

# Verblijftijd van water in de onverzadigde zone van zandgronden in gebieden met diepe grondwaterspiegels

## Inleiding

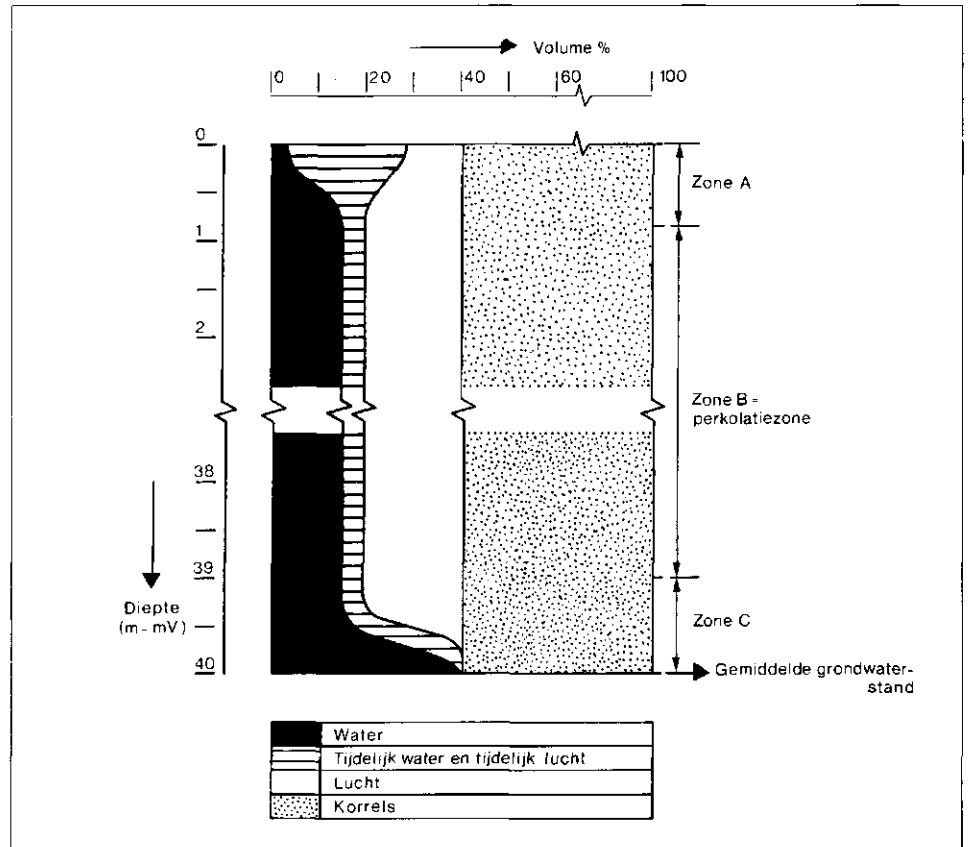
In grote delen van Nederland wordt het grondwater uitsluitend aangevuld door het neerslagoverschot (neerslag minus verdamping). Dit neerslagoverschot percoleert, alvorens het het freatische vlak bereikt, door de onverzadigde zone van de grond. De onverzadigde zone wordt gekenmerkt door zowel de aanwezigheid van water als lucht. De grote bodemporiën zijn vrijwel altijd gevuld met lucht, terwijl de kleine poriën nagenoeg altijd water bevatten. Het water stroomt door de kleinere poriën en komt



H. A. J. VAN LANEN  
Rijksinstituut voor  
Drinkwatervoorziening

daarbij intensief in contact met de korrels (mogelijkheid voor ionenuitwisseling) en met de zuurstof in de bodemlucht (oxydatie in een aëroob milieu). Dit milieu verschilt duidelijk van de omstandigheden in de verzadigde zone van de grond. In de verzadigde zone vindt de stroming zowel in de grote als in de kleine bodemporiën plaats, terwijl het water soms zuurstofarm is (anaëroob milieu). De kwaliteit van het grondwater in de verzadigde zone van de grond zal dus mede worden beïnvloed door de stroming van water in de onverzadigde zone.

Behalve van bodemeigenschappen (bijv. het adsorptievermogen) zal met name de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van de grond van belang zijn. Voor het verkrijgen van inzicht in de grondwaterkwaliteit en in veranderingen in de grondwaterkwaliteit kan het dus belangrijk zijn de verblijftijd van het water in de onverzadigde zone te kennen. Dit geldt met name indien men geïnteresseerd is in de relatie tussen de grondwaterkwaliteit en eventuele verontreinigingen die aan of dicht onder het maaiveld hebben plaatsgevonden. In grote delen van Nederland zal de verblijftijd van water tussen het maaiveld en het freatische vlak (de onverzadigde zone) relatief klein zijn (< 1 à 2 jaar). Nederland wordt namelijk gekenmerkt door het voorkomen van (zeer) ondiepe grondwaterspiegels in grote gebieden, waardoor de onverzadigde zone vrij dun is. Er komen echter ook gebieden voor met diepe tot zeer diepe grondwaterspiegels. Men moet hierbij denken aan de Veluwe, de Utrechtse Heuvelrug, het Gooi, de stuwwallen in Overijssel en bij Nijmegen alsmede grote delen van Zuid-Limburg. In deze gebieden kan de verblijftijd van water in de onverzadigde zone oplopen van enkele tot soms vele jaren. Dit was voor het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening aanleiding om



Afb. 1 - De verticale verdeling van het aandeel water, lucht en korrels in een matig grofzandige ondergrond.

de verblijftijden in de onverzadigde zone nader te onderzoeken in het kader van een voor Oost-Utrecht op te stellen grondwaterbeschermingskaart. Het onderzoek Oost-Utrecht wordt uitgevoerd in opdracht van de Directie Drinkwatervoorziening van het Ministerie voor Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Tevens is er betrokkenheid van de zijde van de Regionale Inspectie voor de Hygiëne van het Milieu in de provincie Utrecht, de Provinciale Waterstaat van Utrecht en het Waterleidingbedrijf Midden-Nederland. Het onderzoek naar de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van Oost-Utrecht beperkt zich tot de Utrechtse Heuvelrug. Het is opgedeeld in een aantal fasen. De eerste fase had als doel via globale berekeningen en gemakkelijk beschikbare gegevens een orde van grootte van de gemiddelde verblijftijd aan te geven. Tevens moest worden aangegeven welke factoren de grootste invloed hebben op de verblijftijd. Aan de hand hiervan zal voor de tweede fase kunnen worden aangegeven welk onderzoek moet worden uitgevoerd om uiteindelijk de verblijftijden in de onverzadigde zone van de Utrechtse Heuvelrug vast te kunnen stellen. In het voorliggende artikel zal verslag worden gedaan van de eerste fase van het onderzoek. Voor een uitgebreidere rapportage wordt verwezen naar Van Lanen [1983]. Allereerst zal worden ingegaan op de

gebruikte rekenmethode en de invoergegevens. Daarna zullen enkele resultaten worden gepresenteerd. Tot slot zullen de berekende verblijftijden in de onverzadigde zone worden vergeleken met die in de verzadigde zone van de grond. De Commissie Bescherming Waterwingebieden [CBW, 1980] stelt namelijk in haar richtlijnen en aanbevelingen voor om een beschermingsgebied rondom het feitelijk waterwingebied vast te stellen waarvan de omvang in gebieden met zand- en grindlagen in eerste instantie alleen is gebaseerd op de verblijftijden in het watervoerende pakket.

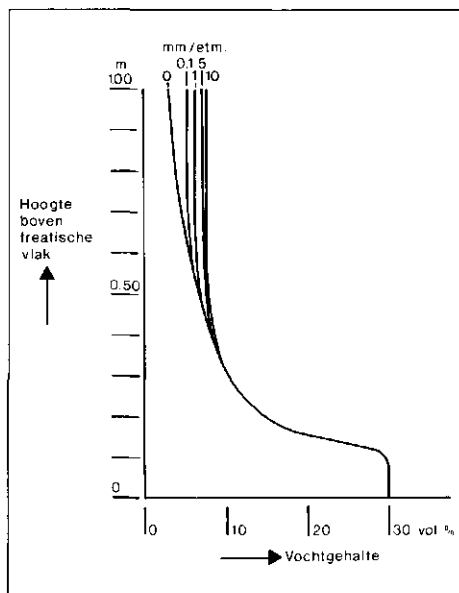
## Rekenmethode

Voor de duidelijkheid dient vooraf vermeld te worden dat de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van zandgronden niet kan worden bepaald uit de tijd die verloopt tussen het tijdstip waarop het neerslagoverschot in het najaar optreedt en het moment waarop de grondwaterstand reageert (meestal enkele maanden tot een half jaar). Het neerslagoverschot, dat in de grond infiltreert, verdringt grotendeels het daar aanwezige bodemvocht dat in het zomerhalfjaar of in het vorige winterhalfjaar is geïnfilteerd. Dit bodemvocht schuift op haar beurt daarvoor iets naar beneden op. Dit opschuiven van het bodemvocht gaat, weliswaar met enige vertraging, door tot aan het freatische vlak. Hoe dieper men komt des te ouder het

bodemvocht is dat opschuift. Onder aan de onverzadigde zone zal uiteindelijk soms jarenoud bodemvocht in de verzadigde zone terechtkomen, hetgeen een verhoging van de grondwaterstand veroorzaakt. Het op grotere diepte aanwezige water in de onverzadigde zone is dus jaren geleden aan het maaiveld geïnfiltrerd.

Het proces in de onverzadigde zone is te vergelijken met een rangeertrein waarvan de wagons worden voortgeduwd door een locomotief. Op het moment dat de locomotief begint te duwen (optreden van neerslagoverschot) zal het eerst de wagon vlak voor de trein in beweging komen, daarna de volgende etc. Niet lang daarna zal de eerste, de verst van de locomotief verwijderde wagon in beweging worden gezet (reactie van de grondwaterstand). Het duurt echter veel langer voordat de locomotief op de plaats passeert waar de eerste wagon stond (aankomst waterdeeltje).

Voor een goed begrip van de bepaling van de verblijftijd in dikke tot zeer dikke onverzadigde zones is het noodzakelijk eerst een beeld te geven van de verdeling van het vochtgehalte (deel van de poriën dat met water is gevuld) met de diepte. Met het bodemvocht wordt namelijk de eventueel aanwezige verontreiniging getransporteerd. In een bodemprofiel met een diepe grondwaterspiegel treedt op een zekere diepte beneden de wortelzone alleen maar neerwaarts gericht vochtransport op. Boven dat vlak treedt in het zomerhalfjaar opwaarts transport op ten gevolge van de wateropname door plantenwortels, terwijl in het winterhalfjaar neerwaarts transport plaatsvindt als gevolg van het neerslagoverschot. De diepte van dit vlak hangt samen met de bewortelingsdiepte van de planten, de grootte van het potentieel neerslagtekort (neerslag minus potentiële verdamping) en de granulaire samenstelling van de ondergrond. Voor matig grof- en grofzandige gronden ligt dit vlak veelal op een diepte van 1 à 2 m beneden het maaiveld. De zone in de bodem waar altijd neerwaarts vochtransport plaatsvindt wordt met percolatiezone aangeduid (afb. 1; zone B). In de percolatiezone van zandgronden varieert het vochtgehalte slechts in beperkte mate. Wanneer daar namelijk het vochtgehalte ten gevolge van een neerslagoverschot iets groter wordt neemt het transportvermogen (de k-waarde) sterk toe. Dit komt omdat dan de grotere bodemporiën, die een geringe hydraulische weerstand hebben, met water worden gevuld. Een hoeveelheid bodemvocht kan in deze gronden dus zonder een grote toeneming van het vochtgehalte neerwaarts worden getransporteerd. Het vochtgehalte kan ook niet veel afnemen omdat daardoor het transportvermogen sterk afneemt waardoor



Afb. 2 - De verdeling van het vochtgehalte in een grofzandige grond voor verschillende percolatiesnelheden [Van der Molen, 1972].

het vocht niet in neerwaartse richting kan worden afgevoerd. Het vochtgehalte in de percolatiezone van zandgronden bevindt zich dus binnen nauwe grenzen. Dit wordt in afb. 2 geïllustreerd waar voor verschillende percolatiesnelheden de vochtgehalteverdeling in een grofzandige grond wordt gegeven [Van der Molen, 1972]. De onverzadigde zone in een bodemprofiel met een diepe grondwaterstand is met betrekking tot het vochtgehalte te verdelen in 3 zones (afb. 1). De bovenste zone (zone A) is een bodemlaag met een dikte van ca. 1 à 2 m waarin afwisselend opwaarts en neerwaarts vochtransport plaatsvindt. Zone A kent met name vlak onder het maaiveld grote variaties in het vochtgehalte. Onder zone A volgt de percolatiezone die in zandgronden een bij benadering constant vochtgehalte heeft. Vlak boven het freatische vlak volgt een zone (zone C) waar het vochtgehalte toeneemt van de constante waarde van de percolatiezone naar het vochtgehalte bij verzadiging (poriënvolume). Deze zone is bij matig grof en grof zand ca. 50 cm dik. Bij matig fijn zand is deze iets dikker, namelijk 80 cm. Uit de zonering kan men afleiden dat de percolatiezone in gebieden met diepe grondwaterspiegels verreweg de grootste zone is.

Bij experimenten, die betrekking hebben op de bepaling van de verblijftijd, wordt de verblijftijd in de onverzadigde zone nagenoeg altijd vastgesteld voor de percolatie- en de daaronderliggende zone (zone C). Men gebruikt daarvoor verticaal opgestelde kolommen die met een bepaalde grondsoort zijn gevuld en waarin stationair watertransport plaatsvindt. Op een bepaald moment wordt aan dit water aan de boven-

kant van de kolom een tracer toegevoegd. De toevoeging van de tracer kan men na verloop van tijd weer staken (blokvormige toevoeging) of continu voortzetten. Aan de onderkant van de kolom wordt vervolgens de concentratie van de tracer gemeten (afb. 3). Aan de hand van dit type experimenten stellen Bouma e.a. [1983] voor om de verblijftijd in de onverzadigde zone te bepalen met de volgende vergelijking:

$$t = a \cdot \frac{V_0}{V} \quad (1)$$

waarin:

$t$  = verblijftijd (dag),

$V_0$  = volume water dat in de kolom aanwezig is ( $m^3$ ),

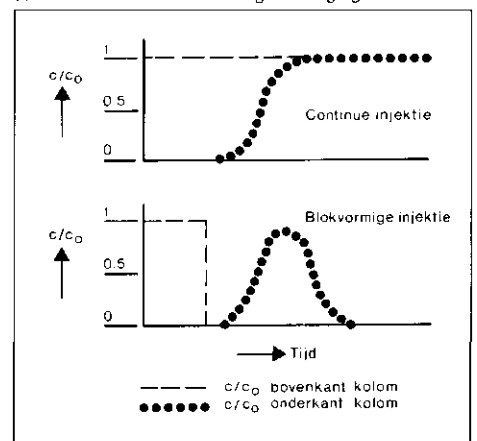
$V$  = dagelijkse toegevoegde hoeveelheid water met tracer ( $m^3 \cdot dag^{-1}$ ) en

$a$  = verdringingscoëfficiënt (dimensieloos).

De verblijftijd, die in het vervolg van dit artikel wordt berekend met vergelijking 1, betreft de verblijftijd van een opgeloste stof die niet wordt geadsorbeerd, niet wordt afgebroken en die geen chemische reacties aangaat.

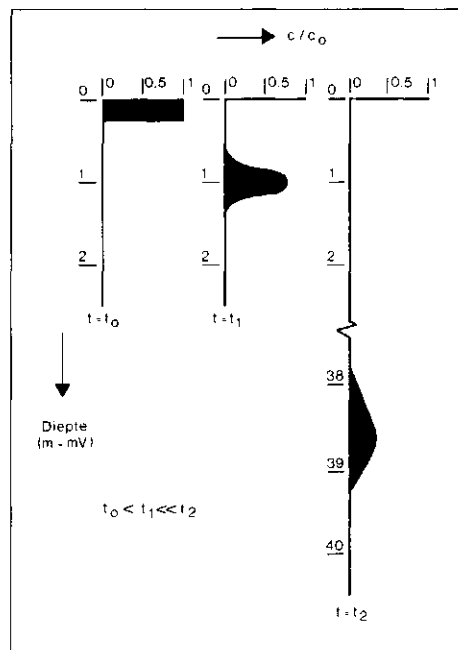
Deze stoffen worden vaak aangeduid als conservatieve stoffen. Treden die processen wel op dan neemt de verblijftijd toe. De verdringingscoëfficiënt  $a$  moet experimenteel worden bepaald. Deze hangt van een groot aantal factoren af. Zo zal bij kleigronden met macroporiën (bijv. scheuren tussen structuurelementen) de waarde voor  $a$  kleiner zijn dan bij zandgronden [Anderson en Bouma, 1977 en Bouma e.a., 1983]. Ook kan de waarde van  $a$  kleiner zijn wanneer het water plotseling in een grote hoeveelheid wordt toegeënd in plaats van langzaam verspreid over de gehele dag. Daarnaast hangt de waarde van de verdringingscoëfficiënt ook af van de verblijftijd waarin men is geïnteresseerd. Indien men namelijk de verblijftijd van het eerste deeltje wil weten, dat het freatische

Afb. 3 - Het verloop van de relatieve concentratie aan de boven- en onderkant van een kolom ten gevolge van een continue en van een blokvormige toevoeging van een tracer.



vlak bereikt (initiële doorbraak), zal men moeten uitgaan van een kleinere waarde van  $a$  dan wanneer men het tijdstip wil weten waarop de helft van de deeltjes (gemiddelde doorbraak) of alle deeltjes (volledige doorbraak) het freatische vlak hebben bereikt (afb. 3). De initiële doorbraak blijkt bij zandgronden vaak op te treden wanneer 60 à 70% van de in de kolom aanwezige hoeveelheid vocht is verdrongen [Biggar en Nielsen, 1967 en Wauters, 1980]. De waarde voor  $a$  bedraagt voor die situaties derhalve 0,6 à 0,7. In korte kolommen (20 cm) is voor zandgronden bij zeer grote fluxen ook wel eens een kleinere waarde voor  $a$  gevonden ( $a \approx 0,4$ ); [Bouma e.a., 1983 en Tyler en Thomas, 1981]. De gemiddelde doorbraaktijd wordt bij zandgronden vaak gevonden wanneer bij benadering de volledige hoeveelheid vocht is verdrongen. Met andere woorden: de maximale concentratie bij een blokvormige injectie (afb. 2) treedt op als de toegevoegde hoeveelheid water ( $V$ ) gelijk is aan de hoeveelheid vocht die oorspronkelijk in de kolom aanwezig was ( $V_0$ ), [Tyler en Thomas, 1981]. De verdringingscoëfficiënt bedraagt voor deze situatie 1,0. De spreiding van verblijftijden neemt toe naarmate de gemiddelde verblijftijd en dus ook de afstand groter wordt (afb. 4). Dit fenomeen wordt dispersie genoemd. Voor uniforme, verzadigde grondwaterstroming (evenwijdige stroomlijnen), blijkt echter dat, bij het groter worden van de afstand tot het injectiepunt, de gemiddelde verblijftijd sterker toeneemt dan de spreiding van de verblijftijden [Day en Forsythe, 1957 en persoonlijke mededeling Uffink]. Dit impliceert dat de spreiding in verblijftijden in absolute zin wel toeneemt met de afstand maar dat, wanneer men deze deelt door de gemiddelde verblijftijd, de spreiding relatief toch minder belangrijk wordt. De relatieve fout in de schatting van de gemiddelde verblijftijd ten gevolge van dispersie neemt voor deze stromingssituatie dus af naarmate de afstand tot het verontreinigingspunt groter wordt. Wanneer men dit ook van toepassing acht op de stroming in de onverzadigde zone is het in het geval van langere verblijftijden zeer reëel als eerste benadering uit te gaan van de gemiddelde verblijftijd. Deze aanname sluit ook aan bij de eerste benadering van de verblijftijden in de verzadigde zone, zoals die tot op heden gebruikelijk is.

Voor het berekenen van de gemiddelde verblijftijd in de percolatiezone is het duidelijker om vergelijking 1 te herschrijven. De dagelijks toegevoegde hoeveelheid water  $V$  kan, wanneer men deze uitdrukt per eenheid van oppervlakte, worden vervangen door het langjarig gemiddeld neerslagoverschot. Het volume water dat in de kolom aanwezig is ( $V_0$ ) is, wanneer men dit uitdrukt per eenheid van oppervlakte, gelijk aan het



Afb. 4 - Het verloop van de relatieve concentratie van een tracer als functie van de diepte voor verschillende tijdstippen.

produkt van de dikte van de percolatiezone en het vochtgehalte. Wanneer tenslotte voor de verdringingsfactor  $a$  de waarde 1,0 wordt aangenomen ziet de vergelijking er als volgt uit:

$$\bar{t} = \frac{D \cdot \theta}{NN} \quad (2)$$

waarin:

- $t$  = gemiddelde verblijftijd (dag),
- $D$  = dikte percolatiezone (m),
- $\theta$  = vochtgehalte ( $m^3$  water  $\cdot m^{-3}$  grond),
- $NN$  = langjarig gemiddeld neerslagoverschot ( $m \cdot dag^{-1}$ )

Het vochtgehalte  $\theta$  is een functie van de samenstelling van de grond en in mindere mate van de grootte van het neerslagoverschot. Aan de hand van de stromingsvergelijking van bodemvocht, de vocht-karakteristiek en de relatie tussen de doorlaatfactor en de drukhoogte in de onverzadigde zone kan de waarde van het vochtgehalte worden bepaald met de volgende vergelijking [De Laat, 1980 en Van Lanen, 1983]:

$$\theta = \alpha + \beta \cdot 10 \log NN \quad (3)$$

waarin  $\alpha$  en  $\beta$  constanten zijn die per grondsoort verschillen. Bij deze benadering wordt aangenomen dat al het vocht in zandgronden mobiel is. In tabel I wordt een overzicht gegeven van de waarden van de constanten  $\alpha$  en  $\beta$  en de grootte van het vochtgehalte bij verschillende waarden van het neerslagoverschot. Het vochtgehalte in de percolatiezone van een grof zandige of

matig grof zandige ondergrond blijkt nauwelijks te variëren. Bij matig fijn zand is er wel enige variatie en is het dus beter vergl. 3 te substitueren in vergl. 2.

$$\bar{t} = \frac{D \cdot (\alpha + \beta \cdot 10 \log NN)}{NN} \quad (4)$$

Met vergelijking 2 of 4 is het mogelijk de gemiddelde verblijftijd in de percolatiezone van een zandondergrond te bepalen. Het bepalen van de verblijftijd in het bovenste gedeelte van het bodemprofiel (afb. 1; zone A) is aanzienlijk gecompliceerder. Men kan daar niet meer uitgaan van een bij benadering constant vochtgehalte en moet behalve met een variabel vochtgehalte ook rekening houden met de richting van het vochttransport en het moment waarop een eventuele verontreiniging op het maaiveld wordt gedeponeed. Een indicatie van de verblijftijd in deze bovenste zone kan worden verkregen met een model ontwikkeld door Van Drecht [1982]. Op grond van isotopenonderzoek komt Meinardi [1983] tot de conclusie dat in gebieden met ondiepe grondwaterspiegels (de Peel) een vrij goede menging van de zomer- en winterneerslag optreedt in zone A. De bepaling van de verblijftijd in het onderste gedeelte van de onverzadigde (zone C) kan eenvoudiger. Van Drecht [1983] geeft hiervoor een methode aan. Overigens leveren het bovenste en onderste gedeelte van de onverzadigde zone alleen maar een wezenlijke bijdrage aan de verblijftijd in de onverzadigde zone als deze niet al te dik is.

#### Invoergegevens

De gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone is bepaald voor de Utrechtse Heuvelrug. Op kaart 1 is een gedeelte van dit onderzoeksgebied weergegeven. Het onderzoeksgebied beslaat een oppervlakte van 15.500 ha. Over dit gebied is voor berekeningen met een verzadigd grondwaterstromingsmodel een netwerk van knooppunten gelegd (in totaal 543 knooppunten). In elk van deze knooppunten, die redelijk verspreid liggen over het gebied, is de verblijftijd bepaald. Uit vergelijking 2 kan men afleiden dat voor deze bepaling in elk punt de grootte van het neerslagoverschot, het vochtgehalte van de ondergrond en de dikte van de percolatiezone nodig is.

#### Neerslagoverschot

Het neerslagoverschot is gelijk aan het verschil van de neerslag en de werkelijke verdamping. De neerslag wordt op 8 stations op of in de nabijheid van de Utrechtse Heuvelrug gemeten. De werkelijke verdamping wordt in dit gebied nergens gemeten en moet dus worden berekend. Deze wordt berekend aan de hand van meteorologische gegevens, de bodemgesteldheid en het bodemgebruik [Van Lanen, 1983]. Er zijn

TABEL I – Waarden van de constanten voor de berekening van het vochtgehalte (vergl. 3) en de grootte van het vochtgehalte.

Grondsoort	Constanten		Vochtgehalte bij een neerslagoverschot van*				
	$\alpha$	$\beta$	100	200	300	400	500
grof zand	0.0859	0.0070	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
matig grof zand	0.2147	0.0217	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
matig fijn zand	0.3000	0.0380	0.16	0.18	0.18	0.19	0.19

\* Het neerslagoverschot is voor de duidelijkheid in deze tabel gegeven in  $\text{mm} \cdot \text{jaar}^{-1}$  (in vergelijking 3 echter invullen in  $\text{m} \cdot \text{dag}^{-1}$ !).

TABEL II – Het percentage van de totale oppervlakte van de Utrechtse Heuvelrug waar de gemiddelde verblijftijd groter is dan een bepaalde waarde.

Berekenings-varianten	Neerslagoverschot Granulaire samenstelling	Langjarig gemiddelde (1973 t/m 1976)			Groot (1974)	Gering (1973)
		grof zand	matig grof zand	matig fijn zand	grof zand	grof zand
verblijftijd						
> 1 jaar		53	80	88	43	62
> 2 jaar		33	–	–	25	37
> 5 jaar		13	30	37	2	19
> 10 jaar		1	17	21	0	2
> 15 jaar		0	3	11	0	0
> 20 jaar		0	< 1	3	0	0
> 25 jaar		0	0	< 1	0	0

62 verschillende combinaties van neerslagstation, bodemgebruik en bodemgesteldheid onderscheiden. Aan elk van de 543 knooppunten is één van de combinaties toegewezen. Het neerslagoverschot is bepaald voor de periode 1973 t/m 1976. In de tweede fase van het onderzoek naar de verblijftijden zal worden nagegaan in hoeverre deze periode representatief is om het neerslagoverschot uit die periode als een langjarig gemiddelde waarde te mogen beschouwen. Daarnaast zal in de tweede fase het model waarmee de werkelijke verdamping is benaderd worden aangepast.

#### Het vochtgehalte

In de percolatiezone wordt het vochtgehalte grotendeels bepaald door de bodem en met name de granulaire samenstelling van deze zone (tabel I). De granulaire samenstelling zal niet overal in het gebied hetzelfde zijn. Een groot deel van de Utrechtse Heuvelrug is namelijk in de voorlaatste ijstijd gestuwd. De ondergrond heeft hierdoor een schubbenstructuur gekregen. Deze scheefgestelde schubben bestaan afwisselend uit fijne en grove zanden. Het gebied kent dus zowel in horizontale als in verticale zin grote verschillen in de granulaire samenstelling. Desondanks is in de eerste fase van het onderzoek uitgegaan van de aanname dat de granulaire samenstelling van de onverzadigde zone overal in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug hetzelfde is. Voor het vaststellen van een differentiatie binnen het gebied zou namelijk een uitgebreide analyse van boorgegevens noodzakelijk zijn. Deze wordt echter alleen maar uitgevoerd indien de verschillen in verblijftijd daar aanleiding toe geven. De berekeningen voor de Utrechtse Heuvelrug zijn in de eerste fase

derhalve steeds uitgevoerd met dezelfde ondergrond in het gehele gebied. Om een indruk te krijgen van de invloed van de keuze van de ondergrond op de gemiddelde verblijftijd zijn de berekeningen een aantal malen herhaald met een voor het gehele gebied andere ondergrond. Achtereenvolgens is een grofzandige, een matig grofzandige en een matig fijnzandige ondergrond doorgerekend.

#### De dikte van de percolatiezone

De dikte van de percolatiezone is benaderd door het verschil te bepalen tussen de maaiveldhoogte (topografische kaart) en het niveau van het freatische vlak (isohypsenkaart). Dit is voor elk van de 543 knooppunten gedaan. Aangenomen is dus dat zowel zone A als C (afb. 1) tot de percolatiezone kunnen worden gerekend. In gebieden met zeer diepe grondwaterspiegels (lange verblijftijden) maakt men daarmee nauwelijks een fout. In de gebieden met ondiepere grondwaterstanden ( $< 2 \text{ m} - \text{m.v.}$ ) is de fout niet meer verwaarloosbaar klein. Bij de berekening van de verblijftijd in die gebieden zou echter vanwege het grote aandeel van zone A in het bodemprofiel de verblijftijd beter met het model van Van Drecht [1982] kunnen worden benaderd.

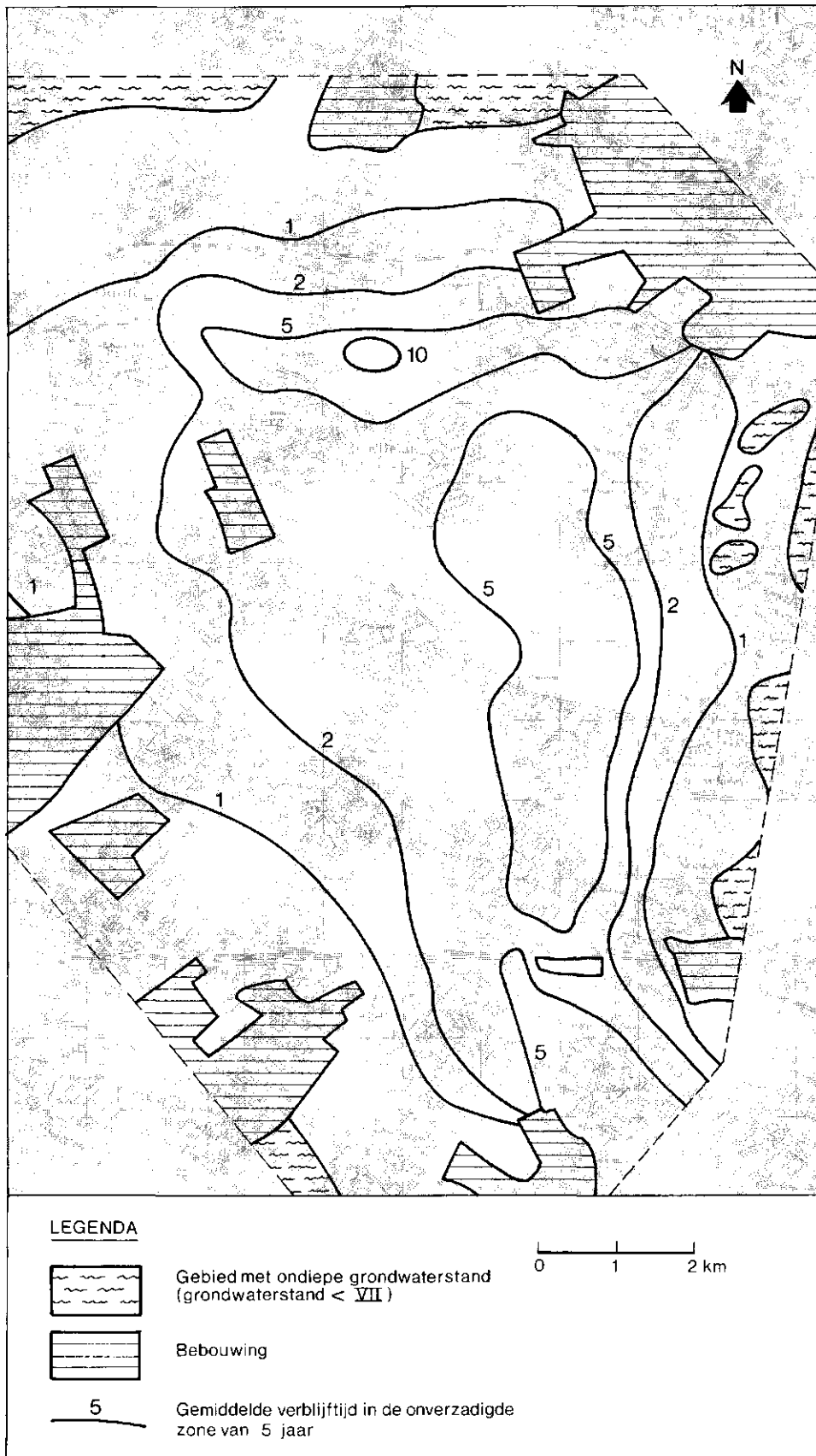
#### Resultaten

In dit hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de berekende *gemiddelde verblijftijd* in de onverzadigde zone in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug, waarna deze wordt vergeleken met de verblijftijd in de verzadigde zone in de omgeving van een waterwinplaats. De belangrijkste aannamen die bij de berekening zijn gedaan zijn kort samengevat:

- de gemiddelde verblijftijd geldt voor conservatieve stoffen;
- de gemiddelde verblijftijd valt samen met het tijdstip dat de oorspronkelijk aanwezige hoeveelheid vocht is verdrongen ( $a = 1$ ; vergl. 1);
- de verblijftijdspreiding ten gevolge van dispersie neemt relatief ten opzichte van de gemiddelde verblijftijd af bij toeneming van de gemiddelde verblijftijd;
- al het vocht in de onverzadigde zone van zandgronden is mobiel;
- het neerslagoverschot van de periode 1973 t/m 1976 is als een langjarig gemiddelde waarde te beschouwen;
- aan de randen van het gebied, waar de verblijftijd ten gevolge van de aanwezigheid van ondiepe grondwaterstanden relatief klein is, is de verblijftijd ten onrechte met vergl. 4 bepaald;
- de granulaire samenstelling van de onverzadigde zone is in het gehele gebied over de gehele dikte steeds constant verondersteld.

#### Gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone

De verblijftijden zullen niet, zoals dit over het algemeen wel gebruikelijk is, worden gepresenteerd als één waarde voor een bepaalde plaats maar in de vorm van meerdere waarden. Dit hangt samen met het doel van de eerste onderzoeksfase. Nagegaan moest worden in welke orde van grootte de verblijftijden liggen en hoe de grootte ervan wordt beïnvloed door gebiedseigenschappen. Eventueel zal in de tweede fase van het onderzoek, nadat de gebiedseigenschappen zo goed mogelijk bepaald zijn, één definitieve waarde voor de verblijftijd op een bepaalde plaats worden gepresenteerd. In het kader van de eerste fase van het onderzoek zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de invoergegevens zijn gewijzigd die informatie geven over de granulaire samenstelling van de ondergrond in het gehele gebied en de grootte van het neerslagoverschot. In het bovenste gedeelte van tabel II wordt aangegeven welke combinaties dit betreft. Verder is in deze tabel aangegeven welk gedeelte van het gebied van de Utrechtse Heuvelrug een gemiddelde verblijftijd heeft groter dan een bepaalde waarde. De waarden in de tabel zijn afgeleid van kaarten waarop lijnen met gelijke verblijftijd staan aangegeven. Op kaart 1 en 2 wordt voor een gedeelte van het onderzoeksgebied een voorbeeld gegeven van de grootte van de *gemiddelde verblijftijden* indien de ondergrond in het gehele gebied respectievelijk uit grof zand of uit matig grof zand zou bestaan. Uit tabel II en kaart 1 en 2 kan worden afgeleid dat de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond een zeer grote invloed heeft op de gemiddelde verblijftijd in



Kaart 1 - De gemiddelde verblijftijd (jaar) in de onverzadigde zone indien deze uit grof zand bestaat.

de onverzadigde zone. Hoe fijner de textuur van de zandgrond is des te groter is de verblijftijd. Indien de onverzadigde zone in

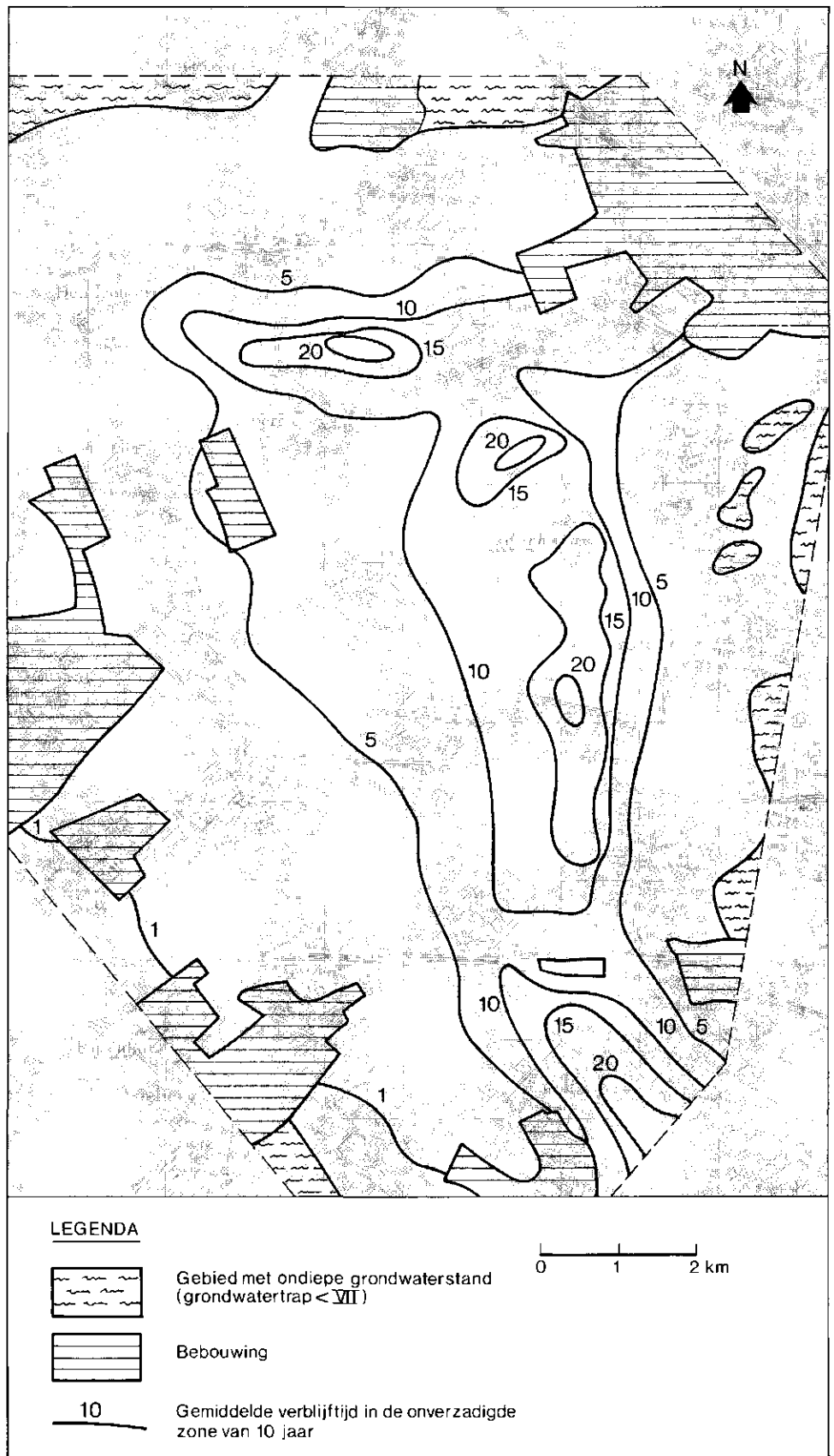
het gehele gebied uit grof zand zou bestaan, beslaat het gehele gebied met een verblijftijd groter dan 10 jaar slechts een oppervlakte

van ca. 11 ha. Als echter de onverzadigde ondergrond uit matig grof of uit matig fijn zand zou bestaan dan zou ca. 2.500 à 3.000 ha van het onderzoeksgebied worden ingenomen door gebieden met een verblijftijd groter dan 10 jaar. Indien de ondergrond uit matig fijn zand zou bestaan dan komen zelfs gebieden (ca. 56 ha) met een verblijftijd groter dan 25 jaar voor. Uit tabel II kan verder worden afgeleid dat ook de grootte van het neerslagoverschot een vrij grote invloed heeft op de berekende gemiddelde verblijftijd. De verblijftijden in de laatste 2 kolommen van tabel II gelden echter voor extreme situaties. Het is namelijk nog maar de vraag of het geringe neerslagoverschot van 1975 of het grote overschot van 1974 ooit als een langjarig gemiddelde waarde zal voorkomen (gemiddelde van een 5- à 10-jarige periode). Daarentegen zullen variaties van grof zand tot matig fijn zand zowel in het horizontale als in het verticale vlak voorkomen. De verblijftijd die voor grof zand is berekend moet dus als een benedengrens voor de gemiddelde verblijftijd worden beschouwd. De werkelijke situatie in het gebied van de Utrechtse Heuvelrug zal een compositie zijn van de kaartbeelden met verblijftijden voor grof (kaart 1), matig grof (kaart 2) en matig fijn zand. Voor de verblijftijdenkaart van matig fijn zand zie Van Lanen [1983].

#### *Verblijftijden in de omgeving van een waterwinplaats*

In 1980 heeft de Commissie Bescherming Waterwingebieden (CBW) richtlijnen en aanbevelingen uitgebracht voor de bescherming van waterwingebieden voor de drinkwatervoorziening. Om de watervoorziening op korte en middellange termijn veilig te stellen stelt de commissie voor een beschermingsgebied rondom het feitelijke waterwingebied vast te stellen. Voor gebieden met zand- en grindlagen in de ondergrond is het mogelijk het te beschermen gebied te bepalen aan de hand van de verblijftijden. De buitenste begrenzing van het beschermingsgebied wordt gevormd door een denkbeeldige lijn waarvandaan een waterdeeltje er 25 jaar over doet om in de pompput terecht te komen. Aanbevolen wordt om de berekening van de verblijftijd in eerste instantie uit te voeren voor het watervoerende pakket. In het kader van dit onderzoek is dit met het rekenprogramma FLOP [Van den Akker, 1982] gedaan voor een fictieve grondwaterwinplaats op de Utrechtse Heuvelrug (kaart 3). Indien er in het waterwingebied beschermende deklagen boven het watervoerend pakket voorkomen, stelt de commissie voor van geval tot geval nader te bekijken of er rekening mee moet worden gehouden. Den Blanken [1979] heeft berekend wat voor invloed afdekkende,

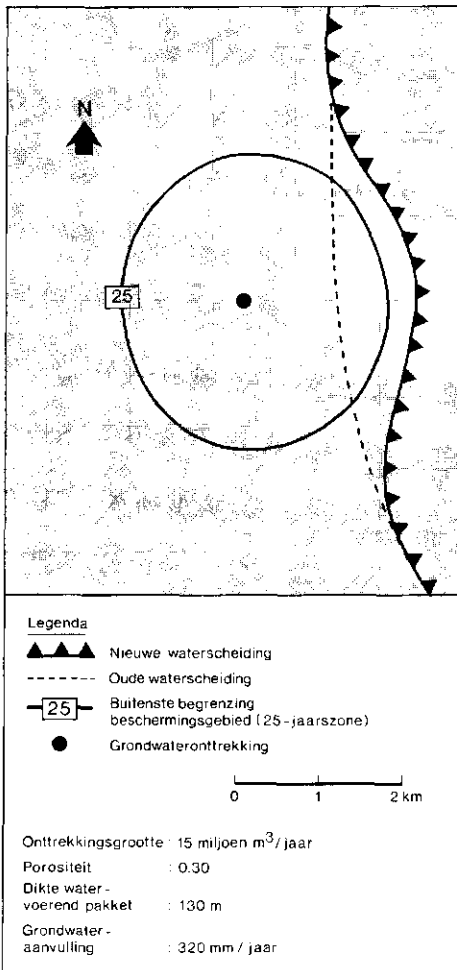
slechtdoorlatende lagen in de verzadigde zone en onderbrekingen daarin hebben op verblijftijden van het naar de winning toestromend water. In het laatste gedeelte van dit artikel zal nader worden ingegaan op de invloed van het onverzadigde gedeelte van de afdeklaag op genoemde verblijftijden. In grote delen van Nederland zal bij het vaststellen van het te beschermen gebied vanwege de ondiepe grondwaterstanden geen rekening behoeven te worden gehouden met de (geringe) verblijftijd in de onverzadigde zone van de afdeklaag. In gebieden met diepe grondwaterpiegels kan men echter wel overwegen hiermee rekening te houden (bijv. door het verlenen van een ontheffing voor bepaalde activiteiten). Voor de niet-bestaande grondwaterwinplaats op de Utrechtse Heuvelrug is nagegaan in welk deel van de beschermingszone (kaart 3) eventueel met minder gebruiksbependingen zou kunnen worden volstaan, indien niet alleen wordt uitgegaan van de verblijftijd in het watervoerende pakket maar ook rekening wordt gehouden met de verblijftijd in de onverzadigde zone. Omdat de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond nog niet in detail is geanalyseerd is het betreffende deel van de beschermingszone vastgesteld uitgaande van grof zand (kaart 4) en van matig grof zand (kaart 5). Uit de kaartbeelden kan men afleiden dat het deel van het beschermingsgebied waar de verblijftijd vanaf maaiveld (incl. onverzadigde zone) groter is dan 25 jaar behoorlijk groot kan zijn. Indien de onverzadigde zone uit grof zand zou bestaan, zou ca. 20% van het beschermingsgebied worden ingenomen door gebieden waar de verblijftijd vanaf maaiveld groter is dan 25 jaar. Indien de onverzadigde zone uit matig grof zand bestaat bedraagt dit percentage zelfs ca. 40%. Op grond van deze conclusie valt het te overwegen bij het vaststellen van de gebruiksbependingen binnen het beschermingsgebied, in gebieden met diepe grondwaterstanden, rekening te houden met de verblijftijd in de onverzadigde zone. Het betreft hier bijvoorbeeld het beschermingsgebied van waterwinplaatsen op de Hondsrug, de Overijsselse stuwwallen, de Veluwe, de Utrechtse Heuvelrug, Het Gooi, de stuwwal van Nijmegen alsmede een deel van de waterwinplaatsen in Zuid-Limburg. Bij het in de overweging betrekken van de verblijftijd in de onverzadigde zone moet men zich realiseren dat deze verschilt van die in slechtdoorlatende afdeklagen doordat op basis van met name de grofheid van het zand uitgaande van regionale gegevens altijd een schatting gegeven kan worden van de minimale, gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone. Lokaal zal de verblijftijd alleen maar groter zijn. Daarnaast is er met uitzondering van ontgravingen en onder-



Kaart 2 - De gemiddelde verblijftijd (jaar) in de onverzadigde zone indien deze uit matig grof zand bestaat.

grondse opslag ook geen sprake van de aanwezigheid van zogenaamde 'gaten' in de onverzadigde zone, dit in tegenstelling tot

wat men aantreft of vermoedt bij sommige kleilagen. Overigens moet bij het in overweging betrekken van de gemiddelde



Kaart 3 - Het berekende beschermingsgebied rondom een fictieve waterwinplaats op de Utrechtse Heuvelrug, alleen gebaseerd op de verblijftijden in de verzadigde zone.

verblijftijd in de onverzadigde zone wel worden nagegaan of de controlemogelijkheid op de grondkwaliteit niet afneemt ten opzichte van de situatie waarbij de bescherming alleen maar uitgaat van de verblijftijden in het watervoerend pakket.

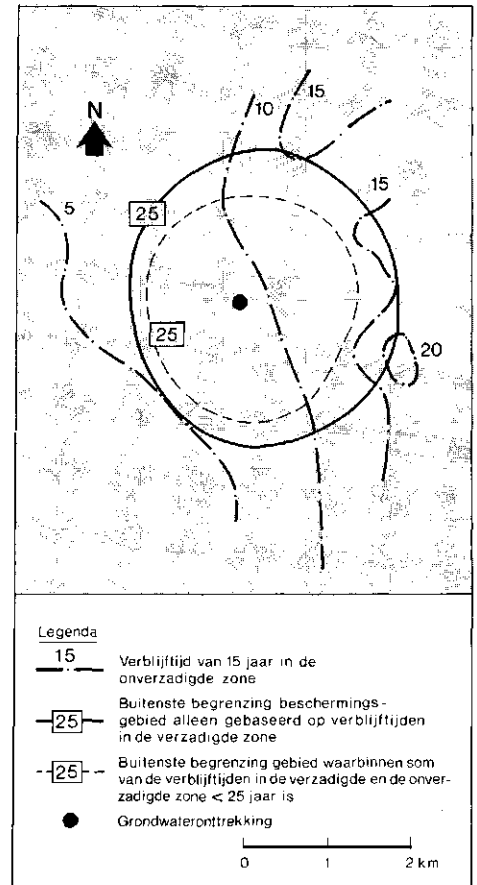
**Conclusies en aanbevelingen**

Uit de eerste fase van het onderzoek naar de verblijftijd van water in de onverzadigde zone van de Utrechtse Heuvelrug kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

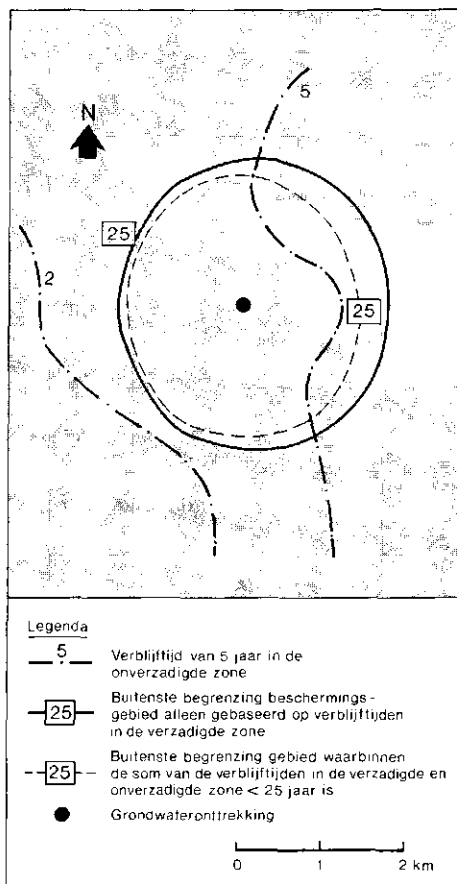
- Uit de gehanteerde rekenmethodiek (vergl. 2 en 4) volgt dat de gemiddelde verblijftijd recht evenredig is met de dikte van de onverzadigde zone en de grootte van het vochtgehalte en bij benadering omgekeerd evenredig met de grootte van het neerslagoverschot.
- De gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone blijkt ten gevolge van de grote invloed van de granulaire samenstelling op het vochtgehalte (tabel I) sterk afhankelijk te zijn van de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond (kaart 1 en 2). Het traject waarbinnen de granulaire samenstelling in een bepaald gebied zal liggen is wel

ongeveer bekend. Van de ruimtelijke verbreiding in een gebied is echter veel minder bekend.

- De gemiddelde verblijftijd in de onverzadigde zone wordt ook vrij sterk beïnvloed door de grootte van het neerslagoverschot. Indien men echter rekening houdt met de verschillende bodemgebruiksvormen (naaldbos, zandverstuiving, akkerbouwgebied, grasland e.d.) en goed definieert voor welke meteorologische situatie (nat langjarig gemiddelde of droog langjarig gemiddelde) men de verblijftijd wil weten, is de bijdrage in de onbetrouwbaarheid ten gevolge van de niet goed bekende granulaire samenstelling groter dan van het neerslagoverschot.
  - Een aantal winplaatsen in Nederland heeft een beschermingsgebied dat (gedeeltelijk) ligt in gebieden met diepe tot zeer diepe grondwaterspiegels. De gemiddelde verblijftijd van een waterdeeltje vanaf het maaiveld tot aan de pompputten is in deze gebieden, zeker indien de onverzadigde ondergrond uit matig grof of matig fijn zand bestaat, nogal wat groter dan in het geval dat men uitsluitend uitgaat van de verblijftijd in het watervoerend pakket. Dit kan wel oplopen van enkele jaren tot meer dan 20 jaar.
- In de praktijk zou derhalve bij het vaststellen van de gebruiksbepalingen in de bescher-



Kaart 5 - Deel van beschermingsgebied (kaart 3) waarbinnen de verblijftijden vanaf maaiveld groter zijn dan 25 jaar; uitgangspunt: matig grofzandige onverzadigde zone.



Kaart 4 - Deel van beschermingsgebied (kaart 3) waarbinnen de verblijftijden vanaf maaiveld groter zijn dan 25 jaar; uitgangspunt: grofzandige onverzadigde zone.

mingszones hiermee rekening kunnen worden gehouden. Nu de eerste fase van het onderzoek is afgerond kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Voor een betrouwbare voorspelling van de gemiddelde verblijftijd is een goed beeld van de ruimtelijke opbouw van de granulaire samenstelling van de onverzadigde ondergrond noodzakelijk. Dit kan worden verkregen door een analyse van boorgegevens aangevuld met statistische technieken.
- De gehanteerde rekenmethodiek is afgeleid uit de resultaten van kolomproeven. Kolomproeven, die o.a. tot doel hebben de uitspoeling van meststoffen of de ontzouting van geïrrigeerde gronden te onderzoeken, worden vaak uitgevoerd met korte kolommen en veel grotere fluxen dan het neerslagoverschot. De geldigheid van de rekenmethode zou echter moeten worden geverifieerd met langere kolommen of lysimeters en met waarden voor de instromende flux die de grootte van het neerslagoverschot beter benaderen.

**Literatuur**

Akker, C. van den (1982). *Numerical analysis of the stream function in plane groundwater flow*. Dissertatie Technische Hogeschool Delft.  
 Anderson, J. L. and Bouma, J. (1977). *Water movement*

through pedal soils. II: Unsaturated flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 419-423.

Biggar, J. W. and Nielsen, D. R. (1967). *Miscible displacement and leaching phenomenon. Irrigation of agriculture land.* Agronomy 11, ASA madison, Wisconsin, 254-274.

Blanken, M. G. M. den (1979). *Hydrologische beschouwing over de beschermende werking van afdekkende lagen met het oog op de grondwaterkwaliteit.* KIWA rapport SWE 223.

Bouma, J., Belmans, C., Dekker, L. W. and Jeurissen, W. J. M. (1983). *Assessing the suitability of soils with macropores for subsurface liquid waste disposal.* J. of Envir. Qual. 12 (3).

Commissie Bescherming Waterwingebieden (1980). *Richtlijnen en aanbevelingen voor de bescherming van waterwingebieden.* VEWIN/RID rapport.

Day, P. R. and Forsythe, W. M. (1957). *Hydronamic dispersion of solutes in the soil moisture stream.* Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21: 477-480.

Drecht, G. van (1982). *Simulatie van het verticale, niet-stationaire transport van water en een daarin opgeloste stof in de grond (model ONZAT).* RID-mededeling (in voorbereiding).

Drecht, G. van (1983). *Verblijftijden in de onverzadigde zone.* RID-rapport in het kader van de kwetsbaarheidskartering van Nederland (in voorbereiding).

Laat, P. J. M. de (1980). *Model for unsaturated flow above a shallow water-table applied to a regional sub-surface flow problem.* Agric. Res. Rep. 895, Wageningen.

Lanen, H. A. J. van (1983). *Globale verblijftijden in de onverzadigde zone van de Utrechtse Heuvelrug.* RID-rapport.

Meinardi, C. R. (1983). *Groundwater recharge in the Rhine fluvial plain.* Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft; Hydrogeologische Beitrage, 8 (in voorbereiding).

Tyler, D. D. and Thomas, G. W. (1981). *Chloride movement in undisturbed soil columns.* Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 459-461.

Wauters, F. (1980). *Experimentele studie van de stroming van een pollutant in een kunstmatige zandbodem.* Afstudeerwerk, Fakulteit der Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit Brussel.



De grondradar is inzetbaar op moeilijk toegankelijke terreinen zoals bijvoorbeeld deze inmiddels beplante stortplaats. Heidemij Adviesbureau BV te Arnhem.



## Bodemonderzoek nu ook met radar

Heidemij Adviesbureau te Arnhem heeft de diverse gebruiksmogelijkheden van grondradar onderzocht en toegepast. De ervaringen zijn positief, zowel met het traceren van kabels en leidingen alsook bij het opsporen van vaten chemisch afval. Het voordeel van de grondradar is, dat er in raaien een continu beeld van de ondergrond kan worden verkregen.

Het principe van deze onderzoeksmethode berust op het radarsonde uitzenden en terugontvangen van signalen. Elementen met verschillende structuren reflecteren elk op een andere wijze. Deze variaties in reflecties kunnen worden geregistreerd door middel van een tape, een oscilloscoop of in een continu-beeld worden vastgelegd met een printer. Deze registratie dient daarna te worden geïnterpreteerd.

Hoewel de grondradar door zijn grote mobiliteit en beperkte omvang gemakkelijk en snel inzetbaar is, moet het terrein voor een kleine trekker en/of een bestelbus berijdbaar zijn.

De grondradar kan voor meerdere doeleinden worden gebruikt:

**Kabels en leidingen:** indien door onvolledige registratie de ligging van kabels en leidingen niet nauwkeurig genoeg bekend is, kan met de grondradar een exacte plaatsbepaling worden aangegeven.

Dit is onder andere gebleken bij het opsporen van kabels in de nabijheid van een te heien damwand.

**Bodemonderzoek:** indien het vermoeden bestaat, dat op een locatie illegale stortingen hebben plaatsgevonden met bijvoorbeeld vaten, al dan niet gevuld met chemisch afval, komt de vraag naar voren op welke wijze deze vaten zo efficiënt mogelijk kunnen worden opgespoord en verwijderd.

Toepassing van grondradar kan in een aantal gevallen gerichte sanering mogelijk maken.

De methode is inmiddels ingezet op een stortplaats van bouw- en sloopafval waar volgens mededeling meer dan 1.000 vaten werden gestort.

## INGEZONDEN

### Reactie op: 'Hydrologische effecten van verschillende typen grondwateronttrekkingen in relatie tot de winbare hoeveelheid grondwater'

Al sinds het droge jaar 1976, toen er door de landbouw enorme hoeveelheden grondwater voor beregening zijn gewonnen, vindt er een discussie plaats naar de invloed van grondwateronttrekking voor beregening op de winningsmogelijkheden van grondwater voor de drink- en industriewatervoorziening. Van der Giessen voegt aan deze discussie een waardevolle bouwsteen toe (H<sub>2</sub>O (16), 1983, pag. 534-537). Hij komt op grond van hydrologisch modelonderzoek in het modelgebied 'Het Klooster' (Geld.) tot de conclusie dat onafhankelijk van het type grondwateronttrekking, winning van eenzelfde hoeveelheid grondwater op jaarbasis leidt tot ongeveer dezelfde grootte van de maximale gebiedsgemiddelde verlaging van het freatische vlak. Dit impliceert dat grondwaterwinning voor beregening in de landbouw (niet-permanente en verspreide grondwateronttrekking) tot dezelfde maximale gebiedsgemiddelde verlaging leidt als grondwaterwinning door waterleidingbedrijven (permanente en geconcentreerde grondwateronttrekking), mits uiteraard op jaarbasis evenveel wordt onttrokken. Gebaseerd op het vastgestelde feit dat de maximale gebiedsgemiddelde verlaging van het freatische vlak onafhankelijk is van het onttrekkingstype stelt Van der Giessen dat sommatie van de hoeveelheden benodigd grondwater in de sectoren drink- en industriewatervoorziening en landbouw ter vergelijking met de raming van de winbare hoeveelheid grondwater per regio in dit stadium als een redelijke maatstaf kan worden beschouwd om vanuit landelijk gezichtspunt een indicatie te verkrijgen van die gebieden waar met betrekking tot de grondwaterwinning problemen zijn te verwachten.

Bij de conclusies van Van der Giessen moet