

rijksinstituut voor volksgezondheid en milieuhygiëne

Rapport nr. 728472002

Eenvoudige methode voor de schatting van
verblijftijden van grondwater in de
verzadigde zone

H.A.M. Thunnissen

augustus 1987

Rapport in het kader van het project
"Stikstof in grondwater".

22/2661

**BIBLIOTHEEK
STARRINGGEBOUW**

**RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEUHYGIENE
BILTHOVEN**

Rapport nr. 728472002

Eenvoudige methode voor de schatting van
verblijftijden van grondwater in de verza-
digde zone

H.A.M. Thunnissen

augustus 1987

Rapport in het kader van het project:
"stikstof in grondwater"

Dit onderzoek is verricht in opdracht en ten laste van het Directoraat-
Generaal voor de Milieuhygiëne, Directie Bodem, Water, Stoffen.
(Opdrachtbrief nr. BWS/2254290 d.d. 31-7-1984).



0000 0240 9601

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	2
1. INLEIDING	3
2. THEORIE	4
3. VERBLIJFTIJDEN IN WATERVOERENDE PAKKETTEN	8
4. VERBLIJFTIJDEN IN GEBIEDEN MET WEGZIJGING EN KWEL	12
5. DE INVLOED VAN RADIALE STROMING OP DE VERBLIJFTIJDEN IN HET FREATISCH WATERVOEREND PAKKET	19
6. GROOTTE VAN DE VERSCHILLENDE DRAINAGECOMPONENTEN	20
7. DISCUSSIE EN CONCLUSIES	22
SAMENVATTING	24
LITERATUUR	26
BIJLAGE 1:	27

VOORWOORD

In het kader van het raamproject 'stikstof in grondwater' (projectnr. 840252) wordt o.a. aandacht besteed aan de uitspoeling van nitraat naar het oppervlaktewater (deelprojectnr. 850020). In overleg met de opdrachtgever is besloten dit deelproject een bredere opzet te geven en onderzoek te verrichten naar de verblijftijden in en op de bodem, de grootte en de samenstelling van de verschillende componenten van het drainagewater uit de Nederlandse zandgebieden. Voor u ligt het eerste deelrapport over dat onderwerp. Hierin wordt een eenvoudige methode gepresenteerd voor de schatting van de verblijftijden van het grondwater in de verzadigde zone. Aanvankelijk was het de bedoeling in dit rapport naast de onderliggende theorie ook de toepassing daarvan in een studiegebied op te nemen. Door omstandigheden is dit nog niet verwezenlijkt. Wel is een bijlage opgenomen met een voorstel over de wijze waarop de beschreven theorie kan worden toegepast in de Nederlandse zandgebieden.

VERZENDLIJST

- 1 - 3 Directeur Hoofdafdeling Bodem van de Directie Bodem, Water, Stoffen.
- 4 Secretaris-Generaal van het Ministerie van Welzijn, Volksgezondheid en Cultuur.
- 5 Directeur Generaal voor de Milieuhygiëne
- 6 Plaatsvervangend Directeur Generaal voor de Milieuhygiëne
- 7 Directie RIVM
- 8 Dr.Ir.T.Schneider
- 9 Ir.Tj.Hofker
- 10 Ir.N.D.van Egmond
- 11 Ir.W.Cramer
- 12 Ir.W.van Duijvenbouden
- 13 Ir.C.R.Meinardi
- 14 Ir.R.van den Berg
- 15 Ir.M.J.H.Pastoors
- 16 Ir.G.Krajenbrink
- 17 Ir.L.J.M.Boumans
- 18 Ing.W.J.Post
- 19 Ir.G.van Drecht
- 20 J.van der Valk
- 26 - 27 Auteur
- 28 - 29 SGO/LBG archief
- 30 - 31 Bureau Project- en Rapportregistratie
- 31 - 45 Reserve exemplaren

1. INLEIDING

Een bedreiging van het milieu van bodem en water treedt op als gevolg van de diffuse belasting van het maaiveld met verontreinigende stoffen. Als voorbeelden van diffuse belastingen kunnen o.a. worden genoemd: toediening van meststoffen en bestrijdingsmiddelen aan landbouwgronden. Het belangrijkste middel van transport van deze verontreinigingen is de stroming met het water. Opgeloste stoffen zullen met het neerslagoverschot worden meegevoerd en uiteindelijk via het grondwater in het oppervlaktewater terechtkomen. In verband met de herstel mogelijkheden van verontreinigd grondwater is het van belang inzicht te hebben in de verblijftijden van het grondwater.

In dit rapport wordt eerst een theoretische afleiding gegeven voor de relatie tussen de concentratie in het water dat aan de bovenzijde van de verzadigde zone infiltreert en de concentratie in het water dat uit deze zone treedt. Vervolgens wordt aangegeven hoe met deze relatie op eenvoudige wijze een schatting kan worden gemaakt van de verblijftijden in de verzadigde zone.

Dit rapport is geschreven met in het achterhoofd dat de methodiek moet worden toegepast voor grote delen van Nederland. Daarom dient zoveel mogelijk gebruik te worden gemaakt van gegevens die op eenvoudige wijze zijn af te leiden uit bestaand kaartmateriaal en bestaande meetgegevens.

2. THEORIE

Bij de afleiding van de relatie tussen de concentratie in het water dat aan de bovenzijde van de verzadigde zone infiltreert en de concentratie in het in de sloten uittredende water wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen (zie fig. 1):

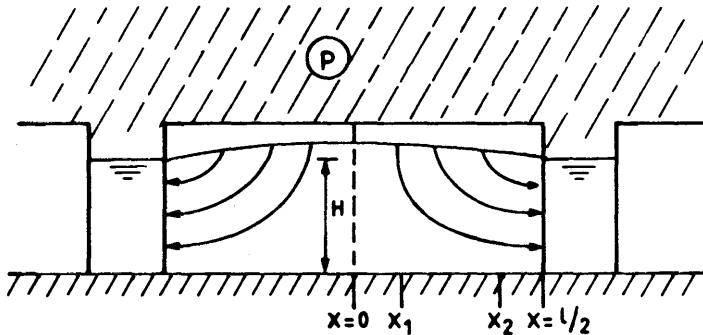


Fig. 1: Grondwaterstroming naar parallelle ontwateringsmiddelen

- De stroming onder invloed van neerslag en afvoer is stationair tussen parallelle ontwateringsmiddelen
- De porositeit, doorlatendheid en dikte van het watervoerende pakket zijn constant. De veronderstelling van constante dikte van het watervoerende pakket is bij benadering juist indien deze dikte zodanig is dat de stijghoogteverschillen ten opzichte hiervan verwaarloosd mogen worden
- De stroming is bij benadering horizontaal
- Er vindt geen menging plaats door diffusie en dispersie.

Om een relatie af te leiden tussen de concentratie van het water dat aan de bovenzijde van de verzadigde zone infiltreert en de concentratie van het water dat deze zone verlaat moet de verblijftijden spreiding bekend zijn. Hiervoor wordt de formulering die is afgeleid door Ernst (1973) gebruikt. We beschouwen de stroming door een watervoerend pakket met porositeit ϵ en dikte D naar parallelle ontwateringsmiddelen waartussen de afstand l bedraagt (zie fig. 1). Midden tussen de sloten wordt $x=0$ gesteld. De stroming op afstand x van de waterscheiding per eenheid slootlengte (q_x) kan worden geschreven als:

$$q_x = I x \quad (L^2/T) \quad (1)$$

Hierin is I de grondwatervoeding ($L.T^{-1}$). De verblijftijd tussen x en $x + dx$ is nu gelijk aan:

$$dT = \frac{\epsilon D dx}{q_x} = \frac{\epsilon D}{I} \cdot \frac{dx}{x} \quad (T) \quad (2)$$

De verblijftijd van een waterdruppel vanaf een punt met coördinaat x_1 tot een punt met coördinaat x_2 (zie fig. 1) waarbij $x_2 > x_1$ wordt gevonden door integratie van vergl. (2):

$$\Delta T = \frac{\epsilon D}{I} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} = \frac{\epsilon D}{I} \ln \frac{x_2}{x_1} \quad (T) \quad (3)$$

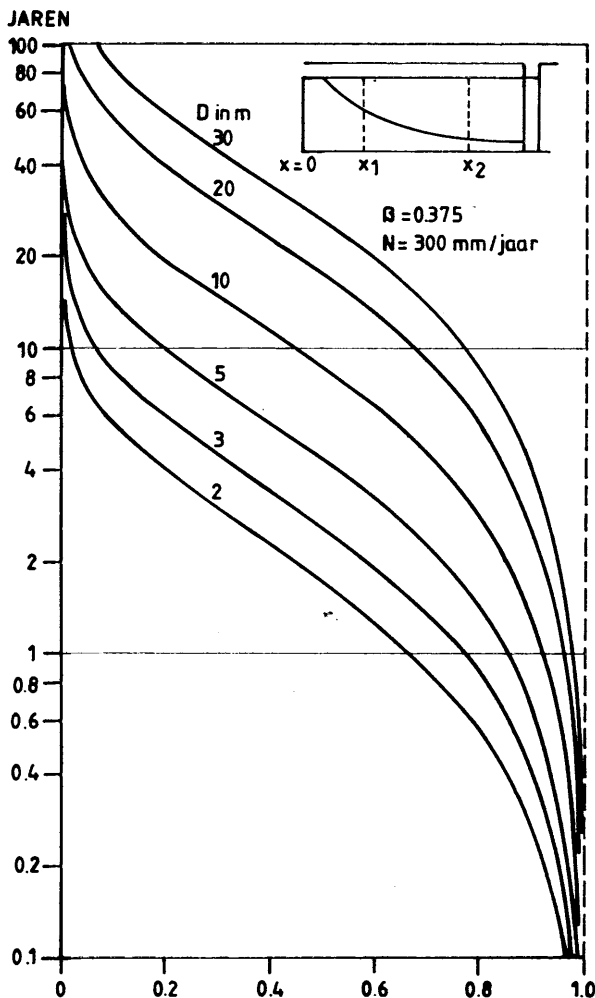


Fig. 2: Transporttijden volgens vergl. (3) voor een stroomlijn vanaf een punt met coördinaat x_1 tot een punt met coördinaat x_2 (naar Ernst, 1973).

Vergelijking (3) is grafisch afgebeeld in fig. 2. De transporttijd van een waterdruppel tussen afstand x van de waterscheiding en de dichtstbij gelegen sloot ($x = \ell/2$) is dus gelijk aan:

$$t = T_x = \frac{\epsilon D}{I} \ln \frac{\ell}{2x} \quad (T) \quad (4)$$

Het blijkt dat de transporttijd bij symmetrische drainage van neerslagoverschot primair wordt bepaald door de laagdikte en in mindere mate door de afstand tussen de open leidingen.

De voorstelling in fig. 1 is nogal schematisch. Vaak zal de onderkant van de drainage geul niet samenvallen met de onderste begrenzing van het doorstroomde pakket. Het gevolg is dat de stroming in de buurt van de drain een radiale component vertoont. Op de invloed van de verwaarlozing van de radiale stromingscomponent op de berekende verblijftijden wordt in par. 5 nader ingegaan.

Tot nu toe is steeds gesproken over het bovenste, meestal freatische watervoerend pakket. Het is daarom van belang op te merken dat vergl. (4) in principe ook van toepassing is op diepere watervoerende pakketten.

Op tijdstip T_x is de concentratie van het uit de verzadigde zone tredende water samengesteld uit twee bijdragen:

- Water met een concentratie gelijk aan die van het infiltrerende water (C_{input}) en afkomstig van alle stroomlijnen met een verblijftijd korter dan T_x .
- Water met een concentratie gelijk aan de oorspronkelijke concentratie in het watervoerende pakket (C_o) en afkomstig van alle stroomlijnen met een verblijftijd groter dan T_x .

Met behulp van vergl. (1) kunnen de beide fluxen die aan één zijde van de waterloop uit het verzadigde pakket treden worden berekend (Van der Molen, 1975; Van Ommen, 1985):

$$\text{concentratie } C_{input}: I \cdot (\ell/2 - x) \quad (L^2/T) \quad (5a)$$

$$\text{concentratie } C_o: I \cdot x \quad (L^2/T) \quad (5b)$$

De gemiddelde concentratie in het uittredende grondwater is derhalve gelijk aan:

$$\bar{C} = \frac{I \cdot (\ell/2 - x) \cdot C_{input} + I \cdot x \cdot C_o}{I \cdot \ell/2} = \frac{(\ell/2 - x) C_{input} + x C_o}{\ell/2} \quad (M/L^3) \quad (6)$$

Gecombineerd met vergl. (4) levert dit:

$$\bar{C}(t) = C_{\text{input}} + (C_o - C_{\text{input}}) \cdot e^{-It/\epsilon D} \quad (7)$$

Van Ommen (1985) toonde aan dat vergl. (7) ook op gaat voor stroming naar een volkomen put in freatisch water.

Het is opmerkelijk dat deze relatie exact gelijk is aan het verband tussen de effluentconcentratie van een reservoir waarin volledige menging optreedt en de tijd (Van der Molen, 1975). Vergelijking (7) laat verder zien dat de gemiddelde concentratie $\bar{C}(t)$ in het uittredende grondwater bij gegeven waarden voor de grondwatervoeding I , de porositeit ϵ en de concentraties C_{input} en C_o slechts afhankelijk is van de dikte van het watervoerende pakket. Processen als adsorptie en afbraak zijn eenvoudig in vergl. (7) op te nemen (aangepast naar Van Ommen, 1985):

$$\bar{C}(t) = \frac{A}{A+B} C_{\text{input}} + (C_o - \frac{A}{A+B} C_{\text{input}}) \cdot e^{-(A+B)t} \quad (8)$$

$$\text{met } A = \frac{I}{\epsilon D (1+R)}, \quad B = \frac{\alpha}{1+R} \quad \text{en } R = \frac{\rho k}{\epsilon}$$

α = afbraak constante (T^{-1})

ρ = droge dichtheid van de grond ($M.L^{-3}$)

k = constante ($L^3.M^{-1}$)

Factor R is de zogenaamde "distribution ratio", die de verhouding weergeeft tussen de hoeveelheid van de betreffende stof die in de vaste fase zit en de hoeveelheid die aanwezig is in de waterfase. De relatie tussen de concentratie van de stof in de waterfase (c) en de concentratie in de vaste fase (s) wordt in dit geval gegeven door de volgende adsorptie isotherm:

$$s = k \cdot c \quad (M.M^{-1}) \quad (9)$$

Hierin is k (L^3/M^{-1}) een constante die afhankelijk is van de opgeloste stof en het bodemmateriaal. Verondersteld wordt dat de afbraak kan worden beschreven met een eerste orde reactie, d.w.z. dat de afbraaksnelheid evenredig is met de concentratie van de betreffende stof.

3. VERBLIJFTIJDEN IN WATERVOERENDE PAKKETTEN

De verblijftijdenspreiding geeft informatie over de snelheid waarmee een watervoerend pakket wordt verontreinigd en over de hersteltijd van het systeem na beëindiging van een verontreinigend proces. De verblijftijd van een stof is natuurlijk sterk afhankelijk van de fysische en chemische eigenschappen van de betreffende stof, waarbij gedacht moet worden aan processen als adsorptie, vervluchtiging, precipitatie, biodegradatie e.d. In dit hoofdstuk wordt slechts ingegaan op de verblijftijden van conservatieve stoffen ($\alpha = R = 0$, zie hoofdstuk 2).

De verblijftijden in een watervoerend pakket zijn berekend met vergl. (4). Tabel 1 geeft voor een aantal waarden van D en x de berekende verblijftijden. De afstand tot de waterscheiding x is uitgedrukt als fractie van de afstand tussen de ontwateringsmiddelen. De porositeit ϵ en de grondwatervoeding I zijn gelijkgesteld aan 0.3 respectievelijk 0.3 m/jaar.

Tabel 1: Met vergl. (4) berekende waarden van de verblijftijd in een watervoerend pakket (T_x) als functie van de afstand tot de waterscheiding (x) en de dikte van het watervoerende pakket (D) ($\epsilon = 0.3$ en $I = 0.3$ m/jaar)

x	T_x (jaren)					
	D (m)					
	2	5	10	20	50	100
$l/20$	4.6	12	23	46	115	230
$l/10$	3.2	8	16	32	80	161
$l/4$	1.4	3.5	7	14	35	69

Duidelijk blijkt de grote invloed van de dikte van het watervoerende pakket op de verblijftijden. Meinardi (1986) komt met een enigszins andere benadering tot soortgelijke resultaten.

Een interessante vraag is hoe lang het duurt voor een bepaald gedeelte van het watervoerende pakket is schoongespoeld. Deze vraag kan worden beantwoord met behulp van vergl. (7). Aangenomen wordt dat de initiële concentratie (C_0) van een conservatieve verontreiniging gelijk is aan 1. Wanneer op $t=0$ de

verontreiniging wordt gestopt ($C_{\text{input}} = 0$) dan geldt voor de gemiddelde concentratie in het uittredende water:

$$\bar{C}(t) = e^{-It/\epsilon D} \quad (10)$$

De fractie van de totale hoeveelheid verontreiniging die op tijdstip t uit het systeem verdwenen is $F(t)$, is dan gelijk aan:

$$F(t) = \frac{\int_0^t e^{-It/\epsilon D} dt}{\int_0^\infty e^{-It/\epsilon D} dt} = 1 - e^{-It/\epsilon D} \quad (11)$$

Deze fractie is gelijk aan de fractie van de in het pakket aanwezige hoeveelheid water, die op tijdstip t is ververst.

Hetzelfde resultaat kan ook op een andere wijze worden gevonden, waarbij gebruik wordt gemaakt van de analogie van het stoftransport in een watervoerend pakket met het stoftransport in een volledig gemengd reservoir (zie hoofdstuk 2). Op tijdstip t is de nog in het pakket aanwezige hoeveelheid verontreiniging $V(t)$ per meter slootlengte gelijk aan:

$$V(t) = \bar{C}(t) \epsilon D \ell/2 \quad (\text{M L}^{-1}) \quad (12)$$

Met deze vergelijking kan aan de hand van de geborgen hoeveelheid water en de concentratie van het uittredende water op eenvoudige wijze een schatting worden gemaakt van de hoeveelheid verontreiniging die nog in het pakket aanwezig is. De fractie van de totale hoeveelheid verontreiniging die op tijdstip t uit het systeem is verdwenen is dus gelijk aan:

$$F(t) = 1 - \frac{\bar{C}(t) \epsilon D \ell/2}{C_0 \epsilon D \ell/2} = 1 - e^{-It/\epsilon D} \quad (13)$$

Het resultaat is gelijk aan vergl. (11). In fig. 3 is deze relatie grafisch weergegeven. Deze grafiek stelt tevens de cumulatieve verblijftijdsverdeling voor.

Voor een verzadigd systeem kan een karakteristieke tijd T voor het transport van een conservatieve stof worden gedefinieerd (van Ommen, 1985):

$$T = \epsilon D / I \quad (T) \quad (14)$$

Met vergl. (11) kan worden berekend dat de karakteristieke tijd van een pakket gelijk is aan de tijd die nodig is om 63% van het in het pakket aanwezige water te verversen (zie ook fig. 3).

Voor Nederlandse omstandigheden mag als vuistregel worden gehanteerd dat de karakteristieke tijd van een freatisch watervoerend pakket in jaren gelijk is aan de pakketdikte in meters (Van Ommen, 1985). Immers de porositeit ϵ ligt in de orde grootte van 0.3, terwijl het gemiddelde neerslagoverschot gelijk is aan 0.3 m/jaar. De tijdsduur waarna het freatische pakket voor 50 en 90% is ververst, is gelijk aan respectievelijk 0.7 D en 2.3 D jaar.

Uit het bovenstaande blijkt dat, indien de grondwaterstroming voldoet aan de in hoofdstuk 2 gegeven voorwaarden de karakteristieke tijd een goede karakterisering geeft voor de verversingstijd van het systeem. Indien gegevens bekend zijn over adsorptie en afbraak kan met vergl. (8) een nadere schatting van de verblijftijden van stoffen worden gemaakt.

Bij de berekening van de verblijftijden is er tot nu toe vanuit gegaan dat geen radiale stroming optreedt en dat kwel en wegzijging geen rol spelen. In werkelijkheid zal vaak niet aan deze voorwaarden zijn voldaan. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de invloed van kwel, wegzijging en radiale stroming op de berekende verblijftijden.

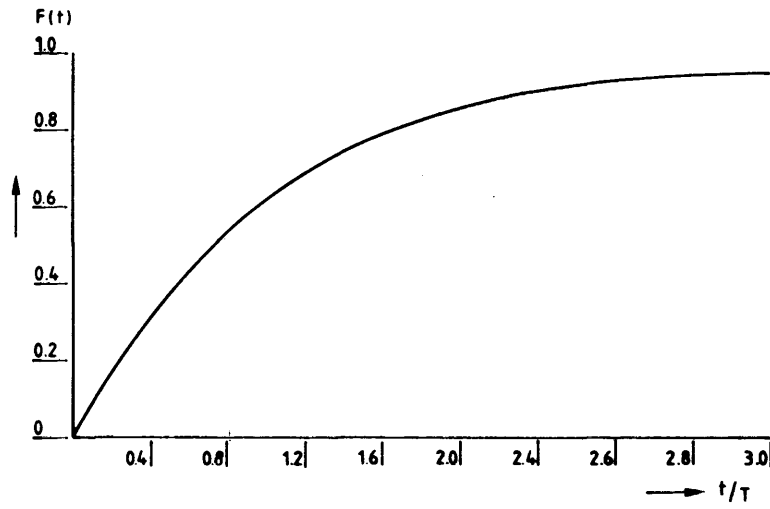


Fig. 3: Met vergl. (11) berekende relatie tussen de fractie van de in een watervoerend pakket aanwezige hoeveelheid water die is ververst $F(t)$ en de tijd t , uitgedrukt als fractie van de karakteristieke tijd T .

4. VERBLIJFTIJDEN IN GEBIEDEN MET WEGZIJGING EN KWEL

Er is onderscheid te maken tussen locale en regionale wegzijging en kwel. Wanneer wegzijgend water binnen een afstand van enkele kilometers weer opkwelt spreken we van "locale" wegzijging en kwel. Indien het water dat wegzijgt tientallen kilometers verder weer opkwelt, spreken we van "regionale" wegzijging en kwel. Ook indien het water wegzijgt naar diepere, niet freatische watervoerende pakketten spreken we over regionale stroming. Locale wegzijging en kwel treden bijvoorbeeld op in het met beken doorsneden zwak golvende dekzandlandschappen van de Achterhoek, waar wegzijging optreedt op de hogere gronden, vaak dekzandruggen, en kwel in de beekdalen. De wegzijging die op de Veluwe optreedt, heeft daarentegen duidelijk een regionaal karakter. Locale en regionale wegzijging en kwel kunnen ook samengaan. Zo neemt in de Achterhoek een deel van de grondwatervoeding deel aan een regionale stroming naar de IJssel en in het zandgebied van west en midden Brabant treedt een "locale" grondwaterstroming op van de hogere gronden naar de aangrenzende beekdalen en een regionale stroming naar en in de diepere watervoerende pakketten.

Wegzijging

Indien er in een gebied met één (freatisch) watervoerend pakket zowel een lokale als een regionale grondwaterstroming optreedt dan is de grondwateraanvulling van het "locale" drainerende systeem gelijk aan het neerslagoverschot verminderd met de regionale wegzijgingsintensiteit. De verblijftijden in het locale systeem zullen dan toenemen, want deze zijn omgekeerd evenredig met de grootte van de grondwateraanvulling (zie vergl. 4). Doordat echter het diepere grondwater in het pakket deelneemt aan een regionale stroming zal niet de gehele dikte van het pakket worden gebruikt voor de locale stroming (zie fig. 4).

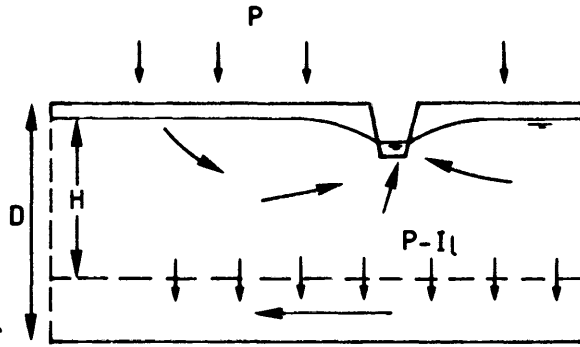


Fig. 4: Grensvlak tussen het locale en regionale grondwatersysteem bij aanwezigheid van een (freatisch) watervoerend pakket.

De parameter D in de vergl. (4) en (14) moet daarom worden vervangen door de dikte van de doorstroomde laag H:

$$T_x = \frac{\epsilon H}{I_\ell} \ln \frac{\ell}{2x} \quad \text{en} \quad T = \frac{\epsilon H}{I} \quad 15a,b)$$

Hierin is I_ℓ de lokale grondwateraanvulling.

Aangenomen mag worden dat de verhouding tussen de laagdiktes H en D ongeveer gelijk is aan de verhouding tussen de lokale grondwateraanvulling I_ℓ en de totale grondwatervoeding I:

$$\frac{H}{D} = \frac{I_\ell}{I} \quad (16)$$

De verblijftijden in het locale grondwatersysteem kunnen nu ook worden berekend door in vergl. 15a en 15b in plaats van de dikte van de doorstroomde laag H en de grondwateraanvulling I_ℓ de pakketdikte D, respectievelijk de totale grondwateraanvulling I in te vullen. Dit is een groot voordeel omdat de verdeling van het neerslagoverschot over de locale en de regionale grondwaterstroming in het algemeen niet of slechts bij benadering bekend is. Indien wegzijging plaats vindt naar een dieper gelegen, niet freatisch watervoerend pakket dan moet voor de schatting van de verblijftijden in het locale grondwatersysteem de grootte van de regionale wegzijgingscomponent wel bekend zijn.

Doordat over het algemeen slechts een klein deel van het neerslagoverschot wegzijgt naar diepere lagen (lage waarden van I in vergl. 4 en 14) zijn de verblijftijden in deze lagen relatief lang. Zo schat Meinardi (1986) voor het centrale en westelijke deel van de Veluwe de snelheden van grondwateraanvulling voor het eerste, tweede en derde watervoerende pakket op respectievelijk 0.3, 0.03 en 0.003 m/jaar. Bij gemiddelde pakketdiktes van 100 m in dit gebied behoren dan karakteristieke verblijftijden (zie vergl. [14]) van respectievelijk 100, 1000 en 10.000 jaar. Voor het tweede en derde watervoerende pakket moeten hierbij nog de tijden voor het transport van het maaiveld naar het betreffende pakket en van het pakket naar het oppervlaktewater worden opgeteld. Stellen we deze transporttijden gelijk aan de karakteristieke verblijftijden van de te passeren pakketten dan bedragen de uiteindelijke schattingen voor de verblijftijden van het grondwater in het tweede en derde watervoerende pakket: $200 + 1000 = 1200$, respectievelijk $200 + 2000 + 10.000 = 12.200$ jaar.

Wanneer schattingen van de grootte van de wegzijgingscomponent niet bekend zijn, kan men, voorzover het grondwater deelneemt aan een diepe stroming, die de primaire helling van het gebied volgt over zeer grote afstanden, vaak voor een eerste benadering beter de volgende eenvoudige formule gebruiken (Ernst, 1973):

$$t(x_2) - t(x_1) = \epsilon \frac{(x_2 - x_1)}{k \operatorname{tg} \alpha} \quad (T) \quad (17)$$

Hierin is: k - gemiddelde doorlatendheid van de zandige afzettingen op grote diepte
 $\operatorname{tg} \alpha$ - gemiddelde terreinhelling
 x_1 en x_2 - afstanden tot het ontwateringsmiddel waarbij $x_2 > x_1$.

Kwel

Het in wegzijgingsgebieden geïnfiltreerde water zal elders weer omhoog komen. Hierdoor zal voor de afvoer van de in het kwelgebied optredende grondwatervoeding slechts een deel van het freatisch watervoerende pakket beschikbaar zijn (zie fig. 5).

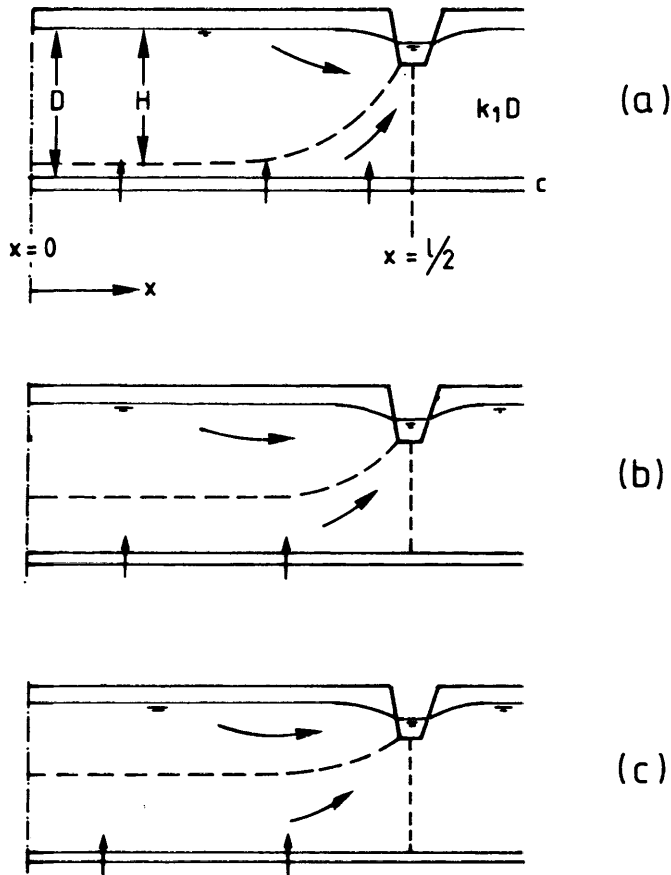


Fig. 5: Grensvlak tussen diepe en ondiepe grondwaterstroming berekend met
vergl. (19) voor een grondwateraanvulling van 0.3 m/jaar en
kwelintensiteiten van 0.1 (a), 0.5 (b) en 1 mm/dag (c).

Voor de berekening van de verblijftijden moet nu in plaats van de dikte van het watervoerende pakket D de dikte van de doorstromende laag H vergl. (4) en (14) worden ingevoerd (zie vergl. 15). De dikte van deze laag kan worden geschat met de volgende door Ernst (1983) afgeleide formule:

$$\frac{H(x)}{D} = \frac{2U_f \cdot x \cdot \sinh \frac{\ell}{2\lambda}}{U_d \cdot \ell \cdot \sinh \frac{x}{\lambda}} \quad (18)$$

$$\text{met } \frac{\ell}{2} + D < x < \frac{\ell}{2} - D$$

Hierin is: U_f = volumestroomdichtheid van het verticale transport door het freatisch vlak

U_d = afvoer naar de open leidingen gedeeld door het oppervlak van het voedingsgebied

$$\lambda = \sqrt{k_1 D c}$$

k_1 = doorlatendheid van freatisch watervoerend pakket

c = weerstand tegen verticale stroming van de scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket

Voor waarden van $\lambda > \text{ca. } \frac{\ell}{2}$ kan vergl. (18) worden vereenvoudigd tot:

$$\frac{H(x)}{D} = \frac{U_f}{U_d} \quad (19)$$

$$\text{met } -\frac{\ell}{2} + D < x < \frac{\ell}{2} - D$$

Enkele resultaten van berekeningen met vergl. (19) zijn gegeven in fig. 5. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een grondwateraanvulling (U_f) van 0.82 mm.dag^{-1} ($= 0.3 \text{ m.jaar}^{-1}$) en voor kwelintensiteiten van 0.1 , 0.5 en 1 mm.dag^{-1} . Het scheidingsvlak tussen de grondwaterstromingen van verschillende oorsprong is weergegeven met een stippellijn. Voor waarden van $x > \frac{\ell}{2} - D$ is het scheidingsvlak met de hand geëxtrapoleerd.

Voor waarden van $\lambda < \text{ca. } \frac{\ell}{2}$ moet de ligging van scheidingsvlak tussen de grondwaterstromingen afkomstig uit het diepere pakket en uit de onverzadigde zone worden berekend met vergl. (18). Twee voorbeelden van berekeningen met vergl. (18) voor een afstand tussen de open leidingen (ℓ) van 200 m , een kwelstroming van 1 mm.dag^{-1} en waarden voor λ van 45 en 35 m^2 zijn weergegeven in fig. 6.

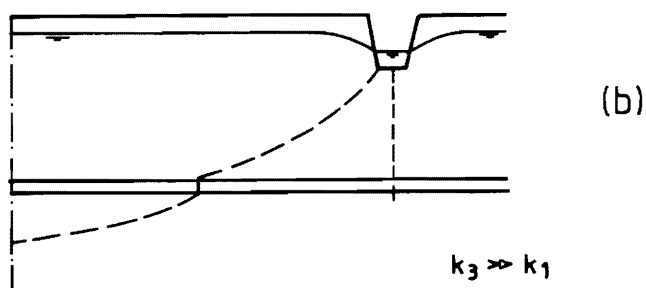
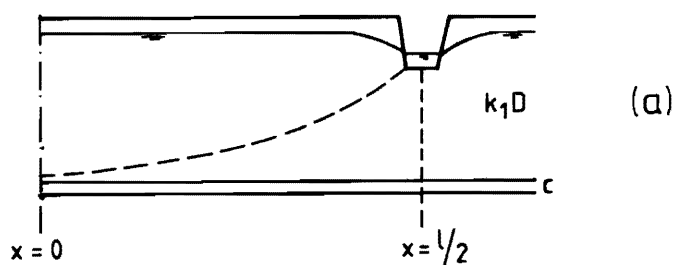


Fig. 6: Grensvlak tussen diepe en ondiepe grondwaterstromingen berekend met
vergl. (18) voor een kwelstroming van 1 mm/dag en waarden voor λ
van 45 (a) en 35 m (b).

Bij deze relatief lage waarden van λ gaat de kwelstroming zich meer concentreren onder de open leidingen.

Onder praktijkomstandigheden zal meestal volstaan kunnen worden met toepassing van de vereenvoudigde formule (19). Het blijkt dat bij een kwelstroming van enige betekenis de dikte van de laag waardoor het transport van de locale grondwatervoeding plaatsvindt, wordt beperkt. Hierdoor zal het in kwelgebieden infiltrerende water over het algemeen relatief korte verblijftijden kennen en is het gevaar voor verontreiniging van het diepere grondwater gering.

5. DE INVLOED VAN RADIALE STROMING OP DE VERBLIJFTIJDEN IN HET FREATISCH WATERVOEREND PAKKET

Bij de afleiding van vergl. (4) voor de berekening van de verblijftijden in de verzadigde zone is geen rekening gehouden met de invloed van radiale stroming in de buurt van de ontwateringsmiddelen. Ernst (1973) heeft een aantal formules afgeleid die wel rekening houden met het optreden van radiale stroming. Berekeningen met deze formules tonen aan dat voor lage waarden van D/ℓ het al dan niet verwaarlozen van de radiale stromingscomponent weinig invloed heeft op de berekende transporttijden. Voor $D/\ell \approx 0.20$ treden mogelijk belangrijke verschillen op (tot enkele tientallen procenten) tussen de verblijftijden berekend met en zonder radiale stroming. Gezien de moeilijkheden in de praktijk bij de laagdiktebepalingen en de onzekerheid omtrent de homogeniteit van de ondergrond behoeven deze verschillen bij praktische toepassing geen overwegend bezwaar te zijn. Bij waarden van D/ℓ groter dan 0.2 mag de invloed van de radiale stroming echter niet meer worden verwaarloosd. In deze gevallen zou men evenals bij de bepaling van de gewenste drainafstanden gebruik kunnen maken van een equivalente laagdikte d (Hooghoudt, 1940). Van der Molen (1986) berekende de volgende waarde voor deze equivalente laagdikte.

$$d = \frac{\ell}{2\pi} \quad (L) \quad (20)$$

De waarde van de equivalente laagdikte moet dan in de vergelijkingen (15a) en (15b) worden ingevuld in plaats van de dikte van de doorstroomde laag H .

6. GROOTTE VAN DE VERSCHILLENDE DRAINAGECOMPONENTEN

Indien meerdere waterlopen met een verschillende drainagebasis deelnemen aan de afvoer, moet men voor de bepaling van de verblijftijden weten hoe de afvoer wordt verdeeld over de verschillende drainagecomponenten zoals bv. oppervlakte-afvoer en ondiepe en diepe grondwaterstroming. De afvoer naar een bepaald ontwateringssysteem kan als volgt worden weergegeven:

$$q = \frac{h_f - h_o}{\gamma} \quad (L.T^{-1}) \quad (21)$$

Hierin is: q = flux naar het betreffende ontwateringsmiddel ($L.T^{-1}$)
 h_f = grondwaterstand midden tussen de ontwateringsmiddelen (L)
 h_o = gemiddelde open waterpeil (L)
 γ = drainage weerstand (T)

Ieder oppervlaktewatersysteem wordt gekarakteriseerd door een bepaalde waarde van de drainageweerstand. Naarmate de grondwaterstand stijgt, zullen meer open waterlopen gaan deelnemen aan het afvoerproces, waardoor de totale drainageweerstand afneemt. Een voorbeeld van de relatie tussen de afvoer uit een bepaald gebied en de grondwaterstand (q - h relatie) wordt gegeven in fig. 7a.

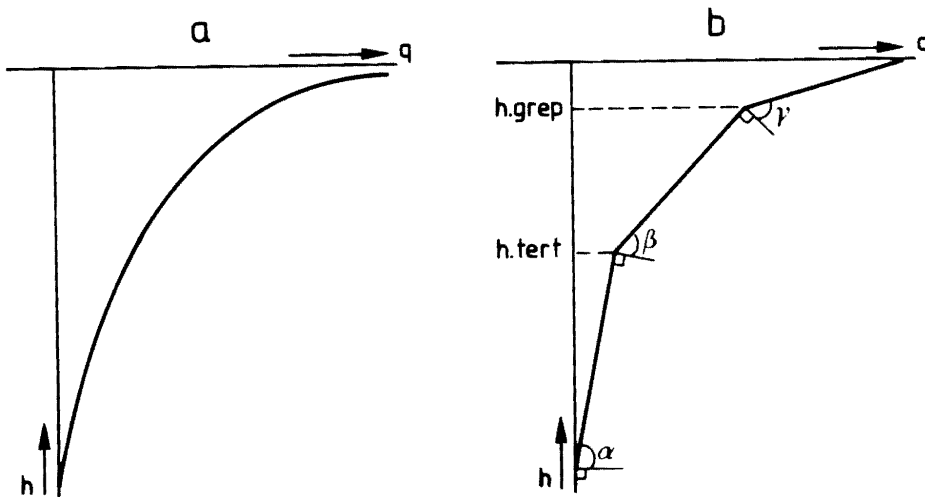


Fig. 7a: Een voorbeeld van een relatie tussen de afvoer naar open water en de grondwaterstand (q - h relatie)

b: Schematisatie van de q - h relatie. Hierin zijn α , β en γ een maat voor de drainageweerstand van respectievelijk het secundaire drainagesysteem, het tertiaire drainage systeem en het greppel systeem.

De drainageweerstand vormen de richtingscoëfficiënten van de raaklijnen aan de kromme. Vaak wordt de q-h relatie geschematiseerd tot een aantal rechte lijnstukken (zie fig. 7b). In fig. 7b worden als voorbeeld drie oppervlaktewatersystemen onderscheiden; een secundair systeem (waterlopen met een belangrijke af- en aanvoerfunctie), een tertiair systeem (perceelsslotten, die voor de directe af- en aanvoer van water zorgen) en een greppelsysteem. Voor de berekening van drainageweerstand bestaan verschillende analytische formules (zie o.a. Hooghoudt, 1940 en Ernst, 1962). Voor toepassing van deze formules zijn echter veel gegevens nodig die meestal niet beschikbaar zijn. Wel kunnen gebieden aan de hand van gemakkelijk te verkrijgen gegevens zoals slootdichtheid, bodemopbouw en grondwaterstanden worden ingedeeld in verschillende klassen, waarbij iedere klasse een indicatie geeft voor de verhouding tussen de verschillende afvoercomponenten. Zo zal bijv. op de Veluwe met z'n diepe grondwaterstanden, goed doorlatende ondergrond en lage slootdichtheid praktisch het gehele neerslagoverschot wegzijgen naar de diepe ondergrond (hoge drainageweerstand). In het Zuidhollandse veenweidegebied daarentegen is het bovenste (veen)pakket over het algemeen slecht doorlatend, treedt er kwel op vanuit het boezemwater, is een dicht drainagestelsel aanwezig en zijn de grondwaterstanden en open waterpeilen hoog. Het neerslagoverschot zal hier via het ondiepe grondwatersysteem worden afgevoerd. Om het neerslagoverschot samen met de optredende kwel te kunnen afvoeren, zijn de drainageweerstand laag. Tijdens natte perioden zal bovendien een ondiepe grondwaterstroming naar de greppels en oppervlakte-afvoer een grote rol spelen.

7. DISCUSSIE EN CONCLUSIES

In dit rapport is ingegaan op de verblijftijden van het neerslagoverschot in de ondergrond. Omdat de dikte van de onverzadigde zone in Nederland over het algemeen zodanig is dat de verblijftijden in deze zone kunnen worden verwaarloosd ten opzichte van die in de verzadigde zone is de beschouwing beperkt tot de verzadigde zone.

Er is een formule afgeleid voor de berekening van de tijd die verstrijkt vóór het water in de verzadigde zone voor een bepaald gedeelte is ververst. Voor de berekening van de verversingstijden is slechts informatie nodig over de diktes van de watervoerende pakketten en de grootte van eventuele wegzijgings- en kwelcomponenten. De berekende verversingstijden worden onnauwkeuriger wanneer de pakketdikte relatief groot wordt ten opzichte van de afstand tussen de ontwateringsmiddelen. In deze gevallen krijgt namelijk de radiale stroming in de buurt van de ontwateringsmiddelen een niet te verwaarlozen invloed op de verblijftijden. Omdat echter weinig bekend is over de invloed van inhomogeniteiten in de ondergrond op de verblijftijden en groottes van wegzijgings- en kwelcomponenten in de praktijk moeilijk zijn te bepalen heeft het weinig zin grote waarde te hechten aan de nauwkeurigheid van een formule die is afgeleid voor een homogene ondergrond en waarin de grootte van de wegzijgings- en kwelcomponent een belangrijke rol speelt. De berekende verblijftijden geven dan ook slechts een orde van grootte aan en zijn bedoeld om de verschillende afvoercomponenten, die binnen een gebied onderscheiden kunnen worden, in te delen in een verblijftijdenklasse (bv. 0-10 of 1000-2000 jaar). Bij de indeling in verblijftijdenklassen moet wel zoveel mogelijk rekening worden gehouden met de aanwezigheid van inhomogeniteiten in de ondergrond. Zo zullen bijvoorbeeld ondiepe keileemafzettingen de verblijftijden in het ondiepe grondwatersysteem sterk verkorten. Daarnaast zal in gebieden met ondiepe grondwaterstanden oppervlakte-afvoer een belangrijke rol kunnen spelen. De door de ondergrond af te voeren hoeveelheid water wordt hierdoor sterk verminderd.

Bij de berekening van de verblijftijden is geen rekening gehouden met de verblijftijden in slecht doorlatende pakketten zoals holocene klei- en veenpakketten. Als de stroming in deze pakketten uitsluitend in verticale richting optreedt, dan zijn de verblijftijden in deze pakketten gelijk aan de dikte van het betreffende pakket gedeeld door de grondwateraanvulling van het onderliggende pakket of de grootte van de kwelstroming. De verblijftijden in deze pakketten moeten worden opgeteld bij de verblijftijden in de watervoerende pakketten.

Het koppelen van waterkwaliteit met waterkwantiteit is in principe een probleem vanwege de verschillende tijdschalen waarop beide processen plaatsvinden. De tijdschaal waarop waterkwantiteitsprocessen zich afspelen is vaak een orde van grootte kleiner dan de tijdschaal waarop waterkwaliteitsprocessen zich afspelen. Hierdoor is, wanneer lange termijn effecten worden bestudeerd, de aanname van stationaire stroming en het gebruik van het gemiddelde jaarlijkse neerslagoverschot in plaats van een niet stationaire stroming, die veroorzaakt wordt door een tijdsafhankelijke neerslag, geoorloofd van de beschrijving van waterkwaliteitsprocessen zoals stoftransport.

SAMENVATTING

Onder Nederlandse omstandigheden is de afstand tussen de ontwateringsmiddelen over het algemeen veel groter dan de dikte van het watervoerende pakket. Hierdoor kan de grondwaterstroming bij benadering horizontaal worden beschouwd. Wanneer verder wordt verondersteld dat de doorlatendheid, de porositeit en de dikte van het watervoerende pakket constant zijn dan kan een eenvoudige formule worden afgeleid voor de verblijftijden in de verzadigde zone. Het blijkt dat de verblijftijden voornamelijk afhankelijk zijn van de dikte van het watervoerende pakket D en in mindere mate van de afstand tussen de ontwateringsmiddelen ℓ . Met de invloed van wegzijging en kwel op de verblijftijden kan op eenvoudige wijze rekening worden gehouden. Wegzijging en kwel zorgen voor een toename respectievelijk een afname van de verblijftijden in het locale grondwatersysteem. Bij waarden van $D/\ell > \text{ca. } 0.2$ mag de invloed van de radiale stromingscomponent in de buurt van de ontwateringsmiddelen op de verblijftijden niet meer worden verwaarloosd. Door in deze gevallen gebruik te maken van een equivalente laagdikte kan dit worden ondervangen.

Wanneer toediening van een diffuse verontreiniging aan het grondwater in de beschouwing wordt betrokken dan kan de formule voor de berekening van de verblijftijden worden omgewerkt tot een relatie tussen de concentratie in het water dat aan de bovenzijde van een watervoerend pakket infiltreert en de concentratie van het water dat uit het pakket treedt. Dit is exact dezelfde relatie als het verband tussen de effluentconcentratie van een reservoir waarin volledige menging optreedt en de tijd. De relatie is ook van toepassing op grondwateronttrekkingen uit volkomen putten.

Met behulp van deze formule kan worden berekend hoe lang het duurt voor het water in een watervoerend pakket voor een bepaald gedeelte is verversd. Dit is van belang in verband met de hersteltijd van het systeem na stopzetting van een verontreinigend proces. De verversingstijd van een watervoerend pakket blijkt te kunnen worden gekarakteriseerd door een zogenaamde karakteristieke tijd. Deze is gedefinieerd als het produkt van de porositeit en de dikte van het pakket gedeeld door de grondwatervoeding. De karakteristieke tijd is gelijk aan de tijd die nodig is om 63% van het in het pakket aanwezige water te verversen. Voor een freatisch watervoerend pakket zonder kwel en wegzijging is de karakteristieke tijd in jaren gelijk aan de pakketdikte D in meters. De tijd die nodig is om het freatische pakket voor 50 en 90% te verversen is gelijk aan respectievelijk $0.7 D$ en $2.3 D$ meter.

In geval van wegzijging en kwel dienen voor de berekening van de verblijftijden behalve de dikte van het watervoerende pakket ook de groottes van de wegzijgings- en kwelcomponenten bekend te zijn. Wanneer gegevens bekend

zijn over de adsorptie- en afbraakeigenschappen van een bepaalde stof dan kan daar bij de berekening van de hersteltijd van een systeem op eenvoudige wijze rekening mee worden gehouden.

LITERATUUR

- Ernst, L.F., 1962. Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Versl. Landb. Onderz. 67-15, 189 pp.
- Ernst, L.F., 1973. De bepaling van de transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zone. Nota 755, ICW, Wageningen.
- Hooghoudt, S.B., 1940. Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. Versl. Landb. Onderz. 46: 515-707.
- Meinardi, C.R., 1986. De ouderdom van het zoete grondwater in Nederland. H₂O 19 no. 13: 286-289.
- Molen, W.H.van der, 1975. Water quality, Influence of transport and mixing processes. College dictaat Landbouwhogeschool, vakgroep Cultuurtechniek.
- Molen, W.H.van der, 1986. Van kwantiteit naar kwaliteit; een halve eeuw drainagetheorie. Bijdrage aan het symposium: Waterhuishoudkundig onderzoek van beheersing tot beheer (17-12-1986). De bijdrage wordt in 1987 gepubliceerd in het cultuurtechnisch tijdschrift.

BIJLAGE 1:

Voorstel ter bepaling van de verblijftijden in de verzadigde zone van de diverse componenten van het drainagewater uit de Nederlandse zandgebieden.

1. INLEIDING

In deze bijlage wordt ingegaan op de wijze waarop de in dit rapport beschreven theorie kan worden toegepast bij de schatting van de verblijftijden van de diverse componenten van het drainagewater uit de Nederlandse zandgebieden in de verzadigde zone. Met name wordt aandacht besteed aan de benodigde gegevens en hoe deze kunnen worden verkregen.

2. VERBLIJFTIJDEN IN DE ONDERGROND

In hoofdstuk 3 van dit rapport blijkt dat de verblijftijden in een watervoerend pakket in de meeste situaties goed kunnen worden gekarakteriseerd door de zogenaamde karakteristieke tijd T:

$$T = \frac{\epsilon D}{I} \quad (B1)$$

Hierin is: ϵ = porositeit

D = dikte van het watervoerende pakket (L)

I = grondwateraanvulling (L/T)

De karakteristieke tijd is gelijk aan de tijd die verstrijkt vóór 63% van het in het pakket aanwezige water is ververst. Dit is alleen van toepassing op homogene pakketten. Wanneer kwel een rol speelt moet de dikte van het watervoerende pakket D in vergl. (B1) worden vervangen door de dikte van de laag waarin de ondiepe grondwaterstroming plaats vindt (H) (zie fig. 5). Deze dikte kan worden berekend wanneer de grootte van de kwelcomponent en de dikte van het watervoerende pakket bekend zijn. Wanneer wegzijging geen rol speelt is de grondwateraanvulling gelijk aan het neerslagoverschot. Indien wel wegzijging van enige betekenis optreedt is de grondwateraanvulling van het ondiepe grondwatersysteem gelijk aan het neerslagoverschot verminderd met de wegzijgingscomponent. De grootte van de wegzijgingscomponent vormt de grondwateraanvulling van het diepe grondwatersysteem.

Hoewel vergl. (B1) een goede karakterisering geeft van de gemiddelde verblijftijd kan de verblijftijd van individuele waterdruppels sterk uiteenlopen. Deze kan worden geschat met de volgende vergelijking.

$$T_x = \frac{\epsilon H}{I} \ln \frac{l}{2x} \quad (T) \quad (B2)$$

Hierin is: l = de afstand tussen de ontwateringsmiddelen (L)

x = de afstand tot de waterscheiding (L)

Zowel vergl. (B1) als (B2) zijn van toepassing op homogene watervoerende pakketten. Inhomogeniteiten ondiep in de ondergrond zoals bv. keileemafzettingen kunnen de verblijftijden aanzienlijk verkorten.

Uit het bovenstaande blijkt dat ten behoeve van de schatting van verblijftijden in de ondergrond gegevens nodig zijn over de dikte van watervoerende pakketten, de grootte van wegzijgings- en kwelcomponenten,

afstanden tussen ontwateringsmiddelen en de aanwezigheid van inhomogeniteiten in de ondergrond. Hieronder zal aangegeven worden hoe informatie over deze gegevens verkregen kan worden.

3. BEPALING VAN DE WEGZIJJINGS- EN KWELINTENSITEITEN

Voordat overgegaan kan worden tot een schatting van de wegziijings- en kwelintensiteiten, zal eerst nagegaan moeten worden waar kwel en wegziijing mogen worden verwacht.

Naast gebieden waar gedurende het gehele jaar wegziijing of kwel optreedt, zijn er ook gebieden waar wegziijing en kwel, zij het met geringe intensiteit, afwisselend optreden.

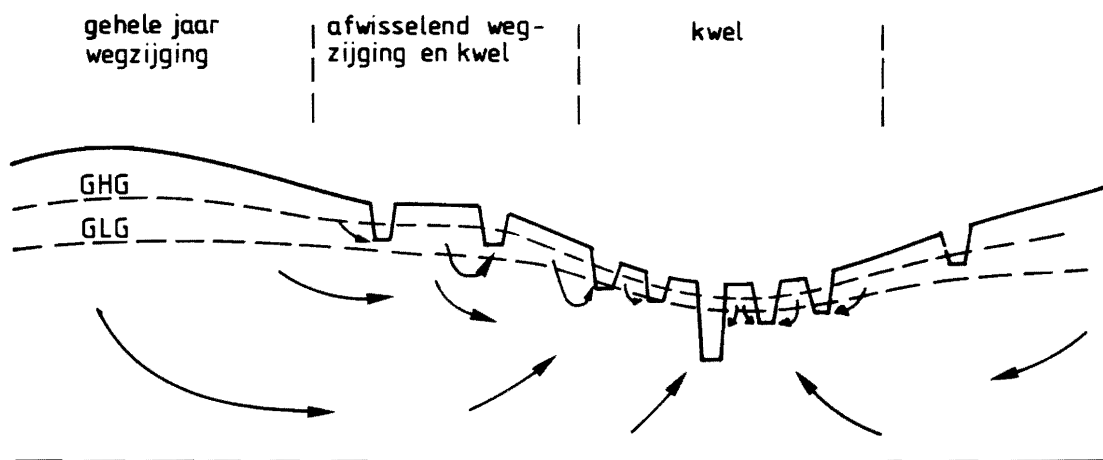


Fig. B1: Stromingspatroon van het grondwater tussen en binnen de onderscheiden hydrologische eenheden.

Als voorbeeld is in fig. B1 een situatie geschetst waarin hoge, middelhoge en lage gronden aan elkaar grenzen. Op de hoge gronden, die worden gekenmerkt door de afwezigheid van sloten en een relatief diepe grondwaterstand, heeft gedurende het gehele jaar wegziijing plaats. Op de daaraan grenzende middelhoge gronden is de afstand tussen de sloten relatief groot. In de winter voeren de sloten water en wordt het grootste deel van het neerslagoverschot hier naartoe afgevoerd. Afhankelijk van de relatieve hoogteligging kan plaatselijk enige wegziijing of kwel optreden. In de zomer zullen de sloten droog staan en treedt wegziijing op naar de aangrenzende lage gronden. Over het gehele jaar beschouwd treedt er netto geen of een geringe wegziijing op. De laaggelegen gronden in het beekdal worden gekenmerkt door hoge grondwaterstanden en een relatief geringe afstand tussen de sloten. Hier treedt het gehele jaar kwel op en zijn de sloten steeds watervoerend.

Uit het bovenstaande mag niet worden geconcludeerd dat alle hoge gronden infiltratiegebieden en alle lage gronden kwelgebieden zijn. Wanneer op de

(middel)hoge en lage gronden slecht doorlatende lagen vrij ondiep in de ondergrond aanwezig zijn, dan kunnen deze lagen een stagnatie van het grondwater tot gevolg hebben, waardoor de grondwaterstroming naar en vanuit aangrenzende gebieden beperkt wordt of afwezig is. In deze gebieden is over het algemeen een dicht afwateringsstelsel aanwezig en treden hoge grondwaterstanden gedurende natte perioden en een sterk fluctuerende grondwaterstand gedurende het jaar op. Ook op lage gronden met of zonder slechtdoorlatende lagen ondiep in de ondergrond, die ver verwijderd liggen van wegzijgingsgebieden, zal het contact met aangrenzende gebieden via het grondwater beperkt zijn. We spreken dan over hydrologisch geïsoleerde gebieden. Wanneer ondiepe slecht doorlatende lagen zorgen voor de hydrologische "isolatie" van een gebied dan wordt de effectiviteit van de isolatie bepaald door de dikte en doorlatendheid van de slechtdoorlatende lagen en het al dan niet onderbroken zijn van deze lagen.

Kaarten met de ligging van kwel- en infiltratiegebieden en gebieden die in hydrologisch opzicht als geïsoleerd beschouwd kunnen worden zijn voorhanden voor het zuidelijk (Brabant en Limburg), centraal (Utrechtse heuvelrug, Veluwe en Gelderse Vallei) en oostelijk zandgebied (Achterhoek en Overijssel ten zuiden van de Overijsselsche Vecht). De kaarten zijn vervaardigd door de Vakgroep Fysische Geografie van de Rijksuniversiteit Utrecht (Vissers e.a., 1985). Deze kaarten zijn samengesteld met behulp van informatie afgeleid uit thematische kaarten, waaronder bodem- en grondwatertrappenkaarten (Stichting voor Bodemkartering), geomorfologische kaarten (Rijks Geologische Dienst en Stichting voor Bodemkartering), waterstaatskaarten (Rijkswaterstaat) en isohypsenkaarten (Dienst Grondwaterverkenning-TNO). Daarnaast zijn topografische kaarten en literatuurgegevens geraadpleegd. Door interpretatie van de verschillende kaarten kan aan de onderscheiden kaarteenheden informatie over de hydrologische situatie worden ontleend. Door combinatie en onderlinge vergelijking van de uit de verschillende kaarten afgeleide hydrologische situatie is tot een classificatie van de kwel- en infiltratiegebieden en hydrologisch geïsoleerde gebieden overgegaan. Hierbij zijn ook literatuurgegevens gebruikt. Het werkschema, dat door Vissers e.a. (1985) is gebruikt bij de classificatie van de hydrologische eenheden is weergegeven in fig. B2.

De kaartinterpretatie heeft plaatsgevonden op schaal 1:50.000. De uiteindelijke hydrologische classificatie is weergegeven op schaal 1:125.000. De waterscheidingen van het ondiepe grondwater zijn ook aangegeven. In gebieden met waterlopen is de waterscheiding afgeleid uit de waterstaatskaart.

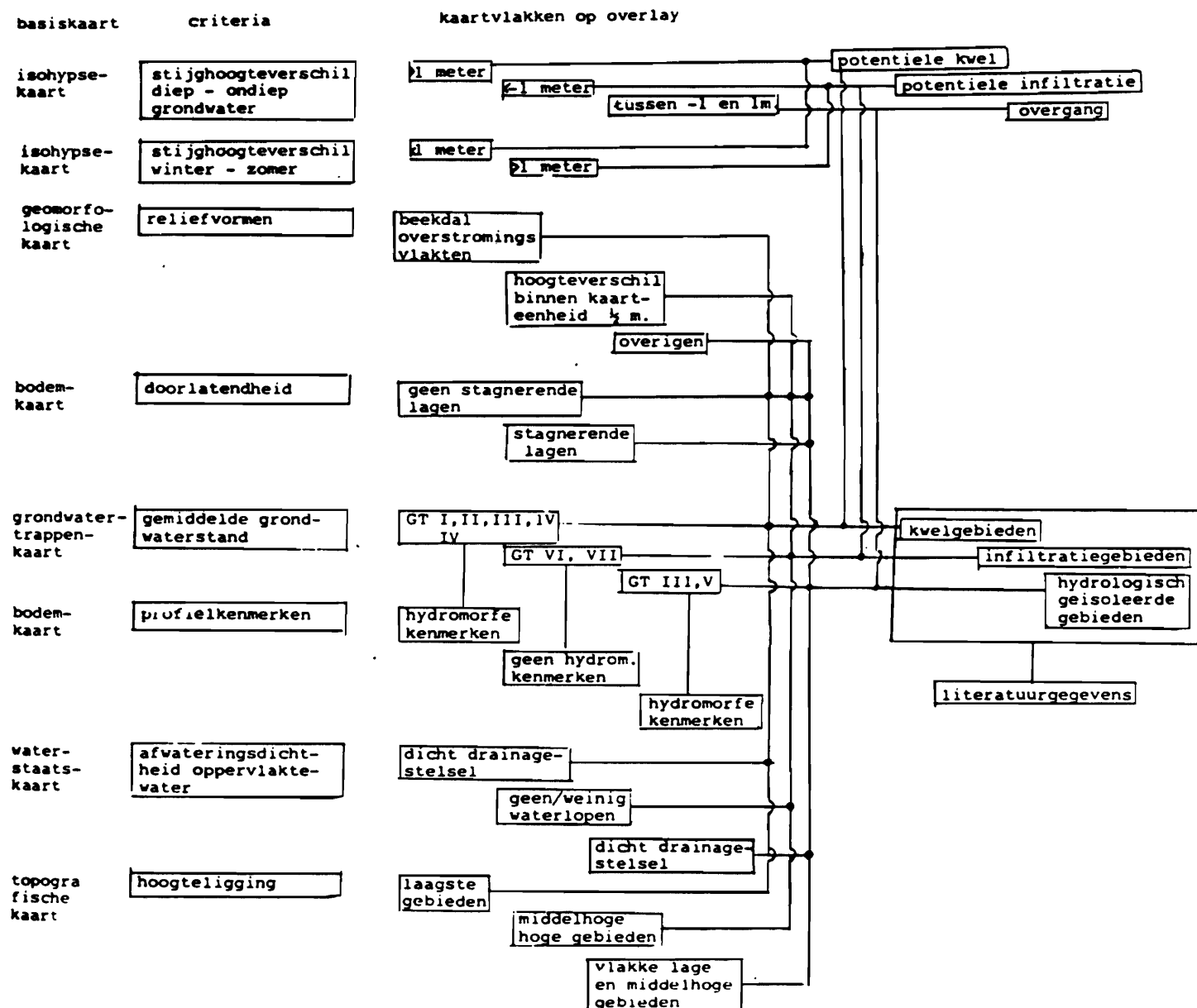


Fig. B2: Werkschema classificatie hydrologische eenheden

(naar Vissers e.a., 1985).

In aaneengesloten infiltratiegebieden op de hoge zandgronden waar drainagegangen ontbreken, is de waterscheiding afgeleid uit de isohypsenkaart. Bij onbetrouwbare ligging van de isohypsen zijn de hoogste terreindelen als waterscheiding aangehouden.

Ook voor de provincie Drenthe is een kaart beschikbaar met kwel- en wegzijgingsgebieden. Deze kaart is in eerste instantie gebaseerd op de isohypsenkaarten van 14 oktober 1978 en 28 april 1980. Deze kaarten geven een redelijk beeld van de gemiddelde voor- en najaarssituatie van de grondwaterstand en de stijghoogten in de diepere watervoerende pakketten. Daarnaast is bij de samenstelling van de wegzijgings- en kwelkaarten gebruik gemaakt van een verbreidingskaart van kwelindicerende vegetaties, topografische kaarten, bodem- en grondwatertrappenkaarten en lokale kennis. De gebieden waar noch kwel, noch wegzijging optreedt, kunnen worden beschouwd als hydrologisch geïsoleerde gebieden. De wegzijgings- en kwelkaart van de provincie Drenthe is op schaal 1:250.000 gepubliceerd in het rapport van de technische werkgroep grondwaterplan 2 (1985).

Voor een groot deel van het Nederlandse zandgebied is dus, zij het vaak in globale vorm, informatie beschikbaar over de ligging van wegzijgings- en kwelgebieden. Indien wegzijging en kwel optreden naar, respectievelijk vanuit diepe watervoerende pakketten, kan de grootte van de wegzijgings- of kwelcomponent worden geschat wanneer informatie beschikbaar is over de stijghoogteverschillen tussen het freatische en het tweede watervoerende pakket en over de weerstandswaarde tegen verticale stroming van de scheidende laag tussen beide watervoerende pakketten. Waarden voor stijghoogteverschillen en weerstanden tegen verticale stroming zullen moeten worden afgeleid uit meetgegevens en literatuur (Grondwaterkaarten van Nederland, diverse regionale hydrologische studies).

Indien wegzijgings- en kwelstromingen uitsluitend in het freatische watervoerende pakket plaats vinden, dan kan op de volgende wijze een schatting worden gemaakt van de wegzijgings- en kwelintensiteit (zie ook fig. B3). Aannemende dat in de infiltratiegebieden het gehele neerslagoverschot wegzijgt naar de diepere ondergrond, dan kan de kwelintensiteit (U_{κ}) in aangrenzende kwelgebieden worden geschat met de volgende formule:

$$U_{\kappa} = \frac{B_1 + B_2}{W} \cdot I \quad (L.T^{-1}) \quad (B3)$$

Hierin zijn: B_1 en B_2 = breedtes van zones van de aangrenzende infiltratiegebieden, gelegen binnen het stroomgebied van de beek in het kwelgebied (L).

W = breedte van het kwelgebied (L)

I = grondwatervoeding ($L.T^{-1}$)

De ligging van de waterscheidingen kunnen worden afgeleid uit waterstaatskaarten, isohypsenkaarten en topografische kaarten.

Het zal duidelijk zijn dat de schattingen van de wegzijgings- en kwelintensiteiten een beperkte nauwkeurigheid zullen hebben. Wel kunnen aan de hand van gemakkelijk te verkrijgen gegevens zoals slootdichtheid, bodemopbouw, grondwaterstanden e.a. gebieden worden ingedeeld in verschillende klassen, waarbij iedere klasse een indicatie geeft van de relatieve grootte van de wegzijgings- of kwelintensiteit. Het uiteindelijke resultaat nl. verblijftijden zal ook in de vorm van (verblijftijden)klassen worden gepresenteerd bv. 0-10 of 1000-2000 jaar).

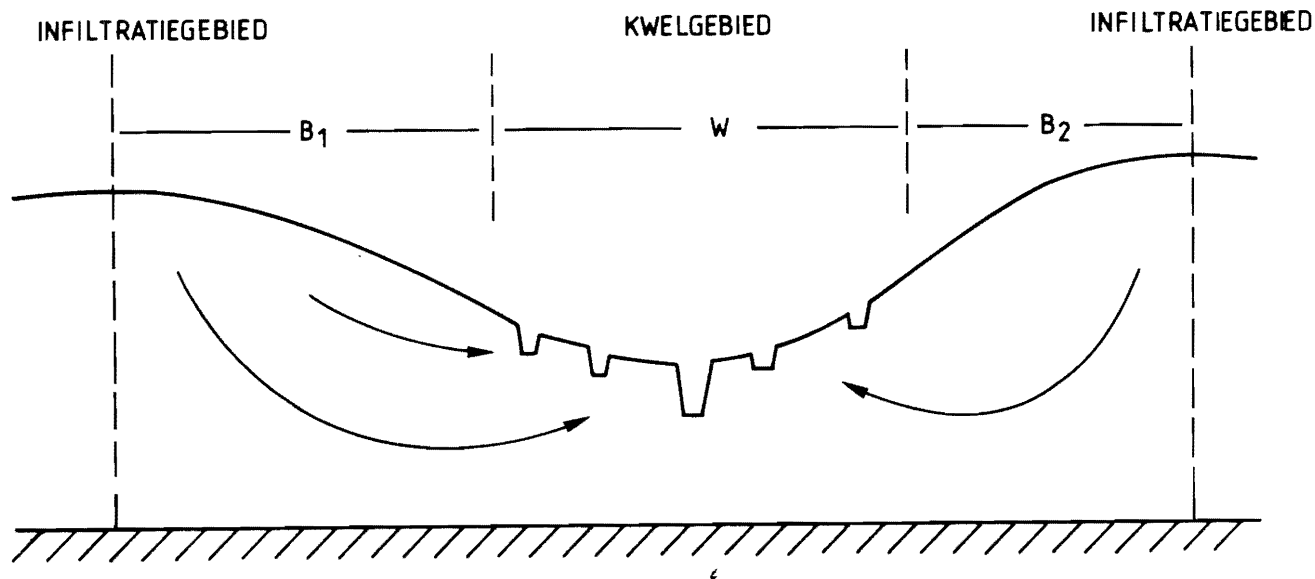


Fig. B3: Schematische grondwaterstroming vanuit wegzijgingsgebieden naar aangrenzende kwelgebieden.

4. BEPALING VAN DE DIKTE VAN WATERVOERENDE PAKKETTEN, DE AFSTAND TUSSEN DE ONTWATERINGSMIDDELEN EN DE AANWEZIGHEID VAN INHOMOGENITEITEN IN DE ONDIEPE ONDERGROND

Diktes van watervoerende pakketten kunnen worden afgeleid uit boorgegevens en literatuur (Grondwaterkaarten van Nederland, diverse (geo-)hydrologische en geologische studies). Gegevens over afstanden tussen ontwateringsmiddelen kunnen worden afgeleid uit de waterstaatskaarten. Informatie over inhomogeniteiten zoals keileemafzettingen e.d. in de ondiepe ondergrond kan worden afgeleid uit bodem- en geologische kaarten.

5. SLOTBESCHOUWING

Bij het onderzoek naar de verblijftijden in de verzadigde zone zal de nadruk moeten liggen op de bovenste watervoerende pakketten. Deze pakketten zijn immers het meest kwetsbaar en zijn op veel plaatsen reeds sterk verontreinigd, in tegenstelling tot diepere watervoerende pakketten die over het algemeen nog nauwelijks verontreinigd zijn.

Het is belangrijk te stellen dat de verblijftijden met name van belang zijn voor het schatten van de belasting van het oppervlaktewater met verontreinigende stoffen. Bij het optreden van kwel zal de verblijftijd van de locale grondwatervoeding in de verzadigde zone sterk afnemen. Doordat in het oppervlaktewaterstelsel de ondiepe grondwatercomponent wordt gemengd met de kwelcomponent, waardoor verdunning optreedt, zal de verkorting van de verblijftijden weinig invloed hebben op de gemiddelde concentratie van het oppervlaktewater. Wegzijging naar diepere watervoerende pakketten zal over het algemeen een geringe intensiteit hebben en daarom weinig invloed hebben op de verblijftijden in het bovenste watervoerende pakket en derhalve op de kwaliteit van het in het oppervlaktewaterstelsel uitstromende grondwater. Geconcludeerd kan worden dat een nauwkeurige bepaling van de dikte van het bovenste watervoerende pakket belangrijker is dan nauwkeurige bepaling van de kwel- en wegzijgingsintensiteit. De ligging van kwel- en wegzijgingsgebieden is wel belangrijk in verband met het verontreinigingsgevaar voor diepere watervoerende pakketten.

LITERATUUR

Rapport van de technische werkgroep grondwaterplan 2, 1985, Assen.

Vissers, H.J.S.M., N.H.S.M.de Wit en W.Bleuten, 1985. Ruimtelijke effecten van bemesting via ondiep grondwater. Bedreiging van de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater en gevolgen voor de natuur- en waterwinningen op de Nederlandse zandgronden. Vakgroep Fysische geografie, Rijksuniversiteit Utrecht.