Invloed van diffuse verontreiniging op de kwaliteit van gewonnen of afstromend grondwater: een analogie met een eenvoudig mengproces (1)



IR. H. C. VAN OMMEN
Vakgroep Cultuurtechniek
Landbouwhogeschool,
Wageningen

Inleiding

De migratie van opgeloste stoffen in het grondwater staat de laatste decennia sterk in de belangstelling.
Enerzijds treden een groot aantal bodemverontreinigingsgevallen aan het licht, die als puntbronnen van verontreiniging van het grondwater beschouwd kunnen worden, anderzijds spelen de 'diffuse' belastingen een steeds grotere rol.
Onder een diffuse belasting wordt een belasting van het grondwater verstaan, die min of meer uniform verdeeld over het voedingsgebied optreedt. Als voorbeelden van diffuse belastingen kunnen onder andere genoemd worden: uitspoeling van stikstof- en fosforverbindingen vanuit de landbouwgronden, de effecten van zure regen of de toediening van irrigatiewater van slechte kwaliteit.
In dit artikel wordt eerst een theoretische afleiding gegeven voor de relatie tussen de concentratie in water dat aan de bovenzijde van de verzadigde zône infiltreert en de concentratie in het water dat uit deze zône treedt.
Vervolgens wordt deze theorie met een drietal voorbeelden van – in de praktijk vaak voorkomende – stromingssituaties geïllustreerd.
Tenslotte worden een aantal praktische consequenties besproken.

Theorie

Bij de afleiding wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:
1. stationaire stroming onder invloed van neerslag en onttrekking of afvoer, dat wil zeggen de voeding vermenigvuldigd met het vanggebied is gelijk aan de hoeveelheid water die aan het grondwater wordt onttrokken of dagzoomt,
2. de dikte van het watervoerende pakket is zódanig, dat stijghoogteverschillen ten opzichte hiervan verwaarloosd mogen worden,
3. de dikte en de porositeit van het watervoerende pakket zijn constant (zie ook '2.'),
4. de veronderstelling van Dupuit: de stroming verloopt (bij benadering) horizontaal.

We beschouwen een vanggebied van een aquifer (porositeit ε, dikte H (L)) met een oppervlakte A (L^2) en een willekeurig punt P waaruit grondwater onttrokken wordt met een debiet Q_p (L^3T^{-1}) (afb. 1).
Vanwege veronderstelling '1.' geldt:

$$Q_p = N\,A \qquad (L^3T^{-1}) \qquad (1)$$

waarbij N (LT^{-1}) de voeding voorstelt.
Binnen dit gebied A bevindt zich een aaneengesloten lijn die de punten met een gelijke verblijftijd tot het punt P verbindt; deze lijn stelt een isochroon voor.
De oppervlakte van het vanggebied 'buiten' deze isochroon is gelijk aan a; 'binnen' deze lijn is de oppervlakte dus gelijk aan A-a.
De isochroon van verblijftijd t als functie van het oppervlak a wordt als volgt gevonden: voor een toename in verblijftijd met een grootte dt geldt:

$$-\,dt = \frac{\text{volume}}{\text{flux}} = \frac{\varepsilon H da}{Na} \qquad (2)$$

waarbij het minteken erop wijst, dat er in werkelijkheid een verlaging van de verblijftijd optreedt bij een toename van a.
In vgl. (2) stelt Na de hoeveelheid water voor, die 'buiten' de isochroon infiltreert en εHda is het volume tussen de isochroon t en t-dt.
Dit resulteert dan in de volgende uitdrukking voor de verblijftijd van isochroon t tot de put:

$$\int_0^t dt = \int_a^A \frac{\varepsilon H da}{Na} \qquad (3)$$

zodat

$$t(a) = \frac{\varepsilon H}{N} \ln (A/a) \qquad (4)$$

De concentratie van het opgepompte water is samengesteld uit twee bijdragen:
1. water met een concentratie gelijk aan die van het infiltrerende water (c_{input}), afkomstig van het gebied A-a,
2. water met een concentratie gelijk aan de oorspronkelijke concentratie in de aquifer ($c_{oorspr.}$), afkomstig van het gebied a.

Zodat de gemiddelde concentratie ($\bar{c}$) in het opgepompte (of dagzomende) grondwater gelijk is aan:

$$\bar{c} = \frac{((A-a)c_{input} + ac_{oorspr.})N}{NA} \qquad (5a)$$

of:

$$\bar{c} = (1 - \frac{a}{A})\,c_{input} + \frac{a}{A} c_{oorspr.} \qquad (5b)$$

Gecombineerd met vgl. (4) levert dit:

$$\bar{c}\,(t) = c_{input} + (c_{oorspr.} - c_{input}) \exp(-Nt/(\varepsilon H)) \qquad (6)$$

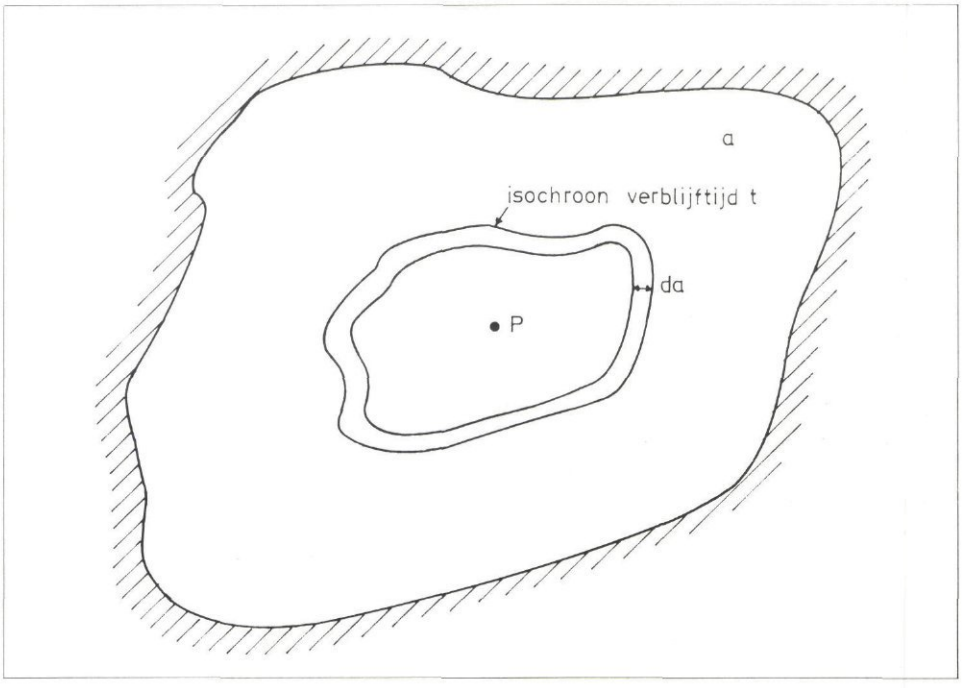
Dit is exact dezelfde relatie als het verband tussen effluentconcentratie van een reservoir, waarin volledige menging optreedt, en de tijd. De mechanismen zijn echter totaal verschillend.

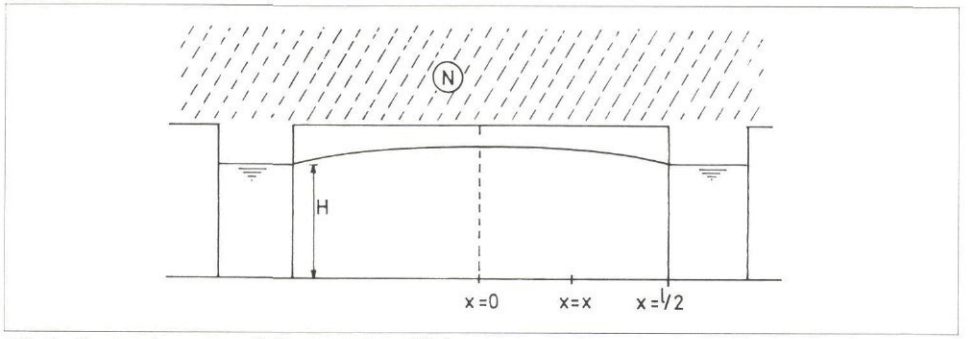
Voorbeeld 1. *De stroming naar parallelle ontwateringsmiddelen*

Dit geval vormt de ééndimensionale toepassing van de hierboven ontwikkelde theorie en is al vaker beschreven in de literatuur [Ernst, 1973; Gelhar and Wilson, 1974].
Neerslag, ter grootte N (LT^{-1}), stroomt via de verzadigde zône (porositeit ε, dikte H) naar ontwateringsmiddelen, waartussen de afstand 1 bedraagt (afb. 2).
Uitgaande van het coördinatenstelsel, dat gegeven is in afb. 2, bedraagt de waterstroming, per meter ontwateringsmiddel, op een afstand x van de waterscheiding:

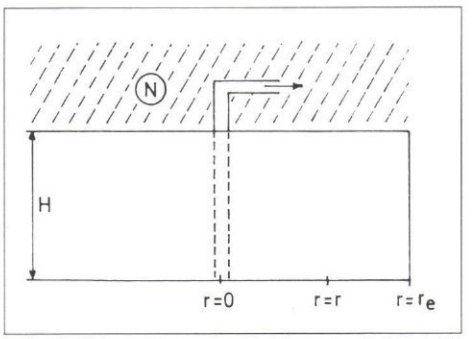
$$q_x = N\,x \qquad (L^2T^{-1}) \qquad (7)$$

Afb. 1 - Vanggebied van de aquifer met oppervlakte A en onttrekking in punt P.





Afb. 2 - De stroming naar parallelle ontwateringsmiddelen.



Afb. 3 - De stroming naar een put in een freatische aquifer.

Zodat de verblijftijd T_x van een druppel water op punt x tot het ontwateringsmiddel gelijk is aan:

$$T_x = \frac{\varepsilon H}{N} \ln(1/(2x)) \qquad (T) \qquad (8)$$

De gemiddelde concentratie is dan:

$$\bar{c} = \frac{c_{oorspr.} Nx + N(1/2 - x)c_{input}}{Nl/2} \qquad (9a)$$

of:

$$\bar{c} = c_{input} + (c_{oorspr.} - c_{input})\, 2x/l \qquad (9b)$$

Met behulp van vgl. (8) volgt nu:

$$\bar{c}\,(t) = c_{input} + (c_{oorspr.} - c_{input}) \exp(-Nt/(\varepsilon H))$$

wat gelijk is aan vgl. (6).

Voorbeeld 2. *De stroming naar een volkomen put in freatisch water*
In het kader van de ontwikkeling van een gekoppeld onverzadigd/verzadigd transportmodel is deze stromingssituatie al eerder afgeleid in Van Ommen [1985a].
In het coördinatenstelsel zoals weergegeven in afb. 3, bedraagt de hoeveelheid water die naar de put stroomt op een afstand r tot de put:

$$Q(r) = \pi N(r_e^2 - r^2) \qquad (L^3T^{-1}) \qquad (10)$$

waarbij r_e de invloedstraal van de put voorstelt ($r_e = \sqrt{Q_p/(\pi N)}$).
De gemiddelde concentratie van het water in de put ($\bar{c}$) bedraagt dan:

$$\bar{c} = \frac{c_{input} r^2 + c_{oorspr.} (r_e^2 - r^2)}{r_e^2} \qquad (11a)$$

of:

$$\bar{c} = c_{oorspr.} + (c_{input} - c_{oorspr.})\, r^2/r_e^2 \qquad (11b)$$

De snelheid van het water, stromend in de poriën, op een afstand r tot de put (u(r)) bedraagt:

$$u(r) = \frac{(r_e^2 - r^2)N}{2r\varepsilon H} \qquad (LT^{-1}) \qquad (12)$$

zodat de verblijftijd T_r van een druppel water, zich bevindend op r=r, tot de put gelijk is aan:

$$T_r = -\frac{\varepsilon H}{N} \ln(1 - \frac{r^2}{r_e^2}) \qquad (T) \qquad (13)$$

Gecombineerd met vgl. (11b) leidt dit weer tot vgl. (6):

$$\bar{c}\,(t) = c_{input} + (c_{oorspr.} - c_{input}) \exp(-Nt/(\varepsilon H))$$

Voorbeeld 3. *De stroming naar een volkomen put in freatisch grondwater met een plaatsafhankelijke basisstroming*
De uitgangspositie wordt gevormd door een waterscheiding ter linkerzijde waarvan zich een basisstroming ontwikkelt onder invloed van het natuurlijke neerslagoverschot (zie afb. 4). De coördinaat van de waterscheiding is aangegeven door x_{ws}.
De stroomsnelheid in de poriën, op een willekeurige coördinaat x links van de waterscheiding ($u_{x,bs}$), bedraagt (vergelijk de analogie met voorbeeld 1):

$$u_{x,bs} = -\frac{N(x_{ws} - x)}{\varepsilon H} \qquad (LT^{-1}) \qquad (14)$$

Indien de potentiaalverlagingen tengevolge van de onttrekking relatief klein zijn ten opzichte van de dikte van het watervoerende pakket (zie veronderstelling 2.), dan mogen deze verlagingen gelijk gesteld worden aan de verlagingen die optreden in een pakket spanningswater met dezelfde geohydrologische eigenschappen [zie onder meer Bear, 1979 blz. 308 e.v.].

In dat geval zijn de snelheidscomponenten in de x- en de y-richting, veroorzaakt door de onttrekking op coördinaat x=0 en y=0 gelijk aan [Van den Akker, 1983; Bear, 1979]:

$$u_{x,p} = -\frac{Q_p\, x}{2\pi\varepsilon H(x^2+y^2)} \qquad (LT^{-1}) \qquad (15a)$$

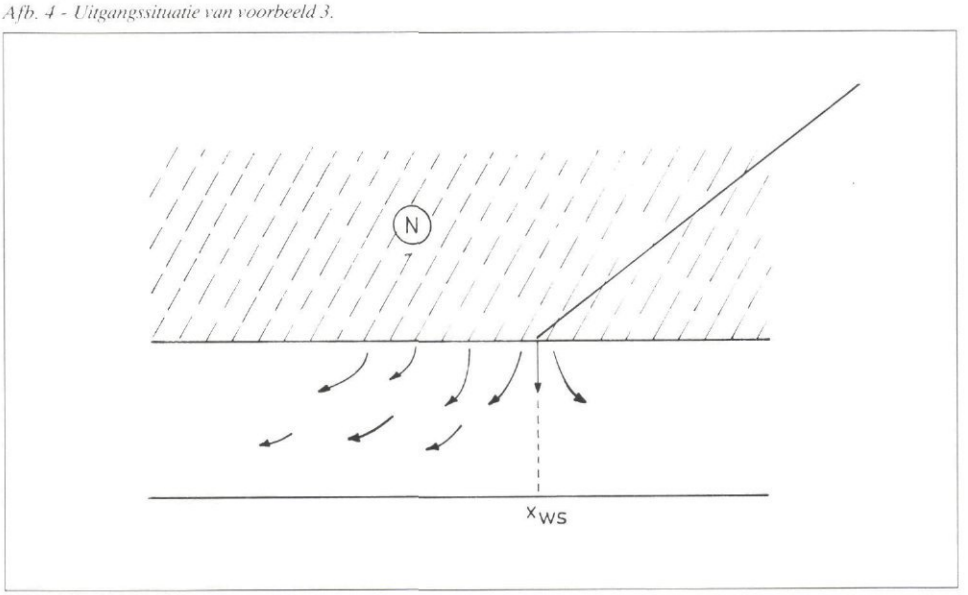
$$u_{y,p} = -\frac{Q_p\, y}{2\pi\varepsilon H(x^2+y^2)} \qquad (LT^{-1}) \qquad (15b)$$

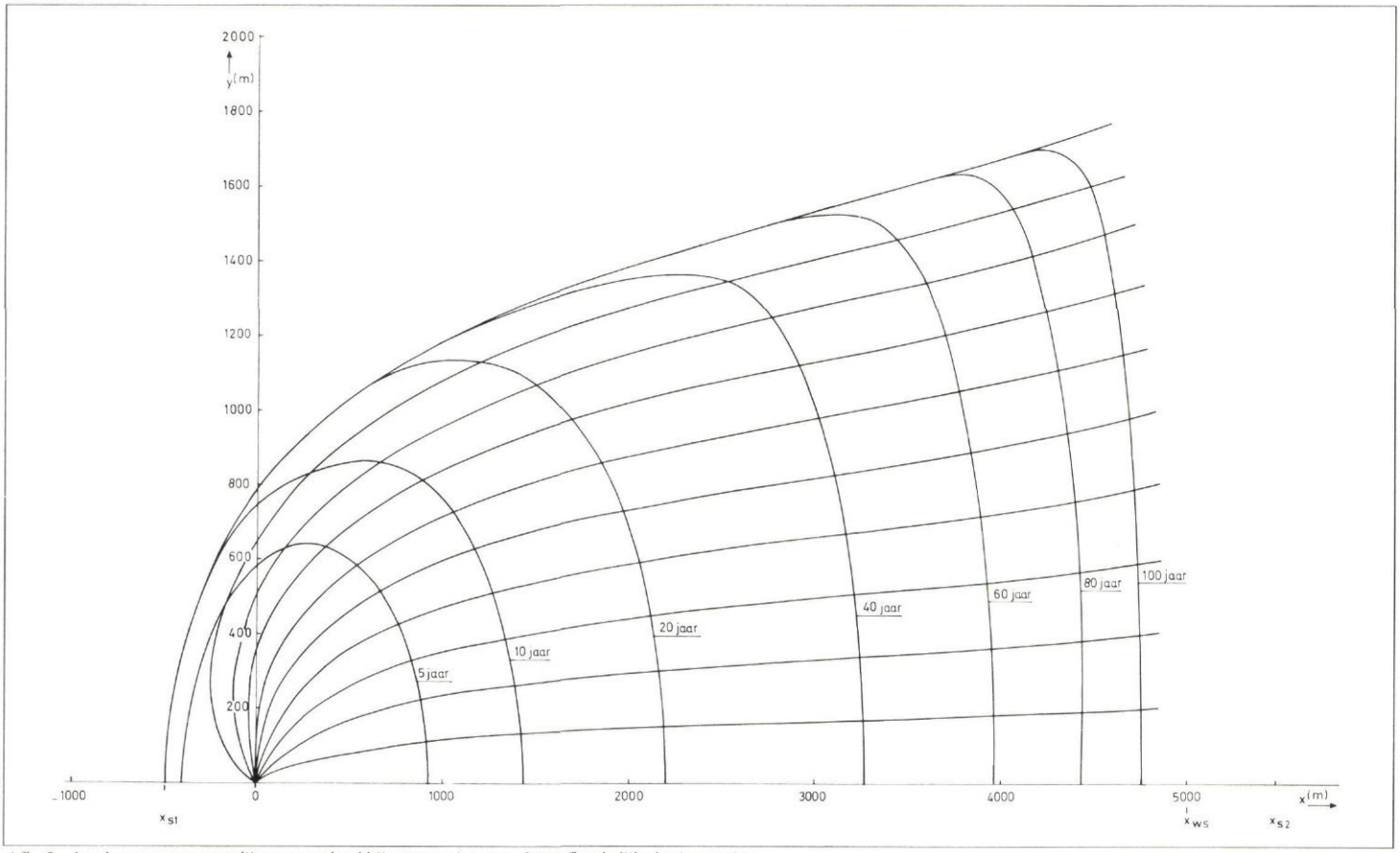
Indien de put zich 'links' van de waterscheiding bevindt, en wel op coördinaat (0;0) dan geldt voor de snelheidscomponenten voor de stromingssituatie van een put met plaatsafhankelijke basisstroming:

$$u_x = -\frac{N(x_{ws} - x)}{\varepsilon H} - \frac{Q_p\, x}{2\pi\varepsilon H(x^2+y^2)} \qquad (LT^{-1}) \qquad (16a)$$

$$u_y = -\frac{Q_p\, y}{2\pi\varepsilon H(x^2+y^2)} \qquad (LT^{-1}) \qquad (16b)$$

Afb. 4 - Uitgangssituatie van voorbeeld 3.





Afb. 5 - Isochronen en stroomlijnen optredend bij putstroming met plaatsafhankelijke basisstroming.

De stagnatiepunten op de x-as zijn dan gelijk aan:

$$x_{s1,s2} = \frac{2\pi x_{ws} \pm \sqrt{4\pi^2 x_{ws}^2 + 8\pi Q/N}}{4\pi} \quad (L) \qquad (17)$$

De stroomlijnen en verblijftijden kunnen bepaald worden door vanuit een aantal punten, liggend op een cirkel met straal r_o rondom de winning, de verplaatsingen in de x- en y-richting te berekenen.
De verplaatsingssnelheden zijn in dat geval gelijk aan $-u_x$ en $-u_y$ in vgl. (16).
Vanwege de onderlinge afhankelijkheid van de snelheidscomponenten is voor een stapsgewijze integratiemethode gekozen, zoals beschreven in Olsthoorn [1982].

Als criterium voor de halvering van de tijdstap is in ons geval tevens het inwendig produkt van de snelheden op de verschillende locaties gebruikt, doch met een strengere voorwaarde:

$$0.8 < \frac{u_1 u_2}{|u_1||u_1|} < 1.2 \qquad (18)$$

waarbij
u_1 : snelheidsvector op de uitgangspositie,
u_2 : snelheidsvector op de geschatte positie.

Indien aan de voorwaarde van vgl. (18) wordt voldaan, dan wordt de nieuwe positie $z_{t+\Delta t}$ bepaald door:

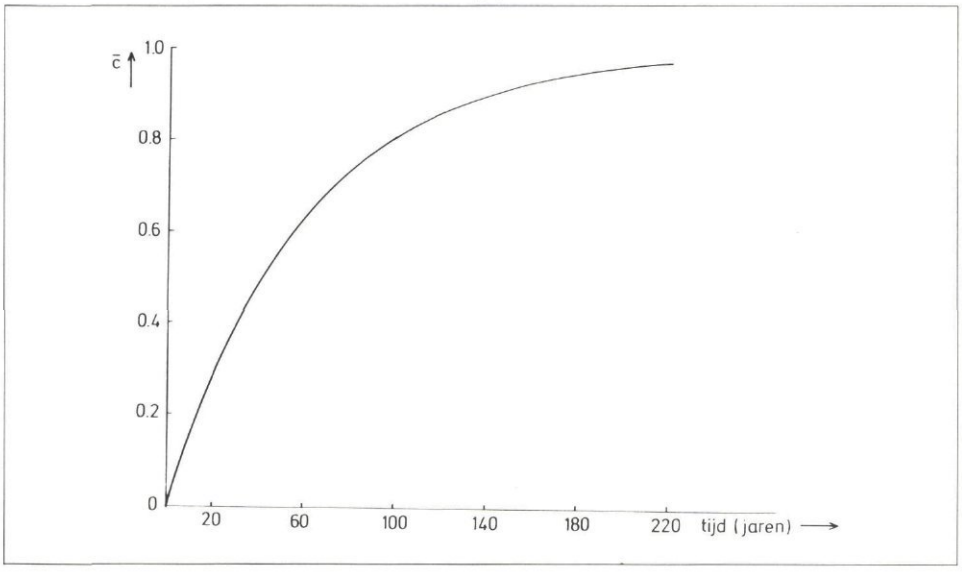
$$z_{t+\Delta t} = z_t + \tfrac{1}{2}(u_1 + u_2)\,\Delta t \qquad (19)$$

Hierin stelt Δt de tijdstap voor, waarmee aan het in vgl. (18) gestelde criterium wordt voldaan.
Afb. 5 toont een illustratie van de hierboven beschreven materie. Vanwege symmetrie-overwegingen is de helft van het stromingsbeeld in beschouwing genomen.
Er is uitgegaan van de volgende gegevens:

11 stroomlijnen,		H	= 60 m,
r_o	= 5 m,	N	= 0.30 m/jr,
x_{ws}	= 5.000 m,	Q_p	= 5.000.000 m³/jr.
ε	= 0.30,		

Hieruit volgen de stagnatiepunten op de x-as:
x_{s1} = - 484 m,
x_{s2} = - 5.484 m.

Afb. 6 - Verband tussen de concentratie in het opgepompte water en de tijd uitgaande van de in 'voorbeeld 3' gegeven schematisatie. Deze grafiek stelt tevens de cumulatieve verblijftijdsverdeling voor.



Aldus zijn de stroomlijnen en verblijftijden tot 100 jaar verkregen (een programma voor HP41CV is verkrijgbaar bij de auteur).
De effluentconcentratie op verschillende tijdstippen kan nu met behulp van afb. 5 bepaald worden. Hiertoe dient het oppervlak binnen een isochroon voor het betreffende tijdstip bekend zijn. Deze oppervlakte, vermenigvuldigd met de voeding, levert het totale aandeel van het debiet Q_p, afkomstig van het gebied binnen de isochroon.
Het planimetreren van het totale vanggebied levert zodoende een oppervlak op, gelijk aan Q_p/N.
De op deze manier verkregen relatie tussen de concentratie in het opgepompte water en de tijd vertoont exact hetzelfde verloop dat beschreven wordt door vgl. (6).
De grafiek, aldus verkregen, die de cumulatieve verdeling van de verblijftijden voorstelt [Huisman & Martijn, 1969] is getekend in afb. 6. In dit geval is c_{input} gelijk aan 1 en $c_{oorspr.}$ aan 0.

Praktische consequenties
Wanneer een verzadigd transportsysteem voldoet aan de in de theorie vermelde schematisatie en veronderstellingen, dan kan de stroming van een opgeloste stof vanuit dit systeem beschreven worden met een reservoir, waarin perfecte menging optreedt. Met deze kennis kunnen dus de gekoppelde onverzadigde/verzadigde transportmodellen, zoals beschreven in Van Ommen [1985a, b], ook op meer algemene situaties worden toegepast.
Voor een verzadigd systeem kan daarom een karakteristieke tijd voor het transport van een inerte stof gedefinieerd worden als:

$$T = \varepsilon H/N \qquad (T) \qquad (20)$$

Deze karakteristieke tijd is een belangrijke grootheid, en voor Nederlandse omstandigheden mag als vuistregel gehanteerd worden:

de karakteristieke tijd van een verzadigd systeem in jaren is gelijk aan de pakketdikte in meters.

Immers de porositeit ε ligt in de ordegrootte van 0,30-0,35, terwijl het netto neerslagoverschot ongeveer gelijk is aan 0,3 m/jr. 'Dikke' watervoerende pakketten hebben dus een grote karakteristieke tijd met betrekking tot veranderingen in inputconcentraties en op de lange duur kan – in deze gevallen – een langzame biologische- of chemische afbraak van de beschouwde stof effect sorteren.

Met deze opmerking wordt echter een nieuw probleem aangesneden: de kwantificering van deze afbraak die afhankelijk zal zijn van onder andere organische stofgehalte, redoxpotentiaal en temperatuur.

Literatuur
Akker, C. van den (1983). *Numerical Analysis of the streamfunction in plane groundwater flow.* RID mededeling 83-1, 130 pp. Nat. Inst. for Water Supply.
Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater.* MacGraw Hill. 567 pp.
Ernst, L. F. (1973). *De bepaling van transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zône.* Nota 755 ICW. Institute for Land and Water Management Research. 42 pp.
Gelhar, L. W. and Wilson, J. L. (1974). *Groundwater Quality Modelling.* Ground Water, 12: 399-408.
Huisman, L. en Martijn, Th. G. (1969). *Kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie.* H_2O (2), 16: 366-381.
Olsthoorn, T. N. (1982). *Berekening van verblijftijden van grondwater.* H_2O (4), 15: 59-61.
Ommen, H. C. van (1985a). *Systems approach to an unsaturated-saturated groundwater quality model, including adsorption, decomposition and bypass.* Submitted for publication in Agricultural Water Management.
Ommen, H. C. van (1985b). *Quality of drainage water from non-homogeneous soil profiles with an extension to a coupled unsaturated-saturated groundwater quality model, including the effect of bypass flow.* Submitted for publication in Agricultural Water Management.

• • •

Chloring en bijprodukten
• *Vervolg van pagina 312*

dan ook in de toekomst centraal moeten staan.
Ver vooruitkijkend stelde hij dat in de volgende eeuw organische microverontreinigingen veel minder aandacht zullen krijgen, immers de maatregelen gericht op de vermindering van de belasting van contaminanten zal dan het nodige effect hebben opgeleverd. De aandacht zal dan zijns inziens verschuiven naar distributieproblemen. Wellicht zullen dan ook meer microbiologische parameters en testen groeien in belangrijkheid en over de chemische analyses domineren. Het zoeken naar ideale desinfectiemethoden en procedures zal vooralsnog het centrale thema blijken in drinkwateronderzoek.
In een aantal posters, waaraan door velen zeer veel aandacht was gegeven, werden gegevens en resultaten van belang gepresenteerd. Zo werden naast nieuwe technieken voor isolatie, identificatie en toepassing van diverse screeningsmethoden ook resultaten gepresenteerd van een diepgaand onderzoek naar bepaalde metabolieten ontstaan bij chloring. De posters boden velen de gelegenheid uitvoerig te discussiëren. Zij die geïnteresseerd zijn in de resultaten van dit geslaagd symposium kunnen verwezen worden naar de Proceedings van dit Symposium dat dit najaar zal verschijnen, tevens als aflevering van het tijdschrift the Science of the Total Environment.

H. A. M. de Kruijf

• • •

Nederlandse Vereniging voor Afvalwaterzuivering en Waterkwaliteitsbeheer

Lessencyclus: Biodegradatie- en toxiciteitstesten

De lessencyclus Biodegradatie- en toxiciteit is een gezamenlijke activiteit van de NVA en het KVIV en wordt gehouden op 23 en 24 september 1985 te Leuven.

23 september: Biodegradatie
1. Microbieel-biochemische aspecten van de biodegradatie: prof. H. Verachtert (B).
2. Microbieel-ecologische aspecten van de biodegradatie: prof. Verstraete (B).
3. Testprocedures: algemeen overzicht: dr. J. Houtmeyers (B).
4. Biodegradatieproeven op detergenten: Iemand van Proctor and Gamble (B).
5. Biodegradatieproeven op pesticiden: drs. J. Blok, AKZO (N).
6. Biodegradatieproeven op oliën en koolwaterstoffen: dr. ir. J. Hoeks, ICW (N).

24 september: Toxiciteit
1. Biologische basis van toxiciteit bij pro- en eukaryoten: prof. dr. W. Seinen, RU Utrecht (N).
2. Verdedigingsmechanismen tegen toxiciteit: prof. dr. P. Th. Henderson, KU Nijmegen (N).
3. Toxiciteitsbewaking bij afvalwaterzuiveringsinstallaties: ir. J. Behrends, DSM (N).
4. Toxiciteitsbewaking voor oppervlaktewaters: De Pauw (B).
5. Genetical approaches to the construction of special adapted strains of micro-organisms: (spreker nog niet bekend).
6. Registratieprocedures: (spreker nog niet bekend).

Plaats: Universiteit Leuven.
Aanmelding: mevr. D. Wahler, Technologisch Instituut, Jan van Rijswijcklaan 58, 2018 Antwerpen, België.
Inlichtingen: dr. ir. A. Klapwijk, vakgroep Waterzuivering Landbouwhogeschool Wageningen, tel. 08370 - 8 34 28.

NVA-activiteiten 1985

3 september: Bestuursvergadering NVA.
18 september: Programmagroep 4, 'Zware metalen en organische microverontreinigingen in het aquatisch milieu', Jaarbeurs Utrecht. Contactadres: ir. M. Ilsink, West-Overijssel.
22 - 28 september: NVA-excursie Zwitserland.
Contactadressen: ir. R. T. Eikelboom,