (1992) beschrijven de ontwikkeling van een pluim verontreinigd grondwater vanuit een gefingerde bronzone. Anderson e.a. hebben in hun model een bronzone gesimuleerd die bestaat uit diverse zogenoemde 'vingers' en zinklagen. Het model geeft na een bepaalde tijd, in een stationaire situatie, een verdeling van de concentraties in het grondwater (figuur 2).

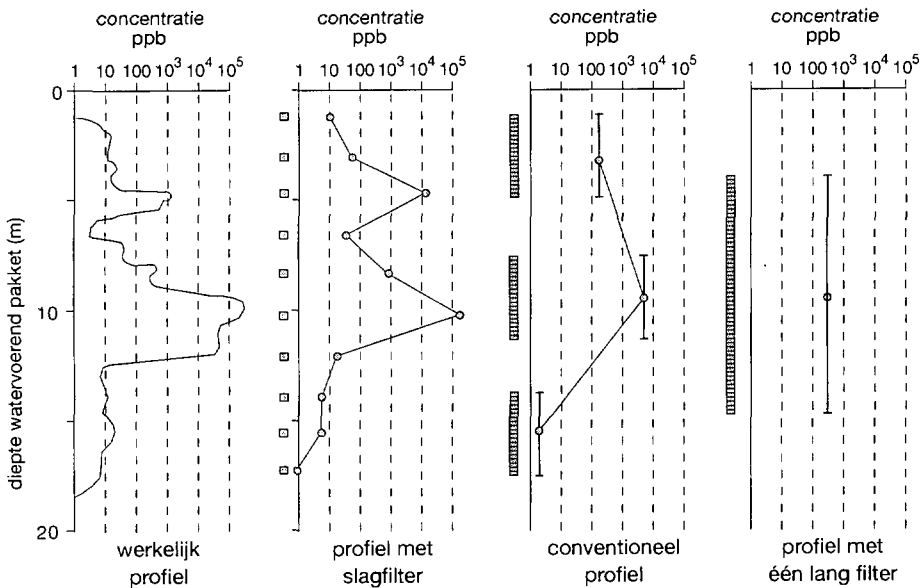
De studie van Anderson e.a. laat zien dat de verdeling van de concentratie opgeloste DNAPL een afspiegeling is van de verdeling van het pure produkt in de bronzone. Algemeen wordt aangenomen dat de hoogte van de concentraties een aanwijzing vormt voor de aanwezigheid van puur produkt in de bronzone. In de Verenigde Staten wordt als vuistregel voor de aanwezigheid van puur produkt een concentratie van 1% van de verzadigingsconcentratie gehanteerd (Feenstra, 1994; US-EPA, 1992). Anderson e.a. simuleerden stroomafwaarts van de bronzone de concentraties in een aantal meetpunten. Opvallend resultaat van die simulatie was dat de gemeten concentraties, ook dichtbij de bronzone, ver beneden de verzadigingsconcentraties liggen: 0,5 tot 5% met 2 meter lange filters.

Het beeld van het concentratieprofiel dat ontstaat, wordt sterk beïnvloed door het aantal en de lengte van de filters in een meetput. Uit figuur 3 is op te maken dat het installeren van (een groot aantal) minifilters of het gebruik van een wegdrukkare bemonsteringssonde een realistische benadering van de werkelijke verticale concentratieverdeling kan opleveren. Voor het herleiden van de diepte van een stroomopwaarts gelegen bronzone heeft een set puntmetingen dan ook de voorkeur. Vanwege het verwachte grillige karakter van de bronzone is de kans op het missen van de dunne verontreinigingspluimen echter groot als zich tussen de puntmetingen een aanzienlijke verticale afstand bevindt. De grootste kans op het aantreffen van de verontreiniging bestaat bij het bemonsteren van een volkomen filter over de gehele diepte van het watervoerend pakket. Voor monitoringsdoeleinden kan een dergelijke filterstelling goed voldoen, maar ze is ongeschikt om de diepte van een stroomopwaarts gelegen bronzone in beeld te brengen.

Bij pompfilters is van een nog sterkere verdunning sprake omdat niet alleen in de verticaal variaties worden uitgemiddeld, maar ook lateraal schoon en verontreinigd water worden gemengd. Als een bronzone bijvoorbeeld loodrecht op de stroombanen 5% van het intrekgebied van een interceptieput inneemt en de dikte van de totale bronzone 20% van de aquiferdikte bedraagt, dan zullen de concentraties in de pompput voor slechts 1% van het opgepompte water uit de bronzone afkomstig zijn. Aannemend dat zich in de bronzone overall grondwater bevindt met een concentratie van 10% van de verzadigingsconcentratie dan kan 0,1% van de verzadigingsconcentratie in het pompfilter worden verwacht. Voor tri komt dat overeen met $0,1\% * 1,1 \text{ g/l} = 1.100 \text{ } \mu\text{g/l}$.



Figuur 2: Opbouw van de bronzone en concentratiecontouren van de pluim voor het gesimuleerde verontreinigingspatroon: a. bronzone, b. concentraties in dwarsdoorsnede en c. concentraties in lengtedoorsnede (bron: Anderson e.a., 1992). Concentratiecontouren in procenten ten opzichte van de verzadigingsconcentratie.



Figuur 3: Meetstrategieën in de pluim van een DNAPL-locatie. Puntmetingen met korte verticale afstand zijn effectief om het verticale concentratieprofiel te karakteriseren. De trekfans van een enkele puntmeting is echter klein. De trekfans wordt verhoogd door het gebruik van langere filters; de kans op een hoge concentratie neemt echter af.

Samenvattend zijn concentraties van minimaal 0,5–5% van de verzadigingsconcentratie in waarnemingsputten en concentraties van minimaal 0,1% in pompputten indicaties voor de aanwezigheid van een zone met puur produkt bovenstrooms.

De snelheid waarmee stof uit DNAPL-zinklagen oplost in het horizontaal langsstromende water is afhankelijk van de verticale dispersiviteit, de oplosbaarheid, de grondwatersnelheid en de lengte van de zinklagen. Johnson en Pankow (1992) komen tot de conclusie dat oplostijden van decennia tot eeuwen reëel zijn voor grote accumulaties van puur produkt. Nalevering vanuit DNAPL-zinklagen is derhalve te beschouwen als een vrijwel continu proces.

Tri-verontreiniging en grondwaterstroming bij Hilversum

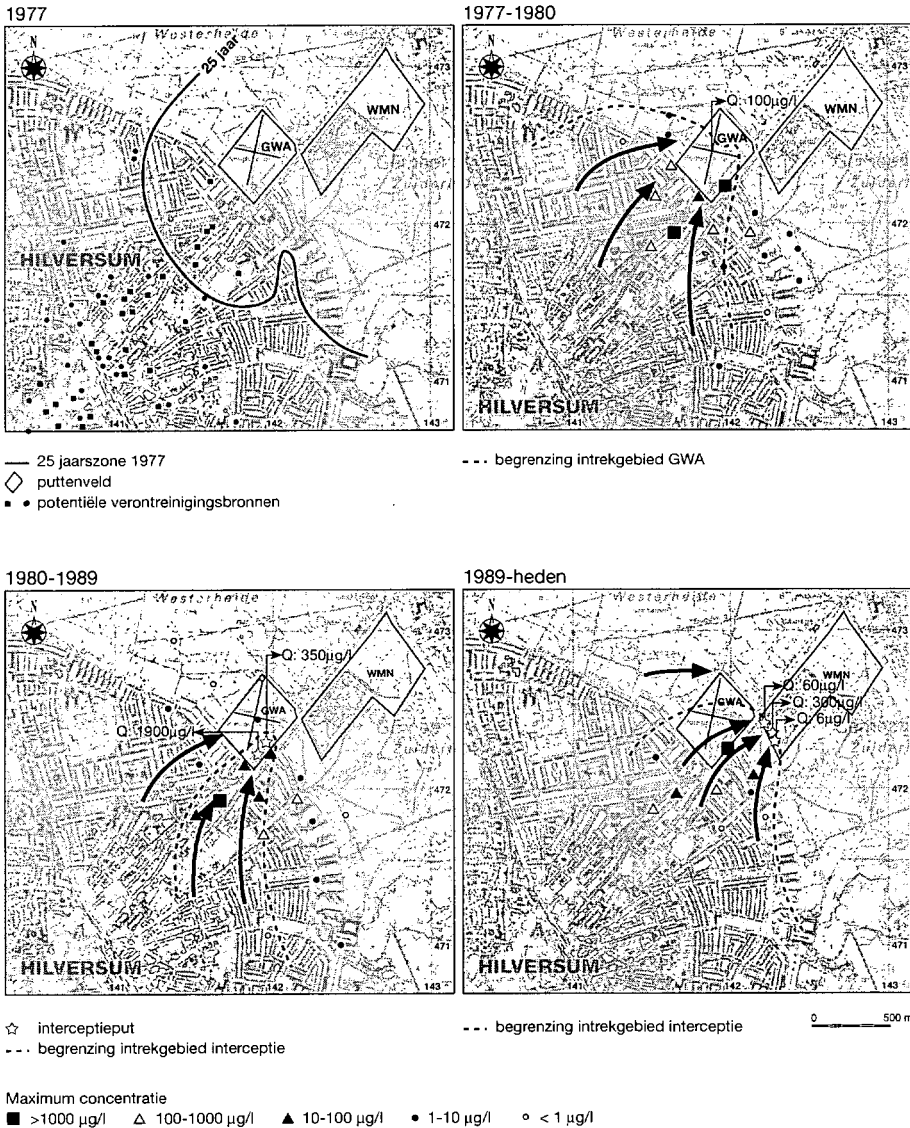
Tri en per zijn uitstekende oplosmiddelen van vuil en vetten. Ze werden dan ook veelvuldig toegepast in chemische wasserijen en galvanische industrieën. Met het opbloeien van de wereldeconomie in de jaren na de Tweede Wereldoorlog is de produktie en het gebruik van deze middelen sterk toegenomen. De toename heeft achteraf gezien een evenredige stijging van het aantal locaties met DNAPL-verontreinigingen tot gevolg gehad. Militaire terreinen, chemische wasserijen en galvanische industrieën zijn in dit opzicht verdachte objecten. De

laatste twee waren in Hilversum overvloedig vertegenwoordigd. Op basis van gegevens van de gemeente Hilversum is een inventarisatie gemaakt van dergelijke potentiële bronnen van de tri-verontreiniging (figuur 4a). Over de hoeveelheden gemorst tri is weinig bekend. In notulen van de 'werkgroep tri-verontreiniging' uit 1977 werd geschat dat bij één specifieke wasserij per jaar zo'n 6.500 kg werd toegepast. Voor een grote industrie in de stad wordt de hoeveelheid geschat op het tienvoudige. Bij een aantal van 100 tri gebruikende bedrijven zou de totale hoeveelheid gebruikt tri per jaar hiermee geschat worden op zo'n 750 ton. Met overtollig tri werd in het algemeen onvoorzichtig omgesprongen. Op veel locaties is sprake van zinkputten, waarin tri en per, eventueel met andere chemicaliën, werden geloosd. Daarnaast werd bij de over- en opslag van tri regelmatig gemorst en kwam volgens overlevering weleens iets in het riool terecht. Met name bij zinkputten en op- en overslagplaatsen is de infiltratie van een mengsel van chemicaliën in pure vorm (dus niet in water opgelost) aannemelijk. Op basis van de gebruikscijfers van tri en per wordt aangenomen dat eventuele grondwaterverontreiniging vanaf het begin van de jaren vijftig kan zijn opgetreden.

Na de ontdekking van het tri-probleem op de winplaats Westerveld werd bij Gemeentewaterleidingen Amsterdam een stromingsmodel opgesteld (Van den Akker, 1978; Schuurmans, 1978). Met het stromingsmodel werd een ontwerp gemaakt voor een systeem dat het met tri verontreinigde water moest onderscheppen. De stromingssituatie zoals die voor 1977 werd vastgesteld is geschetst in figuur 4b. Het op de winplaats Westerveld (GWA) ontrokken grondwater is afkomstig uit zuid- tot westelijke richting en stroomt aan vanuit de bebouwde kom van Hilversum. De bij het stromingspatroon behorende 25-jaarszone is weergegeven in figuur 4a. Als we aannemen dat serieuze tri-verontreiniging pas sinds het begin van de jaren vijftig optrad, dan kunnen alleen verontreinigingsbronnen noordwestelijk van de 25-jaarcontour hebben bijgedragen aan de tri-verontreiniging van de winplaats.

In 1980 werd het interceptiesysteem operationeel met twee putten van samen 0,7 Mm³/jr. Indertijd verwachtte men dat de verontreinigingsvlek na 15 jaar wel zou zijn opgeruimd. Tot 1989 ving het systeem het met tri verontreinigde water effectief af (figuur 4c). In 1990 werd de GWA-winplaats gesloten en werd de interceptie overgenomen door Waterleidingbedrijf Midden-Nederland. Op basis van hernieuwde modelruns werden daartoe 3 nieuwe interceptieputten geplaatst met een totaal debiet van 1,3 Mm³/jr. (figuur 4d).

Uit de figuren 4b t/m d blijkt dat tri-concentraties boven de 100 µg/l voorkomen in een beperkt gebied ten zuiden van winplaats Westerveld. De aangegeven concentraties zijn maxima: er komen sterke fluctuaties voor. De meeste waarnemingsputten hebben 4 filters tussen 20 en 50 m beneden maaiveld. De hoogste tri-concentraties komen in het algemeen voor tussen 25 en 40 m beneden maaiveld. Slechts in één put komen dieper filters voor tot 95 m -mv. In die filters werden geen gehalten boven 10 µg/l gemeten. De hoogste concentratie werd in 1994 gemeten in put 324 op 45 m diepte en bedroeg 7200 µg/l.



Figuur 4: Potentiële verontreinigingsbronnen (a) en globale stromingssituaties voor 3 periodes: 1977-1980 geen interceptie (b), 1980-1989 interceptie GWA (c) en 1990-heden interceptie WMN (d). De maximaal gemeten concentraties tri in de waarnemings- en interceptieputten zijn met symboltjes gemarkeerd (b, c en d).

Puur produkt in Hilversum?

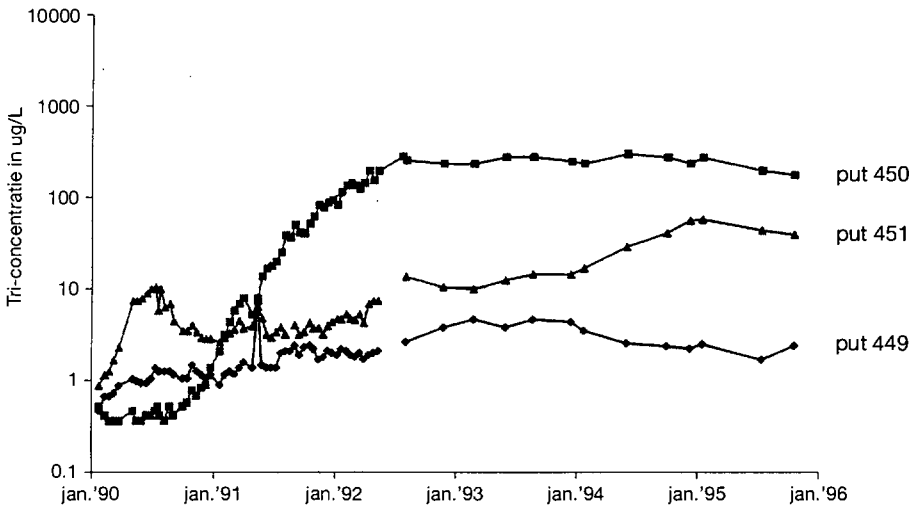
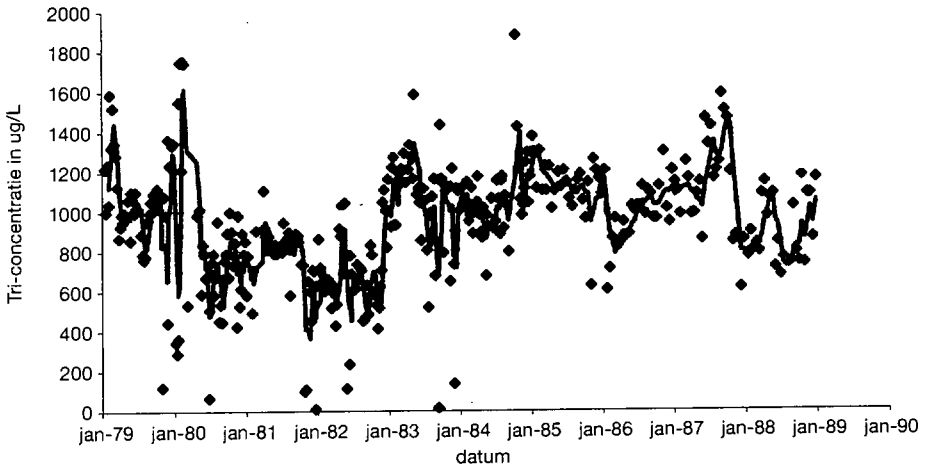
Vergelijken we de gegevens uit de putten te Hilversum met de eerder genoemde empirische en theoretische criteria voor de aanwezigheid van puur produkt, dan moeten we vaststellen dat de concentraties in de waarnemingsputten op het eerste gezicht aan de lage kant zijn. Slechts in enkele filters worden concentraties van 0,3 tot 0,7% van de verzadigingsconcentratie van tri (3000 tot 7000 $\mu\text{g/l}$) gemeten. Houden we rekening met de grote afstand van de waarnemingsputten tot de potentiële bronzones (250 tot 600 m) en de verdunning van de 'pluimvingers' in stroomafwaartse richting dan liggen de concentraties wel in een reëel bereik. Des te meer omdat de laterale en verticale meetdichtheid (twee meter lange filters met 10–15 m tussen afstand) een lage trefkans impliceren. Een sterk argument voor de aanwezigheid van puur produkt is de diepte waarop de verontreinigingspiek wordt aangetroffen (25 tot 50 m –mv). Een dergelijke diepte is zonder dichtheidsstroming nauwelijks denkbaar als we uitgaan van een gemiddelde infiltratiesnelheid van 1 m/jaar in een natuurlijk systeem.

De concentraties in de interceptieputten zijn echter het meest overtuigend. Ter illustratie is het concentratieverloop in put 412 getoond (figuur 5a). De concentraties fluctueren in de tijd maar nemen *grosso modo* nauwelijks af. De gemiddelde concentratie in het pompfilter bedraagt ongeveer 0,1% van de verzadigingsconcentratie, hetgeen op basis van de theoretische beschouwing als een aanwijzing voor een stroomopwaarts gelegen bronzone met puur produkt wordt gezien. Ook het feit dat de concentraties gedurende 15 jaar geen dalende trend vertonen is een aanwijzing voor continue nalevering vanuit puur produkt.

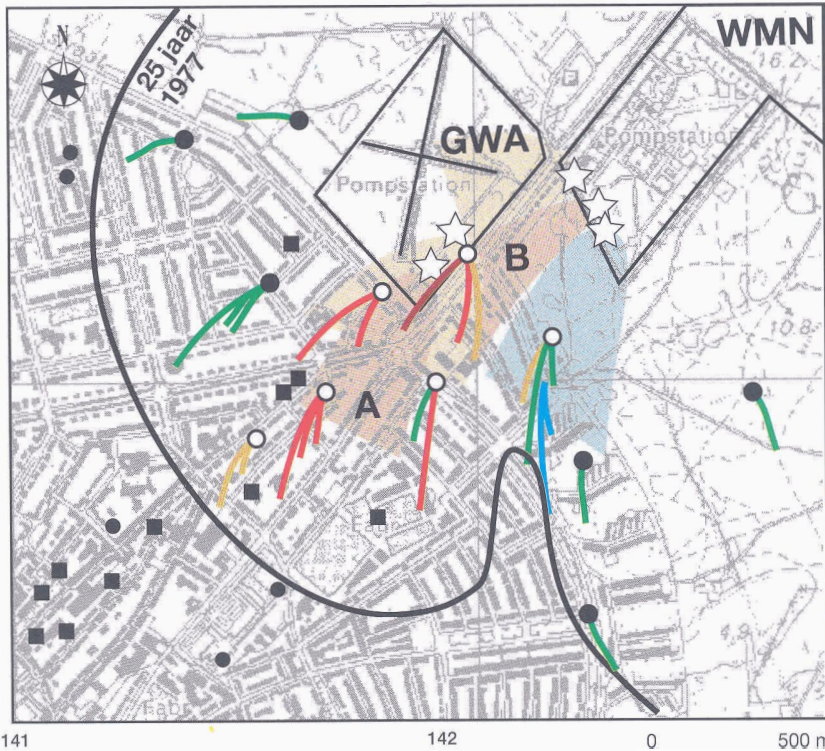
Op zoek naar de positie en diepte van de bron met puur produkt

Vanwege het grillige verspreidingspatroon van DNAPL blijkt het lokaliseren van de ondergrondse bron met puur produkt een lastige opgave. Eén van de manieren om meer helderheid te verkrijgen is het analyseren van reacties van het concentratieverloop op veranderingen in de grondwaterstromingsrichting. De continue nalevering uit de bronzone leidt bij een plotselinge verandering van de stromingsrichting tot een nieuwe pluimrichting vanuit de bronzone. De veranderingen in de ligging van de pluim zullen tot concentratieveranderingen leiden in waarnemings- en pompputten. De ligging van de put ten opzichte van de bronzone en de reistijd tussen bronzone en put zullen het patroon van de verandering bepalen. Gestructureerd gebruik van deze informatie kan aldus een indicatie geven over de positie van de bronzone. In het geval van Hilversum is *grosso modo* sprake van drie verschillende stromingspatronen. Eerst wordt het concentratieverloop in de interceptieputten besproken, daarna het verloop in de waarnemingsputten.

Put 412 (figuur 5a) was de eerste interceptieput op het pompstation Westerveld (GWA). Direct vanaf het begin worden in deze put hoge concentraties (800–1600 $\mu\text{g/l}$) gemeten. Begin 1981 daalt de concentratie echter naar gemiddeld 700 $\mu\text{g/l}$, doordat op dat moment een noordelijker gelegen tweede interceptieput (put 414) een deel van het verontreinigde water gaat oppompen. In 1989 wordt de drinkwatervoorziening op Westerveld beëindigd en lijkt tengevolge van een meer oostwaarts gerichte stromingscomponent een daling in te zetten. Bij het stoppen van de interceptie werd ook de grondwaterbemonstering beëindigd. Vanaf dat moment werd de interceptie overgenomen door de WMN op winplaats Laren.



Figuur 5: Tri-concentraties in de interceptieputten: a. interceptieput 412 (periode 1980-1989, GWA); (b) interceptieput 450 (periode 1990-heden, WMN).



472

■ ● potentiële verontreinigingsbronnen

concentraties waarnemingsputten

- 1000 - 10000 $\mu\text{g/l}$
- 100 - 1000 $\mu\text{g/l}$
- 50 - 100 $\mu\text{g/l}$
- 10 - 50 $\mu\text{g/l}$
- $< 10 \mu\text{g/l}$

concentraties interceptieputten

- < 50
- 50 - 100 $\mu\text{g/l}$
- 100 - 1000 $\mu\text{g/l}$

Figuur 6: Reacties in het concentratieverloop van de waarnemingsputten op veranderingen in de grondwaterstromingsrichting. De kleur van de stroombaan indiceert de gemiddelde concentratie gedurende de periode waarvan de stromingsrichting is aangegeven, de lengte is gebaseerd op de reistijd gedurende de betreffende stromingsperiode. A is put 324, B is put 325.

Figuur 5b toont de reactie in de middelste van de drie interceptieputten, put 450. Vlak na het starten van de interceptie zijn de concentraties nog laag, pas in 1991 begint de concentratie voorzichtig op te lopen en medio 1992 is de concentratie gestabiliseerd op 250 µg/l. De lage concentraties in het begin van de periode zijn het gevolg van het feit dat de pluim verontreinigd grondwater eerst de afstand van 'Westerveld' naar 'Laren' moest afleggen. Na drie jaar is deze afstand overbrugd en hebben de hoogste concentraties in het nieuwe systeem een constante waarde bereikt. De berekende conservatieve reistijd van interceptieput 412 naar 450 is ± 5 jaar en van de noordelijker interceptieput 414 ± 3 jaar. De S-vormige doorbraak in de nieuwe interceptieput komt dus overeen met de doorbraak van de zijdelings verplaatsende verontreinigingspluim. De kern van de pluim die door put 412 werd afgepompt lijkt in 1995 de interceptie nog niet te hebben bereikt. De verwachting is derhalve dat de concentraties nog zullen toenemen. Opvallend is dat de tri-pluim nauwelijks aan retardatie onderhevig lijkt; de doorbraak volgt direct nadat de advectieve reistijd is verstreken. Benker e.a. (1985) kwamen eerder, op basis van traceronderzoek, tot een soortgelijke conclusie.

De concentratiereacties van de waarnemingsputten zijn samengevat in figuur 6. In de figuur is de informatie uit de drie stromingsperiodes geïntegreerd door per stromingsrichting de gemiddelde concentratie af te beelden op de stroombaan. De methode is eerder beschreven in Zutphen e.a. (1997). De gekleurde stroombanen geven samen een indicatie van de richting waarin stroomopwaarts de belangrijkste bronzone moet liggen. Het aantal potentiële bronlocaties daalt na deze analyse tot vijf; één daarvan is een grote industriële locatie.

Twee waarnemingsputten worden er uitgelicht. Bij put 325 (A) wisselt de stromingsrichting nauwelijks gedurende en voorafgaand aan de interceptie. De concentraties blijven onveranderd hoog gedurende de gehele beschouwde periode. Bij put 324 (B) draait de stromingsrichting het sterkst; tijdens de nieuwe interceptie op Laren stroomt water uit een meer zuidwestelijke richting langs. Op basis van de stromingspatronen zal de kern van de oude verontreinigingspluim langs deze put moet trekken bij de nieuwe interceptie. Bij het langstrekken van de pluim is inderdaad sprake van stijging van de concentraties tot 7000 µg/l, maar tevens van een verdieping. Met name in het filter op 50 m -mv nemen de concentraties na 1990 toe. Dit is een duidelijke indicatie voor de diepte van de kern van de verontreinigingspluim. Stroomopwaarts 'teruginterpreterend' lijkt een diepte van 40 a 50 m -mv voor de bronzone reëel.

Discussie

Sinds 1980 is door de interceptiesystemen te Hilversum een hoeveelheid tri opgepompt van 4.500 kg (Duffelen, 1996). Dit komt overeen met 3 m³ pure tri. Extrapoleren we als worst case de jaarlijkse hoeveelheid opgepompt tri (± 300 kg) over 85 jaar dan zou er 100 jaar na het begin van de interceptie zo'n 30 ton tri zijn opgepompt. Een dergelijke hoeveelheid is gezien het overvloedig gebruik van tri niet ondenkbaar.

Hoewel de bacteriële afbraak van tri in de ondergrond op zich geen onderwerp van studie was, is het gezien de opkomst van biotechnologische in-situ saneringstechnieken zinvol even stil te staan bij de Hilversumse case. De 'natuurlijke afbraak' van tri en per wordt tegenwoordig gezien als een kansrijk saneringsconcept dat direct ingrijpen overbodig maakt (zie bijvoorbeeld Rijnaarts en Bosma, 1997). De initiële afbraak van tri en per ver-

loopt het best onder reducerende omstandigheden door zogenaamde reductieve dechlorering. Dit proces lijkt in Hilversum niet of nauwelijks op te treden. Uit een eerste blik op de macrochemie van het met tri verontreinigde water blijkt dat het grotendeels aerob en nitraathoudend is tot een diepte van 30–50 m –mv. Onder deze omstandigheden ligt reductieve dechlorering van tri niet voor de hand. Op grond van de verontreinigingsgeschiedenis van de winplaatsen Westerveld en Laren mag voorzichtig worden geconcludeerd dat 'natuurlijke afbraak' in gevallen met een diepe aerobe zone onvoldoende garanties biedt voor de bescherming van watervoorraden die bestemd zijn voor de drinkwatervoorziening.

Het is in dat verband opmerkelijk dat bij het opstellen van een saneringsplan voor één van de verdachte bronlocaties de relatie met de stroomafwaartse problemen bij de drinkwatervoorziening nauwelijks is betrokken. Het verontreinigingsgeval werd in de diepte niet 'afgeperkt'. De formele scheiding die op bestuursniveau vaak is aangebracht tussen bodemsaneringsbeleid en grondwaterbeschermingsbeleid is – zeker voor DNAPL-verontreinigingen – niet effectief. Een gebiedsgerichte geïntegreerde aanpak die rekenschap geeft van de risico's van verspreiding in het diepere grondwater biedt meer perspectief.

De interceptiesystemen bij Hilversum hebben de afgelopen 20 jaar met succes de drinkwatervoorziening beschermd. Interceptie dicht bij het pompstation is vanuit de drinkwatervoorziening bezien een logische keuze. Vanuit een grondwaterbeschermingsoogpunt zou een interceptie dicht op de bronlocatie de voorkeur verdienen waardoor de vlek verontreinigd grondwater wordt ingeperkt. Een dergelijke opzet zou ook minder gevoelig zijn voor veranderingen in de stromingsrichting van het grondwater, bijvoorbeeld tengevolge van het sluiten of verminderen van de drinkwateronttrekking. Bij de sluiting van het pompstation Westerveld moest reeds een geheel nieuw interceptiesysteem worden ontworpen. Bij elke verandering van de ontrekkingshoeveelheid is nu een evaluatie en eventuele aanpassing van het interceptiesysteem aan de orde.

Conclusies

Het concentratieverloop in waarnemings- en interceptieputten te Hilversum indiceert de aanwezigheid van een ondergrondse bronzone met puur produkt. Op basis van de reacties van het concentratieverloop in de waarnemings- en interceptieputten is het gebied waar de bronzone zich bevindt ingeperkt en kon het aantal verdachte bronlocaties worden teruggebracht. De bron is waarschijnlijk tot een diepte van 30 tot 50 m weggezaakt.

Vanwege het specifieke verspreidingsgedrag en het potentiële dieptebereik van de verontreinigingen verdient het aanbeveling in het grondwaterbeschermingsbeleid speciale aandacht te besteden aan DNAPL's.

De interceptie in zijn huidige vorm beschermt de drinkwatervoorziening op pompstation Laren effectief. De afstand tussen interceptiesysteem en de bronzone maakt het hele systeem kwetsbaar voor veranderingen van het stromingspatroon.

Dankbetuiging

De studie werd uitgevoerd als stage bij het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (voorheen TNO Grondwater en Geo-Energie). Dank gaat uit naar de volgende personen die aan de studie hebben bijgedragen: dr. M.R. Hendriks (Universiteit

Utrecht), prof. dr. ir. C. van den Akker (Technische Universiteit Delft), ir. T.N. Olsthoorn (Gemeentewaterleidingen Amsterdam), ing. R.J.M. Breedveld (Waterleidingbedrijf Midden-Nederland) en dhr. Boechem (gemeente Hilversum).

Literatuur

- Anderson, M.R., R.L. Johnson en J.F. Pankow (1992)** Dissolution of Dense Chlorinated Solvents into Groundwater. 3. Modelling Contaminant Plumes from Fingers and Pools of Solvents; in: *Environ. Sci. Technol.*, jrg 26, nr. 5, pag 901-908.
- Akker, C. van den (1978)** De toepassing van interceptieputten als maatregel tegen de Tri-verontreiniging op pompstation 'Westerveld'; Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Afdeling Productie, onderafdeling Hydrologie.
- Benker, E., G.B. Davis en D.A. Barry (1995)** Using deuterated trichloroethene (TCE) in a tracer test to estimate the transport characteristics of a TCE plume; Proceedings of the international conference on 'Groundwater Quality: Remediation & Protection', Praag, in: *IAHS Publ. no. 225*, pag 61-69.
- Duffelen, E. van (1996)** Karakterisatie van een DNAPL verontreiniging. De Tri-verontreiniging bij Hilversum opnieuw bekeken; Stageverslag TNO Grondwater en Geo-Energie, rapportnr. GG-R-96-61(B).
- Feenstra (1994)** In: 'Diagnosis & Remediation of DNAPL sites'. Waterloo Centre for Groundwater Research. Course notes.
- Kueper, B.H. en E.O. Frind (1991)** Two-phase flow in heterogeneous porous media. 2. Model application; in: *Water Resources Research*, jrg 27, nr 6, pag 1059-1070.
- Johnson R.L en J.F. Pankow (1992)** Dissolution of dense chlorinated solvents into groundwater. 2. Source functions for pools of solvent; in: *Environ. Sci. Technol.*, jrg 26, pag 896-901.
- Pankow, J.F. en J.A. Cherry (1996)** Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater; Waterloo Press, Oregon, USA.
- Rijnaarts, H.H.M. en T.N.P. Bosma (1997)** Intrinsieke biodegradatie: de natuurlijke oplossing voor chloorkoolwaterstofverontreinigingen; in: *NOBIS Nieuws Special*, 18 september 1997, NOBIS, Gouda.
- Schuurmans, R.A. (1978)** De winmiddelen in de winplaats Westerveld bij toepassing van interceptiebronnen; Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Afdeling Productie Hydrologisch Onderzoek.
- Schwille, F. (1988)** Dense chlorinated solvents in porous and fractured media; Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA.
- US-EPA (1994)** Evaluation of Technologies for In-Situ Cleanup of DNAPL Contaminated Sites. United States Environmental Protection Agency; Report EPA/600/R-94/120.
- Zutphen, M. van, R.A.A. Hetterschijt, A. van de Velde, D. Tijdeman, D. Kruger (1997)** Karakterisatie van DNAPL sites (DNAPL KAR); Conceptrapport Onderzoeksproject A: dynamische monitoring Tilburg; Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO/Ingenieursbureau Oranjewoud B.V.