Grondwater-stroombanen in de Veluwe-stuwwal getraceerd met tritium-metingen

Inleiding

Wanneer het grondwater wordt bedreigd door vervuiling, is het belangrijk om informatie te kunnen geven over de verspreiding en de verblijftijd van de verontreiniging in de ondergrond en dus de stroombanen, die het vervuilde grondwater vermoedelijk zal gaan volgen, te kunnen voorspellen. Bij de voorspelling moet meestal uitgegaan worden van een schematisatie van de ondergrond zoals die in het algemeen voor kwantitatief hydrologisch werk wordt gebruikt, dat wil zeggen het toekennen van een doorlatendheid,

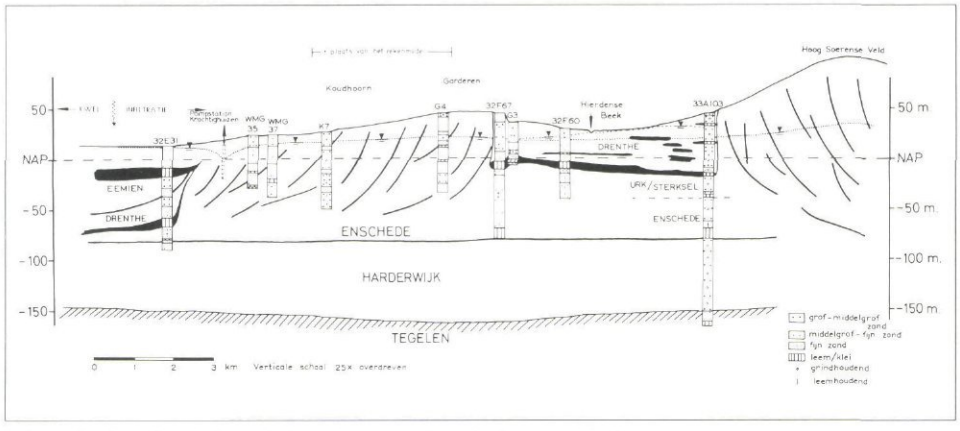


C. A. J. APPELO
Intstituut voor Aardwetenschappen
Vrije Universiteit Amsterdam



C. C. D. F. VAN REE
Instituut voor Aardwetenschappen
Vrije Universiteit Amsterdam

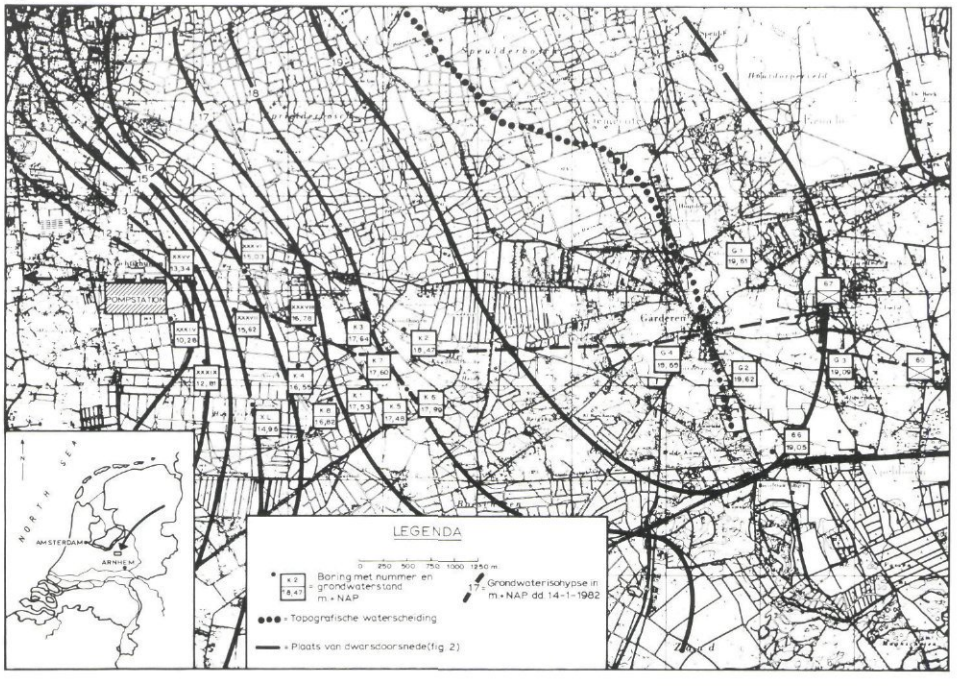
dikte en andere eigenschappen aan relatief grote lithologische eenheden. Met de formules uit de grondwater-hydraulica kan dan een beeld worden verkregen van de stroombaan [Ernst, 1973; De Vries, 1975]. Met een computer-model kan ook in complexere situaties vrij snel informatie worden gegeven over toekomstige ontwikkelingen van de 'vuilpluim' [Konikow, 1981], of over het verloop van de concentraties bij een grondwater-onttrekking [Van den Akker en Cremers, 1978].



Afb. 2 - Geologisch profiel over de Westelijke stuwwal bij Koudhoorn en Garderen.

De resultaten die hierbij worden verkregen zijn goed, voor zover de toegepaste schematisatie een juist beeld van de ondergrond heeft opgeleverd.
Bij gedetailleerd empirisch onderzoek (piezometrisch of chemisch waarbij grondwater om de (paar) meter wordt bemonsterd), blijken de stroombanen vaak anders te lopen dan werd voorzien en eigenlijk moeilijk *exact* voorspelbaar te zijn. Dit kan een gevolg zijn van inhomogeniteiten in de ondergrond die geologisch zijn bepaald [Freeze en Cherry, 1979] en al bij een ongestoorde sedimentatie kunnen ontstaan [Engelen en Roebert, 1974; Rea en Upchurch, 1980; Frape en Patterson, 1981]. De stroombaan zal ook beïnvloed worden door anisotropie [Mercado, 1967; Lee e.a., 1980]. Verder kan bij een wisselende topografie, een wat hoger gelegen gebied aanleiding geven tot diepe infiltratie op die plaats [Wallick en Toth, 1976; Vasak, 1979]. Het is moeilijk om in een nieuw gebied het belang van dergelijke geologische en geografische invloeden op het stromingspatroon aan te geven; het resultaat van empirisch onderzoek vormt in zekere zin een waarschuwing voor de hydroloog die wordt geconfronteerd met de vraag een zo exact mogelijk stromingsbeeld te ontwikkelen.
In dit artikel wordt ingegaan op het complexe stromingspatroon in de stuwwal van de Veluwe, zoals dat is geconcludeerd uit Tritium-profielen van het grondwater in combinatie met modelberekeningen.
De resultaten zijn verkregen bij een onderzoek naar de beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit door de landbouw onder Koudhoorn en Garderen, midden op de Westelijke stuwwal (afb. 1 en 2) [Appelo, e.a. 1982].

Afb. 1 - Plaats van het onderzoeksgebied op de Veluwe.



Opbouw van de Veluwe-stuwwal

De Veluwe is opgebouwd uit Pleistocene sedimenten die deels door tongen van continentale ijs-massa's zijn opgeduwd. Bij de stuwing zijn lagen scheefgesteld en over elkaar heen geschoven, soms langs kleilagen.
De geologische opbouw is daardoor zodanig ingewikkeld geworden, dat deze niet meer vanuit boringen extrapoleerbaar is, zelfs niet over afstanden van enkele meters [RGD, 1972]. Het gestuwde karakter is waarschijnlijk aanwezig tot ongeveer hetzelfde niveau als waarop het ijs in de naastliggende dalen heeft gelegen.

Voor de Veluwe varieert dat niveau van circa 50 m–NAP in de Gelderse Vallei, tot meer dan 100 m–NAP in de IJssel-Vallei. In afb. 2 is een schematisch geologisch profiel getekend over het onderzoeksgebied Koudhoorn en Garderen.
Hydrologisch betekent de stuwing, dat er op willekeurige plaatsen scheefgestelde kleilagen of slecht-doorlatende lagen voorkomen, en dat een in de sedimentpakketten aanwezige anisotropie voor grondwaterstroming méé steil is gesteld. Een dergelijke opbouw kan tot sprongen in de grondwaterspiegel aanleiding geven [RID, 1972].

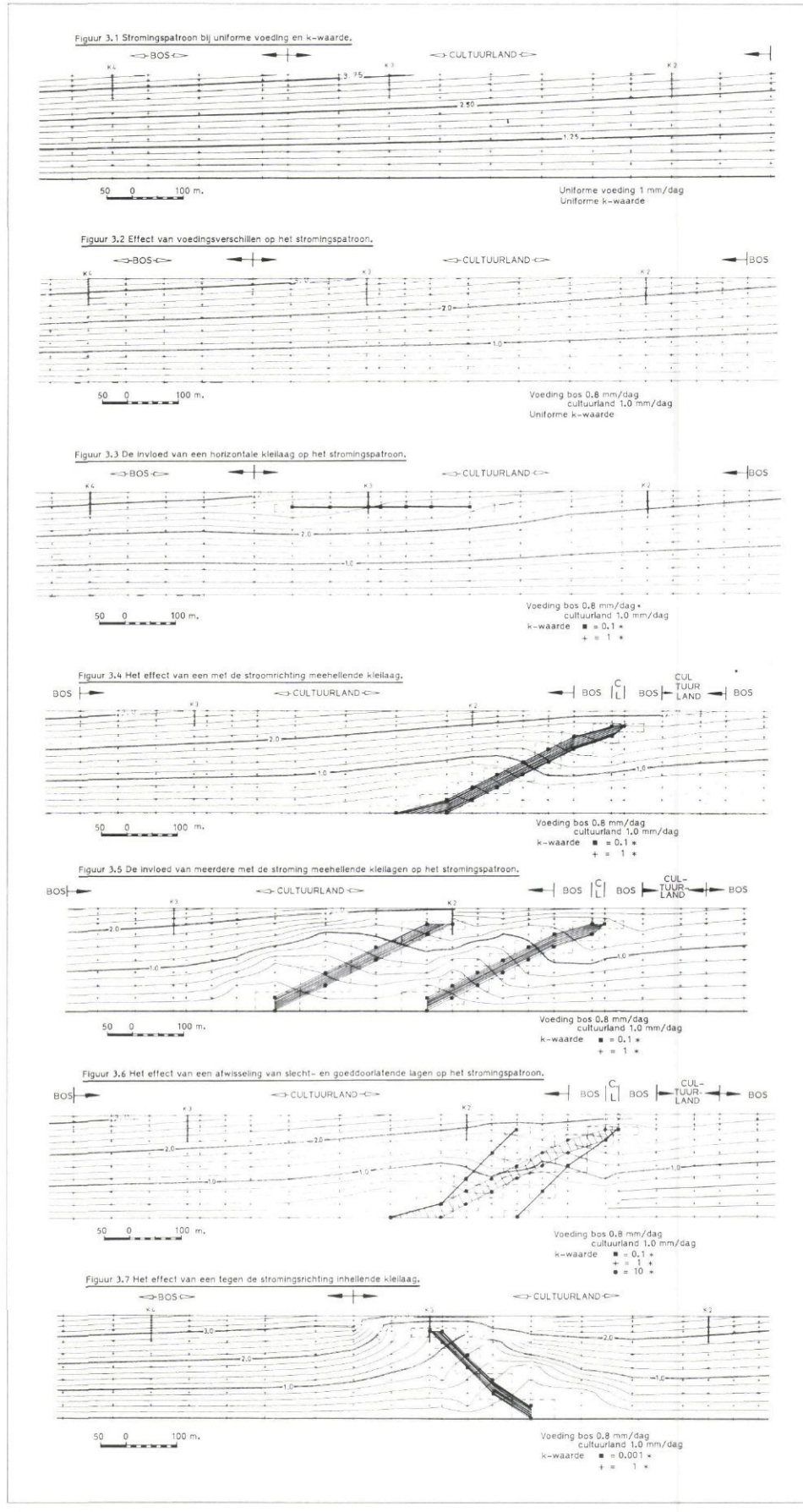
Modellering van mogelijke stromingssituaties in een stuwwal

Om meer inzicht te verkrijgen in het effect van inhomogeniteiten zoals die in de stuwwal kunnen voorkomen, zijn stromingspatronen gesimuleerd met het computermodel STATRECT2, dat op het RID ontwikkeld is door ing. W. Fillekes. Daarbij werd uitgegaan van een homogene, isotrope situatie, waarin vervolgens lokale veranderingen in doorlatendheid en voeding zijn geïntroduceerd, analoog aan het werk van Freeze en Witherspoon (1967).
STATRECT2 is een tweedimensioneel model, dat door middel van de eindige elementenmethode grondwaterpotentialen berekend. In dit geval is het in de verticaal toegepast, bovendien zijn door invoering van de stroomfunctie in plaats van de potentiaalfunctie en de inverse van de doorlaatfactor k in plaats van de k-waarde, de stroomlijnen berekend. Door vergelijking van verschillende plots verkrijgt men dan een duidelijk beeld van de invloed van inhomogeniteiten op de stroomlijnen en de infiltratiediepte.
Het berekende profiel is 3,5 kilometer lang en reikt tot 200 meter diepte; de plaats is aangegeven in afb. 1 en 2.
Als initiële k-waarde is 20 m/dag genomen. Op het uiteindelijke resultaat zijn echter alleen de verhoudingen van de doorlatendheid van invloed, omdat de stroming over de randen expliciet is vastgelegd door de stroomfunctie. De stroomlijnen in de afbeeldingen vertonen soms scherpe hoeken aangezien bij de gekozen plotprocedure punten rechtlijnig verbonden worden. In werkelijkheid zal het verloop veel vloeiender zijn. Daarnaast dient men er rekening mee te houden, dat in het model de k-waarden worden toegekend aan een rechthoek rond het knooppunt en dat de mogelijkheid tot nauwkeurige begrenzing van een laag afhankelijk is van de knooppuntsdichtheid. Als gevolg hiervan kan het geplotte stromingspatroon geringe verschillen vertonen met de beoogde modelstroming.

Afb. 3.1 toont het stromingspatroon in het geval van een uniforme voeding van 1 mm/dag. De getallen bij de stroomlijnen geven het debiet in m^2/dag onder de stroomlijn aan. De punten K2, K3 en K4 komen overeen met boorpunten (zie afb. 1). De afstand van K2 tot de waterscheiding is ongeveer 2.5 kilometer. Er is ook een verschil in voeding ingebracht, tussen bos en cultuurland, van resp. 290 en 360 mm/jaar. Het effect hiervan is maar gering, onder Koudhoorn is het verschil in infiltratie-diepte bijvoorbeeld slechts enkele meters (afb. 3.2).

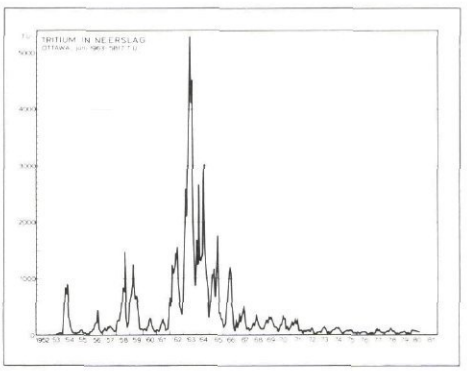
Een veel sterkere invloed hebben verschillen in doorlatendheid op het stromingspatroon. Afb. 3.3 toont de invloed van een horizontale laag met een 10* lagere k-waarde op 30 meter diepte. Duidelijk zichtbaar is, dat het

Afb. 3 - Stromingspatronen gesimuleerd met het eindige elementenmodel STATRECT2 van het RID.

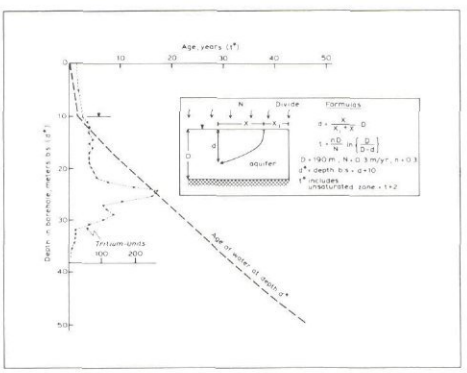


bovenstroomse grondwater er omheen buigt en dieper infiltreert. Het boven de laag geïnfiltreerde water vertoont een geringere infiltratiediepte. Naarmate de k-waarde afneemt is de stroming meer en meer verticaal door de laag heen gericht en neemt het debiet door de zone af. De extra infiltratiediepte is afhankelijk van de laagdikte en bedraagt in dit geval maximaal circa 40 meter, afnemend met de diepte. Benedenstrooms treedt herstel op van het stromingspatroon naar de homogene situatie.
Afb. 3.4 laat het effect zien van een met de stromingsrichting meehellende, minder doorlatende laag. Bovenstrooms treedt weer een diepere infiltratie op, terwijl na passage van de slechter doorlatende laag tijdelijk een opwaartse stromingscomponent optreedt. Na enkele honderden meters heeft de situatie zich hersteld. Zolang het effect van de laag een afwijking veroorzaakt ten opzichte van het stromingspatroon voor het homogene geval, zal de diepte waarop water van een bepaalde ouderdom wordt gevonden verschillen van de ideale situatie.
Bij aanwezigheid van meerdere van deze lagen ontstaat een soort golfpatroon in het grondwater (afb. 3.5). In een verticale dwarsdoorsnede neemt de ouderdom van het water toe, in een horizontaal vlak kan men jonger water tussen ouder water aantreffen. Een relatief goed doorlatende laag blijkt als drain te fungeren (zie afb. 3.6).
De stroomlijnen concentreren zich in deze zone en als gevolg van de relatief lage weerstand treedt diepere infiltratie op. Voor de verblijftijd heeft dit tot gevolg, dat op een bepaalde diepte jonger water wordt gevonden dan het geval zou zijn in een homogene situatie.
Alle voorgaande situaties toonden met de stroomrichting meehellende zones met een afwijkende k-waarde. Keert men de hellingsrichting om (dus tegengesteld aan de te verwachten stuw-richting), dan treden de omgekeerde stromingspatronen op: opwaartse stroming in plaats van wegzijging en omgekeerd. Een extreem geval is weergegeven in afb. 3.7. Bijna $^2/_3$ van het debiet stroomt door de bovenste 30 meter van de aquifer. Het verschil met de diepte waarop het water in het homogene stromingspatroon zou uitkomen, bedraagt hier soms meer dan 75 meter.

Stroombaan-tracering met behulp van tritium
Voor het traceren van de stroombaan in de watervoerende laag in de praktijk, moet gebruik worden gemaakt van kenmerkende eigenschappen die het water meekrijgt bij infiltratie aan het oppervlak en bij het transport in de aquifer. Tritium is daarvoor geschikt, omdat het de ouderdom van het grondwater kan aangeven [Fontes, 1980; Mook, 1979].



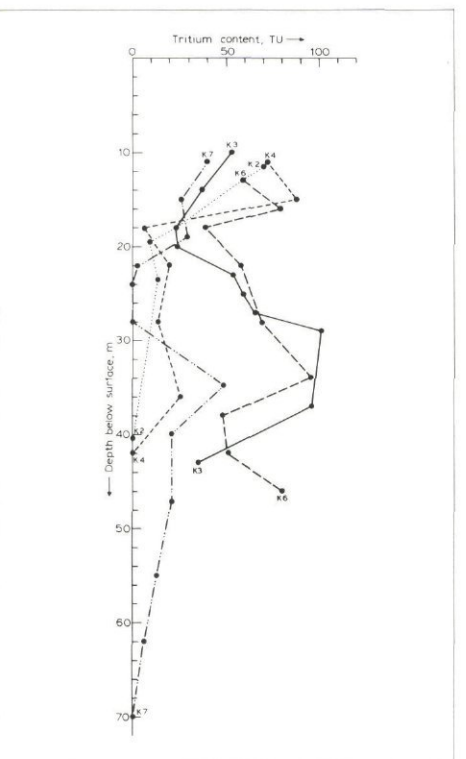
Afb. 4 - Verloop van de tritium-concentratie in de neerslag bij Ottawa, 1953-1981.



Afb. 5 - De leeftijdsopbouw van het grondwater onder Koudhoorn voor een homogene, isotrope aquifer, met bijbehorend tritium-profiel.

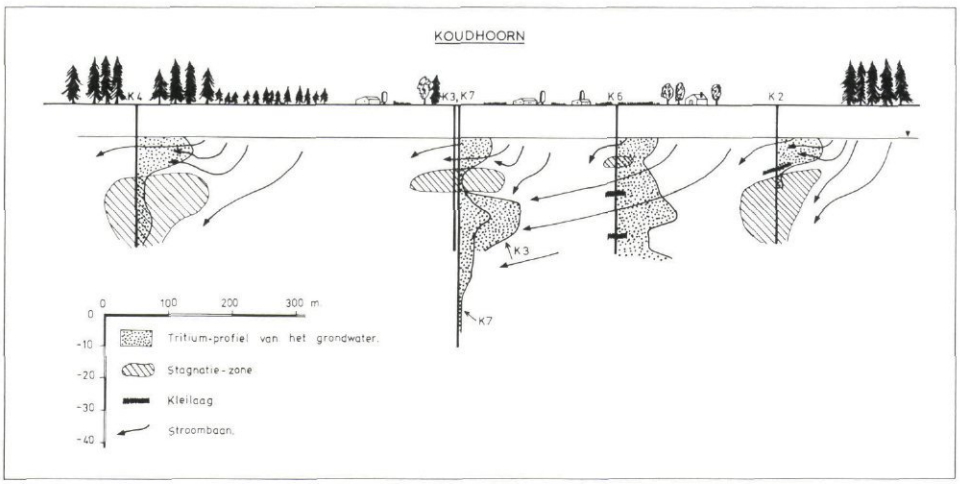
Tritium is een radioactief isotoop van waterstof, dat van nature door een kernreactie in de atmosfeer gevormd wordt. Het natuurlijke gehalte bedroeg 5 TU (*T*ritium *U*nits) [Mook, 1979], maar door kernproeven is er op grote schaal kunstmatig gevormde tritium in de atmosfeer gebracht. Het gehalte bedroeg hierdoor in het piekjaar 1963/1964 meer dan het duizendvoudige van de natuurlijke concentratie (afb. 4). Sinds het beëindigen van de atmosferische kernproeven is het gehalte door radioactief verval en uitwisseling met de oceanen gedaald tot waarden rond de 50 TU. De tritium-concentratie in de neerslag kan ontleend worden aan de gegevens van het Isotopen-laboratorium in Groningen, eventueel aangevuld met andere stations uit het IAEA-netwerk om een langere tijdreeks te verkrijgen [Mook, 1979]. De verkregen concentratie/tijd-relatie moet dan in de onverzadigde zone en in het grondwater teruggevonden worden als een concentratie/diepte-relatie.

Tritium in de aquifer onder Koudhoorn
De leeftijd van het grondwater met een bijbehorend tritium-profiel is gegeven in afb. 5 voor de situatie bij Koudhoorn. Het verloop van de tritium-concentratie in het grondwater is berekend uit de (nuttige) neerslag die van oktober tot maart valt, waarbij de piekhoogte vermindert door radioactief verval en door dispersie in het grondwater [Appelo e.a., 1982]. De tritium-piek zou in een homogene ondergrond op ongeveer 25 m.–m.v. gevonden moeten worden en dit kan vergeleken worden met de gemeten tritiumprofielen in 5 boringen bij Koudhoorn (afb. 6).
In boring K3 en K6 wordt een duidelijke piekwaarde bereikt op een diepte van circa 30 m.–m.v. Boven de piek van circa 100 TU, is in deze boringen echter een zone aanwezig, waar het tritium-gehalte laag (0-40) is, terwijl daarboven het tritium-gehalte juist weer toeneemt. Dit verloop is niet te verklaren uit



Afb. 6 - Gemeten tritium-profielen bij Koudhoorn.

de opeenvolgende variaties in de neerslag, waarin de tritium-concentraties tot 1978 nooit lager worden dan 40 TU. Het verloop is echter verklaarbaar wanneer er een zone met geringere stroming bestaat, waarin nog relatief ouder water (van voor 1963/1964) aanwezig is. Zoals uit de modelstudies bleek, kan door splitsing van de stroombanen om de 'stagnatie-zone', de tritium-piek dieper gebracht worden dan in de ideaal-homogene situatie het geval zou zijn.
In boring K2 en K4 ligt de tritium-piek hoog in het profiel; daaronder bevindt zich water met een relatief laag tritium-gehalte dat vóór 1963/1964 geïnfiltreerd moet zijn, maar nog niet op de diepte is gearriveerd die bij een homogene, isotrope aquifer hoort.
Analoog aan de 'stagnatie-zone' in de voorgaande boringen, kan dit verklaard worden door te veronderstellen dat er bij



Afb. 7 - Tritium-profielen en stroomlijnen in een schematisch profiel over Koudhoorn. De boringen K6 en K7 zijn geprojecteerd op de lijn van K2, K3 en K4.

boring K2 en K4 een slechter-doorlatende zone voorkomt met een diepe invloed (dieper dan 30 m.–m.v.), die het water en dus ook de tritium-piek omhoog dwingt of belet te zakken (zie bijvoorbeeld afb. 3.3).
In afb. 7 is het stromingspatroon met de 'stagnatie-zones' schematisch weergegeven zoals dat in het voorgaande werd beschreven. De zogenoemde stagnatie-zones geven een indicatie over de snelheidsverdeling in het grondwater, met sneller en langzamer stromende zones; in een 'stagnatie-zone' staat het grondwater niet 'stil' (in absolute zin). Bij de interpretatie van de verticale profielen hebben de stagnatie-zones een relatief kleiner voedingsgebied, waardoor de stroomsnelheid op grond van continuïteit automatisch lager wordt.

Tritium-inhoud van de profielen
Alle in de effectieve neerslag aanwezige tritium moet teruggevonden worden in het bodemvocht en het grondwater (gecorrigeerd voor radioactief verval). Bij een neerslag-overschot van 300 mm/jaar zou dit 620 TU·m zijn in april 1981, het tijdstip van bemonstering voor dit onderzoek.
In tabel 1 is de tritium-inhoud van de boringen K2 t/m K7 gegeven, bepaald door de meetpunten in een profiel rechtlijnig te verbinden en aan het ondervlak af te kappen. Voor een vergelijking met de tritium-invoer door de neerslag, zou er nog 20 à 30 TU bijgeteld moeten worden voor het water in de onverzadigde zone en moeten de bedragen in tabel 1 vermenigvuldigd worden met de porositeit van de watervoerende lagen. De gemiddelde tritium-inhoud bij Koudhoorn, 1306 TU·m vermenigvuldigd met een porositeit van 0.3, levert 392 TU·m op, minder dus dan de bovengenoemde 620 TU·m die met de neerslag ingebracht zou zijn. Voor het verschil kan een aantal redenen worden gegeven. Het afkappen van boringen K3 en K6 aan de onderzijde waar het tritium-gehalte nog steeds hoog is, geeft natuurlijk te weinig tritium aan die profielen. Ook zou de porositeit iets hoger kunnen zijn dan 0,3 [Olsthoorn 1979]. Tenslotte is ook mogelijk dat de invoer door de neerslag minder is, omdat het neerslag-overschot lager kan zijn dan 300 mm/jaar [Appelo e.a., 1982]. Het is echter de vraag of de gemeten 5 tritium-profielen wel een representatief gemiddelde opleveren van de tritium-inhoud, gezien de verschillen die in de profielen aanwezig zijn. De spreiding geeft in feite aan dat de aquifer niet homogeen is en de verschillen moeten verklaard worden door de veronderstelde snelheidsverdeling van de grondwater-stroming in het profiel.

TABEL I – *Tritium-inhoud van het grondwater bij Koudhoorn, zonder correctie voor de porositeit.*

Boring	Tritium-inhoud	
K2	459 TU*meter	
K3	2055 TU*meter	
K4	847 TU*meter	*gemiddeld: 1306 TU*meter*
K6	2146 TU*meter	
K7	1023 TU*meter	

In het algemeen geldt voor het grondwater in elk boorpunt een tritiumbalans:

$$\int_0^t A(t) \cdot N \cdot dt = \left(\frac{\text{TU-aquifer}}{L}\right)_t + \int_0^t \int_0^{D_{max}} \frac{A(D) \cdot v(D) \cdot n}{L} \, dD dt \qquad (1)$$

A(t,D) = Tritiumactiviteit op tijdstip t resp. diepte D (TU)
N = Neerslagoverschot (m/jaar)
n = Porositeit (%)
TU-aquifer = Tritium-inhoud van de aquifer van boorpunt tot waterscheiding (TU · m²)
L = Afstand van boorpunt tot waterscheiding (m)
v(D) = Stroomsnelheid van het grondwater op diepte D (m/jaar)

Nu kan men er vanuit gaan dat de tritium-inhoud van de aquifer, zoals deze in vergelijking 1 is genormaliseerd op afstand tot de waterscheiding, een constante gaat naderen als de boorpunten verder van de waterscheiding liggen (gemiddeld genomen hebben inhomogeniteiten dan minder effect). Dit betekent dat voor die boorpunten de tritium-afvoer zoals gegeven in het 2e deel van de rechterkant van vergelijking 1, eveneens gelijk gaat worden. Voor het geval met stationaire grondwaterstroming geldt dan op iedere plaats voor een zeker tijdstip:

$$\int_0^{D_{max}} \frac{A(D) \cdot v(D) \cdot n}{L} \, dD = \text{constant} \qquad (2)$$

= 'tritium-afvoer'

Uit vergelijking 2 is duidelijk dat de tritium-afvoer op een bepaald tijdstip, in hoge mate wordt bepaald door de snelheidsverdeling van het grondwater in de verticaal en dus door de plaats van eventuele 'stagnatie-zones'. Als er bijvoorbeeld een stagnatie-zone ligt op de diepte tot waar de tritium-piek zou zijn doorgedrongen in een homogeen pakket, dan wordt het water met het relatief hoge tritium-gehalte omhoog gedwongen, om bovenin het profiel versneld af te stromen. Zo'n profiel heeft te weinig tritium als dit over de diepte wordt gesommeerd (zoals K2 en K4), maar de veronderstelde snelheids-verdeling kan de tritium-balans van vergelijking 1 en 2 compenseren. Indien de stagnatie-zone bovenin het profiel ligt en het water met de tritium-piek dieper wordt gebracht, zal het water bovenin langzamer stromen; het water is dus relatief (te) oud voor die diepte en heeft een relatief hoog tritium-gehalte. Voor zo'n profiel wordt juist teveel tritium gevonden als dit over de diepte wordt gesommeerd (zoals K3 en K6), maar ook hier kan de snelheidsverdeling de tritium-balans compenseren.
Analoog aan voorgaande redenering zal in de boringen K2 en K4, de tritium-inhoud in de toekomst relatief ten opzichte van K3 en K6, gaan toenemen, wanneer het tritium-rijkere water zo diep komt dat de stagnatie-zone boven de plaats van de tritium-piek komt te liggen.

Bij de bovengegeven verklaring voor de afwijkende tritium-inhoud, werd ervan uitgegaan dat de afstand van de boorpunten bij Koudhoorn tot de waterscheiding groot genoeg is om de tritium-afvoer volgens vergelijking 2 in elk boorpunt gelijk te doen zijn. In hoeverre dat ook inderdaad het geval

is, kan alleen getoetst worden aan de hand van de gegeven voorspelling over het toekomstig verloop van de tritium-inhoud van deze boringen. De tritium-inhoud is wel in overeenstemming met de snelheidsverdeling met 'stagnatie-zones' zoals deze werd geconcludeerd uit de plaats van de piek in de verticaal. Alleen de lage tritium-piek in profiel K7 komt niet goed overeen met de ook nog enigszins lage tritium-inhoud. Waarschijnlijk kan echter een 3-dimensioneel stromingsbeeld met mogelijke stroming naar opzij, ook dit profiel verklaren.

Slotbeschouwing

De tritium-metingen van grondwater op de Veluwe geven aan dat er in de verticaal een snelheidsverdeling bestaat met sneller en langzamer stromende zones.
Een 'stagnerend' deel kan bijvoorbeeld ontstaan door slechter doorlatende lagen die de grondwaterstroming plaatselijk blokkeren. Behalve in één boring (K2), geeft de boorbeschrijving op de dieptes van de stagnatie-zones geen overgangen in sediment-eigenschappen te zien die duiden op verschillen in doorlatendheid, ook al is het de vraag of dunne leemlagen, kleilagen en lagen die met ijzer-hydroxide zijn verkit, goed als zodanig uit een pulsboring worden herkend. Op zich is een ondoorlatende zone ter plaatse van de stagnatie-zone ook niet noodzakelijk, omdat deze immers ook stroomopwaarts en stroomafwaarts van de lokale inhomogeniteit op zal treden, zoals de modelberekeningen zo fraai te zien geven. Het optreden van stagnatie-zones, zou daarmee een tamelijk willekeurige zaak worden – althans bezien vanuit de beschikbaarheid van gegevens over de ondergrond – en dus als argument opgevat kunnen worden voor een statistisch beschrijven van aquifer-eigenschappen zoals dat is gedaan door Smith [Smith & Schwartz, 1980; Smith, 1981).
Het is echter zo, dat de ongrijpbaarheid van deze eigenschappen op de Veluwe wordt versterkt door het gestuwde karakter van de sediment-pakketten, en dit is een nog slecht begrepen, laat staan voorspelbaar, fenomeen. Het is ook wel bekend, dat de stromingssituatie op de Veluwe 'complex' is, met bijvoorbeeld een hogere gradiënt van de stijghoogte dan nodig zou zijn om het neerslag-overschot af te voeren als gerekend wordt met gebruikelijke k-waarden en de dikte van de aquifer. In de meeste aquifers vertonen de watervoerende eigenschappen ook een duidelijker verband met de afzettingsomstandigheden van het sediment. In de Veluwe zijn de tritium-variaties in het grondwater nog goed zichtbaar, omdat de aquifer relatief dik is. Bij een dunnere aquifer wordt de tijd/diepte relatie meer gecomprimeerd; bovendien neemt de stroomsnelheid toe en als gevolg daarvan de dispersie, zodat verschillen in watersamenstelling worden afgevlakt. Voor het optreden van stagnatie-zones is het daarom belangrijk dat de aquifer dik is en dat er met een zekere willekeur slechter (en beter) doorlatende lagen aanwezig zijn. Dit zijn eigenschappen die vooral in stuwwallen verwacht mogen worden.
Voor de interpretatie van een waterkwaliteitsprofiel is het optreden van stagnatie-zones belangrijk als de graad van vervuiling van een aquifer als geheel aangegeven moet worden. Het begrip 'stagnatie-zone' zoals hier geïntroduceerd, geeft namelijk aan dat er een snelheidsverdeling bestaat in de aquifer die afwijkend is van het homogene geval en die niet zonder meer uit boorgegevens valt te herleiden. Analoog aan de besproken tritium-profielen kan een waterkwaliteitsprofiel met een stagnatie-zone langer 'schoon' water bevatten (plaats van stagnatie-zone op de plaats waar vervuiling zou zijn gearriveerd) en ook langer 'vuil' water bevatten, (plaats van stagnatie-zone bòven plaats waar vervuiling zou zijn gearriveerd in de homogene aquifer).

Dankwoord

Wij willen de medewerkers van het RID graag bedanken voor de mogelijkheid STATRECT te gebruiken. De tritium-analyses zijn gedaan op het Laboratorium voor Isotopenfysica van de RU Groningen, met financiering door het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, afdeling Bodem.

Literatuur

Appelo, C. A. J., Krajenbrink, G. J. W., Ree, C. C. D. F. van en Vasak, L. (1982). *Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit in het infiltratiegebied van de NW-Veluwe.* Staatsuitgeverij, in druk.
Vries, J. J. de, (1975). *Some calculation methods for determination of the travel time of groundwater.* Aqua VU 5, 3-15, IvA/VU.
Engelen, G. B. and Roebert, A. J. (1974). *Chemical water-types and their distribution in space and time in the Amsterdam dune-water catchment area with artificial recharge.* J. Hydrol. 21, 339-356.
Ernst, L. F. (1973). *De bepaling van de transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zone.* ICW nota 775, 42 p.
Frape, S. K. and Patterson, R. J. (1981). *Chemistry of interstitial water and bottom sediments as indicators of seepage patterns in Perch Lake, Chalk River, Ontario.* Limnol. Oceanogr. 26, 500-517.
Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A. (1967). *Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation.* Water Resour. Res. 3, 623-634.
Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979). *Groundwater.* Prentice-Hall, 604 p.
Fontes, J. Ch. (1980). *Environmental isotopes in groundwater hydrology.* In: P. Fritz and J. Ch. Fontes (eds.). *Handbook of environmental isotope geochemistry.* Elsevier, p. 75-140.
Konikow, L. F. (1981). *Role of numerical simulation in analysis of groundwater quality problems.* In: W. van Duyvenbooden, P. Glasbergen and H. van Lelyveld (eds.). *Quality of groundwater.* Elsevier, p. 823-836.
Lee, D. R., Cherry, J. A. and Pickens, J. F. (1980). *Groundwater transport of a salt tracer through a sandy lakebed Limnol.* Oceanogr. 25, 45-61.
Mercado, A. (1967). *The spreading pattern of injected water in a permeability stratified aquifer.* IASH publ. 72, 23-36.
Mook, W. G. (1979). *Collegedictaat Isotopenhydrologie.* Rijksuniversiteit Groningen, 165 p.
Olsthoorn, Th. N. (1979). *In Nederlandse zandformaties zijn het doorstroomde en het totale porievolume aan elkaar gelijk.* H_2O 10, 118-122.
Rea, R. A. and Upchurch, S. B. (1980). *Influence of regolith properties on migration of septic tank effluent.* Groundwater 18, 118-125.
RGD (1972). *Geologische opbouw van het Kroondomein bij Uddel.* RGD, Haarlem.
RID (1972). *Kunstmatige infiltratie Veluwe.* Nota 2 RID, 's-Gravenhage.
Smith, L. (1981). *Spatial variability of flow parameters in a stratified sand.* Mathem. Geol. 13, 1-21.
Smith, L. and Schwartz, F. W. (1980). *Mass transport. I. A stochastic analysis of macroscopic dispersion.* Water Resour. Res. 16, 303-313.
Akker, C. van den en Cremers, G. J. M. (1978). *De gevolgen van rioolwater-infiltratie in het Gooi op de kwaliteit van het te onttrekken grondwater voor drinkwaterproductie.* H_2O 11, 44-49.
Vašák, L. (1979). *De chemische samenstelling van het grondwater in het Barneveldse Beek-gebied.* Basisrapport Cie. Bestudering Waterhuishouding Gelderland, Arnhem, 33 p.
Wallick, E. I. and Toth, J. (1976). *Methods of regional groundwater flow analysis with suggestions for the use of environmental isotopes.* In: *Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology.* IAEA, 37-64.

• • •

Adreswijziging Bureau PAO-LH Wageningen

Met ingang van 3 januari 1983 is het Bureau van de Stichting Post-Academisch Onderwijs Landbouwhogeschool Wageningen (POA-LH) gehuisvest in gebouw 'De Leeuwenborch', Hollandseweg 1 te Wageningen.
Het correspondentie-adres is: Postbus 9101, 6700 HB Wageningen. Telefonisch is het bureau bereikbaar op de volgende nummers:
08370 – 84092 dr. ir. J. H. de Ru
08370 – 84093 mw. L. Snijders-van Rangelrooy (secretaresse)
08370 – 84094 ing. F. Appel
08370 – 89111 Telefooncentrale Landbouwhogeschool.

• • •