

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

. BEREKENING VAN GRONDWATERVERONTREINIGING

BIJ PUNTBELASTINGEN

dr. J. Hoeks

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onder-
zoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

I N H O U D

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. TRANSPORT VAN OPGELOSTE STOFFEN	1
3. TRANSPORT VAN GRONDWATER	5
3.1. Algemeen	5
3.2. Afdekkend pakket	5
3.3. Watervoerend pakket	6
4. TRANSPORT VAN OPGELOSTE STOFFEN IN GRONDWATER	11
5. REKENVOORBEELDEN	14
6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	17
7. LITERATUUR	20
BIJLAGEN	

1. INLEIDING

Bij de keuze van terreinen voor afvalverwerking, bijvoorbeeld vuilstortplaatsen of vloeivelden, doet zich onder andere de vraag voor in hoeverre er sprake zal zijn van verontreiniging van het grondwater en oppervlaktewater. Een exacte voorspelling van de te verwachten concentraties in het grondwater als functie van afstand, diepte en tijd is bijzonder moeilijk te geven. Daarvoor zou een zeer gedetailleerd rekenmodel nodig zijn, waarin een groot aantal nauwkeurig bekende parameters moet worden opgenomen. In de praktijk blijken deze parameters veelal onvoldoende bekend te zijn. Men heeft dus slechts de beschikking over meer of minder nauwkeurige schattingen van de parameters. In dergelijke gevallen is het niet zinvol om een zeer gedetailleerd rekenmodel op te zetten.

In deze nota is geprobeerd om met een aantal vereenvoudigingen te komen tot vrij simpele formuleringen, waarmee op basis van hydrologische factoren de verplaatsing van verontreinigingen in het grondwater is te berekenen. Hierbij is ook rekening gehouden met interactieprocessen in de bodem, zoals adsorptie en biochemische afbraak.

2. TRANSPORT VAN OPGELOSTE STOFFEN

Voor het transport van opgeloste stoffen in de bodem is de fluxvergelijk voor lineair transport te schrijven als:

$$F = - D_s \frac{\partial C}{\partial x} + vC \quad (1)$$

waarin:

F = flux van de opgeloste stof ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jaar}^{-1}$)

D_s = dispersiecoëfficiënt (incl. diffusie) ($\text{m}^2 \cdot \text{jaar}^{-1}$)

C = concentratie van de opgeloste stof ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$\frac{\partial C}{\partial x}$ = concentratiegradiënt in de x-richting ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}$)

v = Darcy-stroomsnelheid ($\text{m} \cdot \text{jaar}^{-1}$)

De flux F is dus de som van de dispersieflux ($- D_s \frac{\partial C}{\partial x}$) en de massaflux (vC). Uitgaande van vergelijking (1) is de continuïteitsvergelijking ($\epsilon_w \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x} - S$) te schrijven als:

$$\epsilon_w \frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - S \quad (2)$$

waarin:

ϵ_w = watergevuld poriënvolume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

t = tijd (jaren)

S = 'sinkterm' als gevolg van adsorptie en chemische of biochemische processen ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{jaar}^{-1}$)

Voor de meeste gevallen, zeker voor stroming in de verzadigde zone, blijkt de dispersieflux klein te zijn in vergelijking met de massaflux. In de praktijk blijft de bijdrage van de dispersieflux aan de totale flux vaak beperkt tot 10% of minder (BOLT, 1976). Bij verwaarlozing van de dispersie gaat vergelijking (2) over in:

$$\epsilon_w \frac{\partial C}{\partial t} = - v \frac{\partial C}{\partial x} - S \quad (3)$$

Indien er sprake is van adsorptie dan is S gelijk aan de verandering van de geadsorbeerde hoeveelheid q (dus $S = \frac{\partial q}{\partial t}$). Verloopt de adsorptie lineair, dat wil zeggen recht evenredig met de concentratie (dus $q = kC$, waarbij k is de adsorptiecoëfficiënt) dan is vergelijking (3) te schrijven als:

$$\epsilon_w \frac{\partial C}{\partial t} = - v \frac{\partial C}{\partial x} - k \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4)$$

Uitwerking levert:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \cdot \frac{\partial x}{\partial C} = - \frac{v}{\epsilon_w + k} \quad (5)$$

$$\text{of } - \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_C = - \frac{v}{\epsilon_w + k} \quad (6)$$

De linkerterm $\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_C$ is de snelheid waarmee het front van de opgeloste stof zich door de grond verplaatst. Vergelijking (6) kan als volgt worden herschreven:

$$v_i = v^* \left(\frac{1}{1 + R} \right) \quad (7)$$

waarin:

v_i = snelheid waarmee het front van de opgeloste stof zich verplaatst
(m.jaar⁻¹)

v^* = gemiddelde stroomsnelheid van het water in de poriën, waarbij
 $v = v/\epsilon_w$ (m.jaar⁻¹)

R = distributiefactor, die aangeeft hoe de opgeloste stof is verdeeld over de geadsorbeerde fase en de opgeloste fase, dat wil zeggen $R = \frac{k}{\epsilon_w} (= q/\epsilon_w C)$

Het effect van adsorptie kan in dit geval dus eenvoudig in rekening worden gebracht door de stroomsnelheid van het water te reduceren met de factor $(1 + R)$.

Naast adsorptieprocessen kunnen ook biochemische afbraakprocessen een rol spelen. Voor vele biochemische reacties kan bij benadering worden uitgegaan van een eerste-orde afbraakreactie, dat wil zeggen:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - k_r C \quad (8)$$

waarin k_r = afbraaksnelheidscoëfficiënt (jaar⁻¹)

Als zowel adsorptie als biochemische afbraak tegelijkertijd optreden, dan kan vergelijking (4) worden uitgebreid met behulp van vergelijking (8) tot:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - v^* \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{k}{\epsilon_w} \frac{\partial C}{\partial t} - k_r C \quad (9)$$

Bij biochemische afbraak zal uiteindelijk een stationair front ontstaan, dat wil zeggen $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ en het front komt dus tot stilstand. Vergelijking (9) gaat dan over in:

$$v^* \frac{\partial C}{\partial x} = -k_r C \quad (10)$$

hetgeen herschreven kan worden als ($C = C_0$ (C_0 is concentratie in het toegevoerde water) als $x = 0$):

$$\int_{C_0}^C \frac{\partial C}{C} = \int_0^x -\frac{k_r}{v^*} \partial x \quad (11)$$

Na integratie wordt dit:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-k_r x/v^*} \quad (12)$$

Uit deze vergelijking blijkt, dat adsorptie geen invloed heeft op het uiteindelijke stationaire front. De concentratie C/C_0 is alleen afhankelijk van de afstand (x) en de stroomsnelheid van het water (v^*). Wel zal het, in geval van adsorptie, langer duren voordat deze stationaire toestand wordt bereikt.

Indien x gegeven wordt als functie van t , dan blijkt volgens vergelijking (7) de afstand x bij adsorptie gelijk te zijn aan ($x = v_i t$):

$$x = v^* t \left(\frac{1}{1+R} \right) \quad (13)$$

Dit ingevuld in vergelijking (12) levert voor C/C_0 de uitdrukking:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-k_r t/(1+R)} \quad (14)$$

Met behulp van vergelijking (13) en (14) is voor een component,

die onderhevig is aan adsorptie en afbraak, de indringingsdiepte x en de daarbij behorende concentratie C/C_0 te berekenen als functie van de verblijftijd t .

3. TRANSPORT VAN GRONDWATER

3.1. A l g e m e e n

De stroming van grondwater wordt bepaald door een groot aantal geohydrologische factoren. Stroming in horizontale richting treedt voornamelijk op in goeddoorlatende (grof)zandige lagen: de watervoerende pakketten. In slechtdoorlatende (slibhoudende of venige) lagen, ook wel afdekkend pakket genoemd als deze een watervoerend pakket aan de bovenzijde afsluiten, treedt overwegend verticale stroming op.

De berekeningen over grondwaterstroming in deze nota zijn opgezet voor situaties waarbij een watervoerend pakket al dan niet wordt afgedekt door een afdekkend pakket.

Voor de stroming in het watervoerend pakket kunnen meerdere situaties worden onderscheiden, al naar gelang het verloop van de isohypsen (lijnen van gelijke grondwaterstanden). Hierbij zijn een drietal situaties onderscheiden:

- a. isohypsen parallel, stroomlijnen parallel (lineair)
- b. isohypsen cirkelvormig, stroomlijnen divergent (radiaal-divergent)
- c. isohypsen cirkelvormig, stroomlijnen convergent (radiaal-convergent)

De hier genoemde situaties zullen in de volgende paragrafen achtereenvolgens worden besproken.

3.2. A f d e k k e n d p a k k e t

De infiltratie van water door een afdekkend pakket hangt af van de doorlatendheid (vaak weergegeven met de c -waarde) en van het drukhoogteverschil over deze slechtdoorlatende laag, dat wil zeggen het drukhoogteverschil tussen het ondiepe en het diepe grondwater. Met behulp van deze gegevens is vast te stellen welk deel van het neer-

slagoverschot wegzakt naar het diepere grondwater en welk deel oppervlakkig wordt afgevoerd.

Het transport in het afdekkend pakket is hier beschouwd als een vertikaal transport en voldoet dan aan de vergelijking:

$$d = \frac{Nt}{\epsilon_w} \quad (15)$$

waarin:

d = gemiddelde indringingsdiepte van het water na t jaren (m)

t = tijd (jaren)

N = deel van het neerslagoverschot dat wordt afgevoerd naar het diepere grondwater (m.jaar⁻¹)

ϵ_w = watergevuld poriënvolume (m³.m⁻³)

De waarde van N moet worden bepaald uit de drukhoogteverschillen tussen ondiep en diep grondwater, en de c -waarde van het afdekkend pakket.

3.3. Watervoerend pakket

a. Lineaire stroming

Het verloop van isohypsen en stroomlijnen is voor deze situatie schematisch weergegeven in fig. 1A. De volgende berekening is af te leiden uit formules voor transporttijden in het grondwater (ERNST, 1973).

De stroomsnelheid van het grondwater op een plaats x is gelijk aan de totale hoeveelheid water die bovenstrooms van x infiltreert gedeeld door de dikte van het watervoerend pakket gecorrigeerd voor het poriënvolume, in formule (zie ook fig. 1B):

$$v^* = \frac{(x + x_s) N}{\epsilon_w D} \quad (16)$$

waarin:

v^* = gemiddelde stroomsnelheid van het grondwater in de poriën
(m.jaar⁻¹)

x = afstand tot de vervuiliingsbron (m)

x_s = afstand van vervuiliingsbron tot waterscheiding (m)

N = neerslagoverschot dat wordt afgevoerd via het watervoerend pakket (m.jaar⁻¹)

ϵ_w = watergevuuld poriënvolume (m³.m⁻³)

D = dikte van het watervoerend pakket (m)

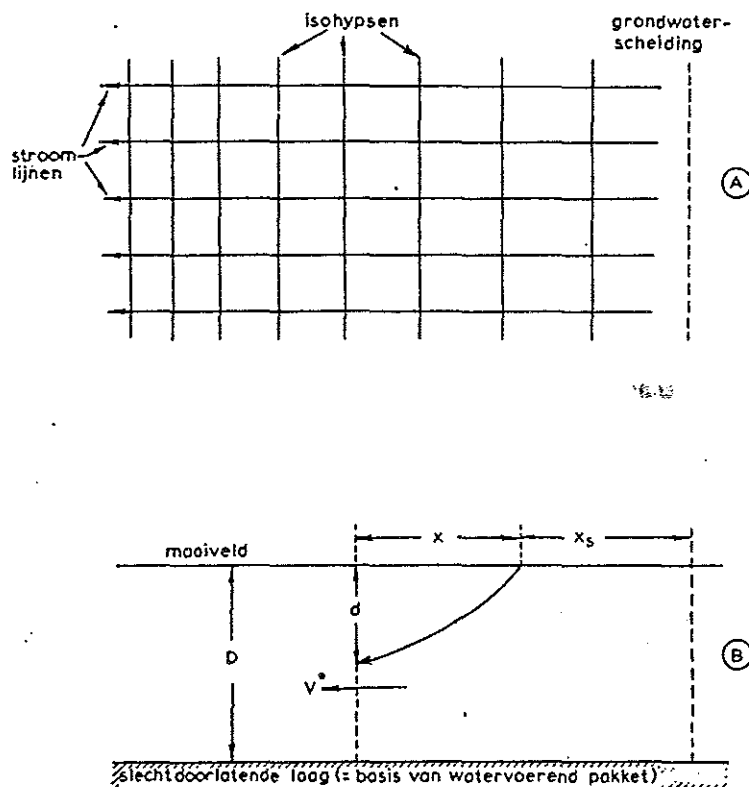


Fig. 1. Lineaire stroming in een watervoerend pakket.

A: patroon van isohypsen en stroomlijnen;

B: verloop van een stroomlijn in het watervoerende pakket
(zie tekst)

Omdat $v^* \equiv dx/dt$, kan vergelijking (16) worden herschreven als:

$$\int_0^x \frac{dx}{x + x_s} = \int_0^t \frac{N}{\epsilon_w D} dt \quad (17)$$

Na integratie levert dit voor de horizontale verplaatsing van het grondwater:

$$x = x_s (e^{Nt/\epsilon_w D} - 1) \quad (18)$$

De diepte van de stroombaan op afstand x van de vervuilingsbron wordt berekend als:

$$d = \left(\frac{x}{x + x_s} \right) D \quad (19)$$

waarin: d = indringingsdiepte op afstand x van de vervuilingsbron (m)

b. Radiaal-divergente stroming

Het verloop van de isohypsen en de stroomlijnen is schematisch weergegeven in fig. 2. Deze situatie komt bijvoorbeeld voor op de Veluwe en in Drenthe.

De stroomsnelheid van het grondwater op afstand x van een vervuilingsbron is hier:

$$v^* = \frac{(x + x_s) N}{2\epsilon_w D} \quad (20)$$

Weer gebruikmakend van het feit dat $v^* \equiv dx/dt$, levert vergelijking (20) na integratie:

$$x = x_s (e^{Nt/2\epsilon_w D} - 1) \quad (21)$$

De diepte van de stroombaan op afstand x van de vervuilingsbron wordt berekend uit de verhouding tussen de afgevoerde hoeveelheden uit de gebieden $\pi\{(x + x_s)^2 - x_s^2\}$ en $\pi(x + x_s)^2$, vermenigvuldigd met

de dikte van het watervoerende pakket D. Dit resulteert in:

$$d = \left\{ 1 - \left(\frac{x_s}{x + x_s} \right)^2 \right\} D \quad (22)$$

waarin d weer de indringingsdiepte voorstelt.

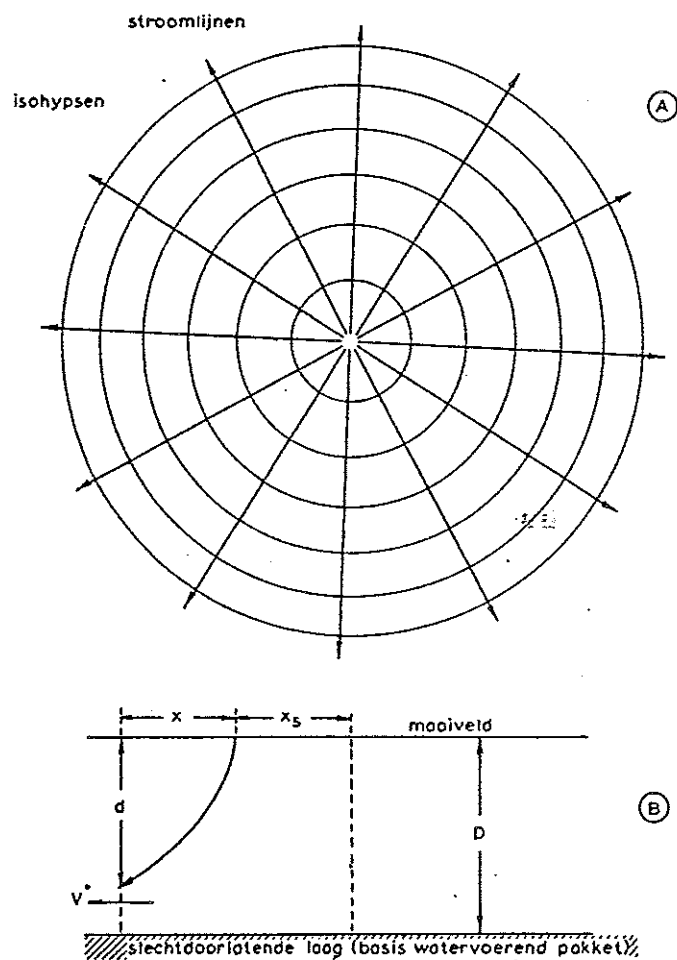


Fig. 2. Radiaal-divergente stroming in een watervoerend pakket.

A: patroon van isohypsen en stroomlijnen

B: verloop van een stroomlijn in het watervoerende pakket
(zie tekst)

c. Radiaal-convergente stroming

Het verloop van isohypsen en stroomlijnen is weergegeven in fig. 3. Deze situatie kan bijvoorbeeld voorkomen in een drinkwaterwinningsgebied.

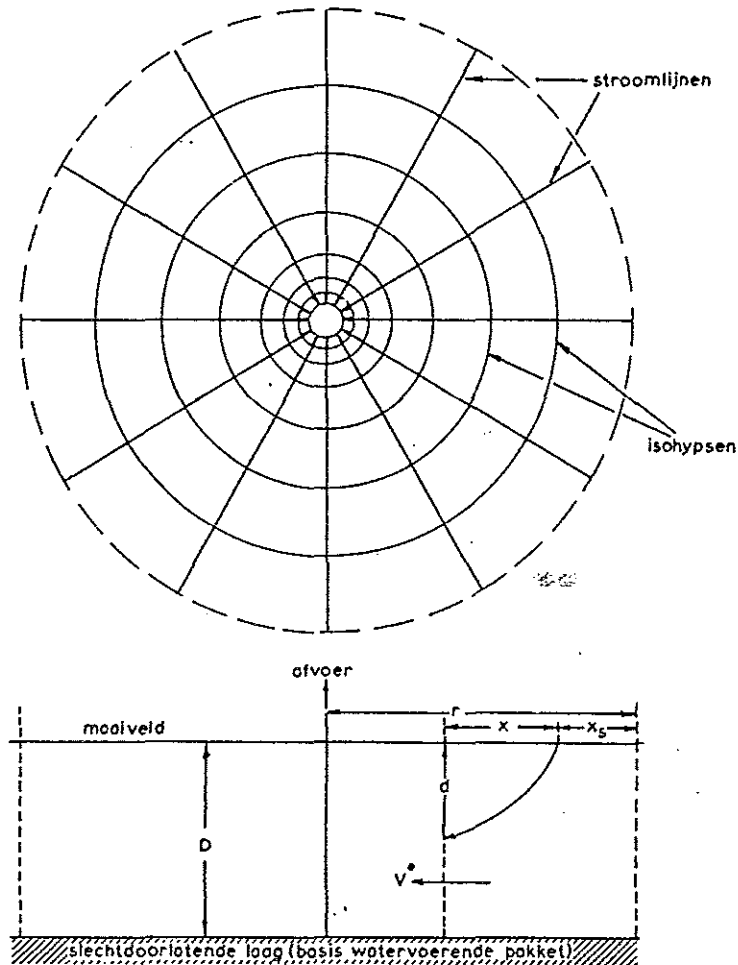


Fig. 3. Radiaal-convergente stroming in een watervoerend pakket.

A: patroon van isohypsen en stroomlijnen

B: verloop van een stroomlijn in het watervoerend pakket

(zie tekst)

De stroomsnelheid van het grondwater wordt hier, evenals in de vorige gevallen, berekend uit de bovenstrooms geïnfiltreerde hoeveelheid water en het oppervlak (hier cylinderoppervlak) waar deze hoe-

veelheid water doorstroomt. Dit levert:

$$v^* = \frac{N}{2\epsilon_w D} \left[\frac{r^2 - \{r - (x + x_s)\}^2}{r - (x + x_s)} \right] \quad (23)$$

waarin:

r = straal van het gebied waaruit de overtollige neerslag wordt afgevoerd naar het centrum (zie ook fig. 3)

Met $v^* \equiv dx/dt$ gaat vergelijking (23) na integratie over in:

$$x = (r - x_s) - \sqrt{\{(r - x_s)^2 - r^2\} e^{\frac{Nt}{\epsilon_w D}} + r^2} \quad (24)$$

De indringingsdiepte op afstand x is te berekenen met:

$$d = \frac{x\{2(r - x_s) - x\}}{(x + x_s)\{2r - (x + x_s)\}} D \quad (25)$$

4. TRANSPORT VAN OPGELOSTE STOFFEN IN GRONDWATER

Combinatie van de formules voor het transport van opgeloste stoffen, i.c. vergelijking (7), met de formules voor het transport in het grondwater, levert een aantal formules waarmee de verplaatsing van opgeloste stoffen in het grondwater is te berekenen.

Combinatie van vergelijking (7) met de vergelijking (16), (20) en (23) levert n.l. de transportvergelijking in het grondwater voor een opgeloste stof, die onderhevig is aan adsorptie. In feite betekent dit, dat de reductiefactor $1/(1 + R)$ wordt toegevoegd aan de vergelijkingen (16), (20) en (23).

Na integratie ontstaan dan de volgende formules voor het transport in grondwater.

a. Afdekkend pakket

De indringingsdiepte van opgeloste stoffen in het afdekkend pakket bedraagt

$$d = \frac{Nt}{\epsilon_{w1}(1 + R_1)} \quad (26)$$

waarin ϵ_{w1} en R_1 het poriënvolume respectievelijk de distributiefactor in het afdekkende pakket voorstellen.

Uit vergelijking (26) is tevens de verblijftijd in het afdekkende pakket (t_1) af te leiden, namelijk (d_1 = dikte van afdekkend pakket):

$$t_1 = \frac{\epsilon_{w1} d_1 (1 + R_1)}{N} \quad (27)$$

Deze verblijftijd t_1 moet namelijk worden ingevoerd in de vergelijkingen voor het transport in het watervoerende pakket.

b. Watervoerend pakket

Als het watervoerende pakket aan de bovenzijde wordt afgesloten door een afdekkend pakket, dan dient de verblijftijd t te worden gecorrigeerd voor de verblijftijd t_1 in dit afdekkende pakket. De totale indringingsdiepte in het grondwater wordt dan de indringingsdiepte in het watervoerende pakket vermeerderd met de dikte d_1 van het afdekkende pakket.

Aldus kunnen voor het transport van opgeloste stoffen in het watervoerende pakket de volgende formules worden afgeleid:

- lineair

$$x = x_s \left[e^{\frac{N(t-t_1)}{\epsilon_{w2} D(1+R_2)}} - 1 \right] \quad (28)$$

$$d = \left(\frac{x}{x + x_s} \right) D + d_1 \quad (29)$$

- radiaal-divergent

$$x = x_s \left[e^{\frac{N(t-t_1)}{2\epsilon_{w2} D(1+R_2)}} - 1 \right] \quad (30)$$

$$d = \left[1 - \left(\frac{x_s}{x + x_s} \right)^2 \right] D + d_1 \quad (31)$$

- radiaal-convergent

$$x = (r - x_s) - \sqrt{\left[(r - x_s)^2 - r^2 \right] e^{\frac{N(t-t_1)}{\epsilon_{w2} D(1+R_2)}} + r^2} \quad (32)$$

$$d = \frac{x}{x + x_s} \left[\frac{2(r - x_s) - x}{2r - (x + x_s)} \right] D + d_1 \quad (33)$$

In bovenstaande vergelijkingen staan ϵ_{w2} en R_2 voor het poriënvolume respectievelijk distributiefactor in het watervoerend pakket. In geval het afdekkend pakket niet aanwezig is, dan is in de vergelijkingen (28) tot en met (33) $t_1 = 0$ en $d_1 = 0$.

Met behulp van vergelijking (14) kunnen hier nog twee vergelijkingen aan worden toegevoegd, die het verloop van de concentratie weergegeven als functie van de tijd voor componenten die zijn betrokken bij biochemische afbraakprocessen. Bij de integratie van vergelijking (11), welke vergelijking (14) oplevert, was v^* onafhankelijk van x (dit geldt voor het afdekkende pakket, verticale stroming). Echter ook als v^* afhankelijk is van x (watervoerend pakket) blijkt dat wanneer de vergelijkingen (16), (20) en (23) worden ingevoerd in vergelijking (11) in alle gevallen na integratie vergelijking (14) ontstaat.

Als de afbraaksnelheidscoëfficiënt in het afdekkende pakket (met verblijftijd t_1) k_{r1} bedraagt en in het watervoerende pakket k_{r2} , dan levert dit de volgende formules (met vlg. (14)):

- afdekkend pakket ($C = C_0$ voor $t = 0$)

voor $t < t_1$:

$$\frac{C}{C_0} = \exp\{-k_{r1} t / (1 + R_1)\} \quad (34)$$

- watervoerend pakket ($C = C_0 \exp\{-k_{r1}t_1/(1 + R_1)\}$ voor $t = t_1$)
 voor $t > t_1$:

$$\frac{C}{C_0} = \exp\{-k_{r2}(t - t_1)/(1 + R_2) - k_{r1}t_1/(1 + R_1)\} \quad (35)$$

Als het afdekkend pakket afwezig is, dan is $t_1 = 0$ en $k_{r1} = 0$.

Met de formules (26) tot en met (35) is nu op betrekkelijk eenvoudige wijze de verplaatsing van opgeloste stoffen in het grondwater (en voor afbreekbare stoffen ook de concentratie) te berekenen. Vooral met eenvoudige (programmeerbare) zakrekenmachines zijn x , d en C/C_0 op snelle wijze te berekenen als functie van t , bij gegeven N , ε_w , d_1 , D , x_s , R , k_r en voor vergelijkingen (32) en (33) ook nog r . Voor hen die beschikken over een rekenmachine HP25 (Hewlett-Packard) zijn in bijlage 2 de programma's vermeld.

5. REKENVOORBEELDEN

Er zullen nu een tweetal rekenvoorbeelden worden gegeven die betrekking hebben op respectievelijk grondwaterverontreiniging bij een vuilstortplaats en olieverontreiniging in een waterwingebied.

V o o r b e e l d 1

Een vuilstortplaats is gelegen in een gebied dat zijn overtollige neerslag vanuit een centraal hooggelegen punt naar alle richtingen afvoert, dat wil zeggen de isohypsen verlopen cirkelvormig en de stroomlijnen divergeren. Uit de drukhoogteverschillen tussen ondiep en diep grondwater en de c -waarde van het aanwezige afdekkende pakket ($d_1 = 3$ meter) is afgeleid dat de afvoer naar het diepere grondwater 200 mm per jaar bedraagt ($N = 0,2$ m/j). De dikte van het watervoerend pakket bedraagt 50 meter ($D = 50$ m), terwijl de afstand tussen de stortplaats en het centrale hooggelegen punt 2 km bedraagt. De breedte van de stortplaats bedraagt 200 meter, zodat de verontreinigde stroombaan begrensd wordt door twee stroomlijnen met een x_s -waarde van respectievelijk 1900 m en 2100 m. Het poriënvolume van

het afdekkend pakket bedraagt 35% ($\epsilon_{w1} = 0,35$) en van het watervoerend pakket 40% ($\epsilon_{w2} = 0,40$).

Te berekenen: de grondwaterverontreiniging als functie van de tijd (in jaren) te weten:

- de verplaatsing van Cl in het grondwater: Cl wordt niet geadsorbeerd of afgebroken, zodat $R_1 = R_2 = 0$ en $k_{r1} = k_{r2} = 0$;
- de verplaatsing van NH_4 : voor de adsorptie van NH_4 is aangenomen dat in het afdekkend pakket $R_1 = 1$ en in het watervoerend pakket $R_2 = 0,2$;
- de verplaatsing van Zn: voor de adsorptie van Zn is aangenomen dat in het afdekkend pakket $R_1 = 10$ en in het watervoerend pakket $R_2 = 4$;
- de verplaatsing van opgeloste organische stoffen, gemeten als COD: aangenomen is dat deze stoffen niet worden geadsorbeerd, dus $R_1 = R_2 = 0$, terwijl de afbraaksnelheidscoëfficiënten zijn gesteld op respectievelijk $k_{r1} = 1 \text{ jaar}^{-1}$ en $k_{r2} = 0,3 \text{ jaar}^{-1}$.

De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel 1 en fig. 4.

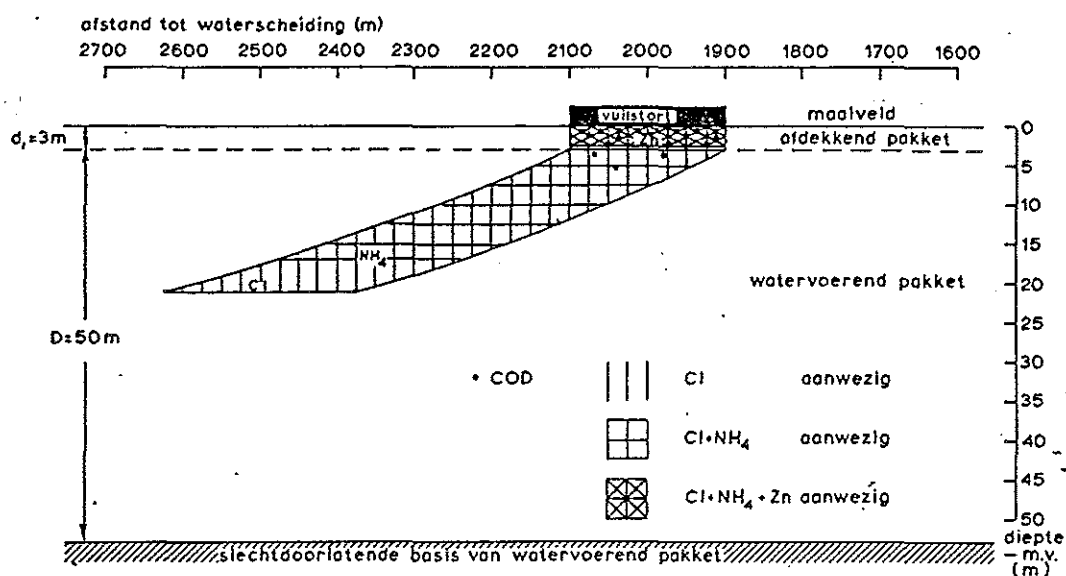


Fig. 4. Verontreiniging van grondwater bij een vuilstortplaats na 50 jaar, berekend naar gegevens van Voorbeeld 1 (zie tekst en tabel 1)

Tabel 1. Verplaatsing van Cl, NH₄, Zn en COD in het grondwater bij een vuilstortplaats, als functie van de tijd (berekend naar gegevens van Voorbeeld 1, zie tekst; x_g, x en d in meters)

Tijd (jaren)	Stroomlijn met x _g = 2100									Stroomlijn met x _g = 1900								
	Cl		NH ₄		Zn		COD			Cl		NH ₄		Zn		COD		
	x	d	x	d	x	d	x	d	C/C ₀	x	d	x	d	x	d	x	d	C/C ₀
1	-	0,57	-	0,29	-	0,05	-	0,57	0,368	-	0,57	-	0,29	-	0,05	-	0,57	0,368
2	-	1,14	-	0,57	-	0,10	-	1,14	0,135	-	1,14	-	0,57	-	0,10	-	1,14	0,135
3	-	1,71	-	0,86	-	0,16	-	1,71	0,050	-	1,71	-	0,86	-	0,16	-	1,71	0,050
4	-	2,29	-	1,14	-	0,21	-	2,29	0,018	-	2,29	-	1,14	-	0,21	-	2,29	0,018
5	-	2,86	-	1,43	-	0,26	-	2,86	0,007	-	2,86	-	1,43	-	0,26	-	2,86	0,007
7	18	3,87	-	2,00	-	0,36	18	3,87	0,003	17	3,87	-	2,00	-	0,36	17	3,87	0,003
10	50	5,32	-	2,86	-	0,52	50	5,23	0,001	46	5,32	-	2,86	-	0,52	46	5,32	0,001
15	105	7,64	40	4,84	-	0,78	105	7,64	<0,001	95	7,64	36	4,84	-	0,78	95	7,64	<0,001
20	161	9,86	85	6,81	-	1,04	161	9,86	0	145	9,86	77	6,81	-	1,04	145	9,86	0
30	277	13,96	178	10,50	-	1,56				250	13,96	161	10,50	-	1,56			
40	398	17,68	275	13,90	-	2,08				361	17,68	249	13,90	-	2,08			
50	527	21,04	376	17,02	-	2,60				476	21,04	340	17,02	-	2,60			
70	803	26,83	591	22,55	26	4,21				726	26,83	535	22,55	23	4,21			
100	1273	33,61	949	29,28	91	7,05				1151	33,61	859	29,28	82	7,05			
t ₁	5,25 j		10,50 j		57,75 j		5,25 j			5,25 j		10,50 j		57,75 j		5,25 j		
(verblijf- tijd in afdekkend pakket)																		

V o o r b e e l d 2

In een waterwingebied vindt als gevolg van een ongeluk een verontreiniging met olie plaats. De isohypsen verlopen cirkelvormig en de stroomlijnen convergeren naar de put waar de waterwinning plaats vindt. De straal van het waterwingebied bedraagt 1500 meter ($r = 1500$ m).

Het ongeval heeft plaatsgevonden op 1000 meter van de put, dus 500 meter binnen de grens van het waterwingebied ($x_s = 500$ m). Er is geen afdekkend pakket aanwezig ($d_1 = 0$ en $t_1 = 0$), terwijl het watervoerend pakket 60 meter dik is, met een poriënvolume van 40% ($D = 60$ m, $\varepsilon_{w2} = 0,40$). Het jaarlijkse neerslagoverschot wordt volledig afgevoerd via het watervoerende pakket ($N = 0,3$ m/j).

Te berekenen: de grondwaterverontreiniging als functie van de tijd, met name wanneer de verontreiniging de drinkwaterwinningsput bereikt, en wel voor de volgende componenten:

- component A: een persistente vermindering ($k_{r2} = 0$), die bovendien niet wordt geadsorbeerd ($R_2 = 0$);
- component B: wordt vrij traag afgebroken ($k_{r2} = 0,2$ jaar⁻¹) en er vindt geen adsorptie plaats ($R_2 = 0$);
- component C: de afbraak is traag, evenals bij component B ($k_{r2} = 0,2$ jaar⁻¹), maar er vindt bovendien adsorptie plaats ($R_2 = 5$);
- component D: de afbraak verloopt sneller dan bij component B en C ($k_{r2} = 0,5$ jaar⁻¹), doch er treedt geen adsorptie op ($R_2 = 0$).

De resultaten van deze berekening staan vermeld in tabel 2 en fig. 5.

6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In deze nota zijn voor een aantal vereenvoudigde situaties formules afgeleid, waarmee het mogelijk is de verplaatsing van verontreinigende stoffen in het grondwater te berekenen, rekening houdend met geohydrologische factoren, adsorptieprocessen en biochemische afbraakreacties.

Voor de berekeningen zijn gegevens nodig over:

Tabel 2. Verplaatsing van een 4-tal oliecomponenten in het grondwater binnen een waterwingebied (berekend naar gegevens van Voorbeeld 2, zie tekst; x en d in meters)

Tijd (jaren)	Component A (persistent)			Component B (geringe afbraak)			Component C (geringe afbraak + adsorptie)			Component D (vrij snelle afbraak)		
	x	d	C/C ₀	x	d	C/C ₀	x	d	C/C ₀	x	d	C/C ₀
1	7,9	0,75	1,00	7,9	0,75	0,819	1,3	0,12	0,967	7,9	0,75	0,607
2	16	1,48	1,00	16	1,48	0,670	2,6	0,25	0,936	16	1,48	0,368
3	24	2,21	1,00	24	2,21	0,549	3,9	0,37	0,905	24	2,21	0,223
4	33	2,93	1,00	32	2,93	0,449	5,2	0,50	0,875	32	2,93	0,135
5	41	3,64	1,00	41	3,64	0,368	6,5	0,62	0,846	41	3,64	0,082
7	59	5,03	1,00	59	5,03	0,247	9,2	0,87	0,792	59	5,03	0,030
10	87	7,05	1,00	87	7,05	0,135	13	1,24	0,717	87	7,05	0,007
15	138	10,26	1,00	138	10,26	0,050	20	1,85	0,607	138	10,26	<0,001
20	197	13,27	1,00	197	13,27	0,018	27	2,45	0,513			
30	343	18,76	1,00	343	18,76	0,002	41	3,64	0,368			
40	565	23,61	1,00	565	23,61	<0,001	56	4,80	0,264			
50							71	5,94	0,189			
70							103	8,14	0,079			
100							157	11,28	0,036			
150							264	16,10	0,007			
200							405	20,45	0,001			
250							618	24,36	<0,001			

tijdstip,
waarop
waterwinning
bereikt wordt

47 jaar

wordt niet bereikt

wordt niet bereikt

wordt niet bereikt

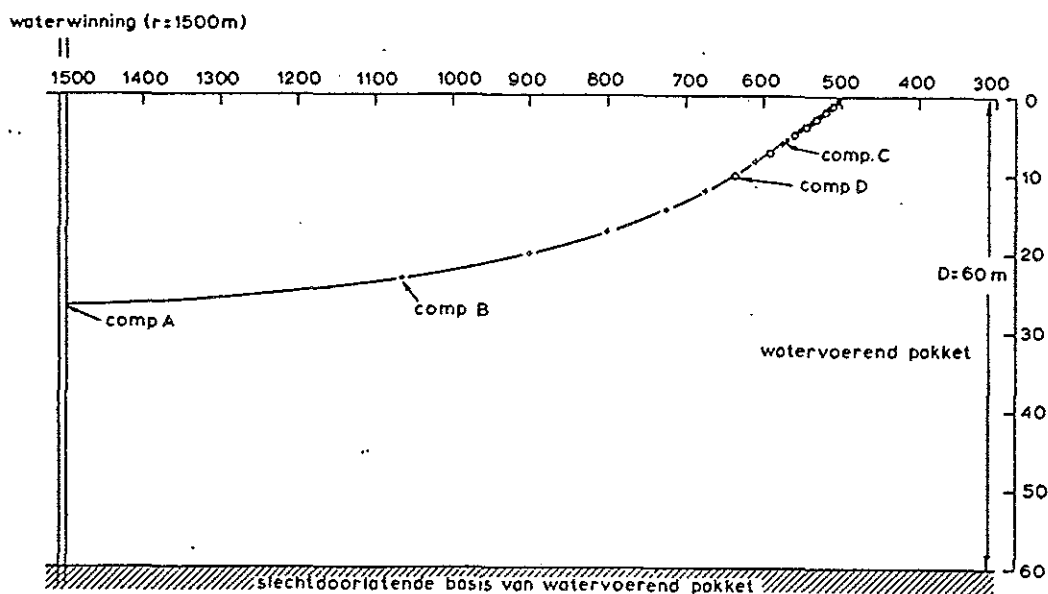


Fig. 5. Verontreiniging van grondwater met oliecomponenten (A, B, C en D) tengevolge van een ongeval in een waterwingebied na 50 jaar, berekend naar gegevens van Voorbeeld 2 (zie tekst en tabel 2). Met pijltjes is aangegeven hoever de verschillende componenten in 50 jaar zijn gekomen

- geologische opbouw van het bodemprofiel: dikte en poriënvolume van het afdekkendpakket, dikte en poriënvolume van het watervoerende pakket (ter bepaling van ϵ_{w1} , ϵ_{w2} , d_1 en D);
- hydrologische situatie: c-waarde van het afdekkend pakket, isohypsen van het ondiepe en diepe grondwater en met name voor het watervoerende pakket een isohypsenkaart van een vrij groot gebied (ter bepaling van N , x_s en eventueel r);
- interactieprocessen in de bodem: adsorptie van de diverse componenten en snelheid van afbraakprocessen in de bodem (ter bepaling van R_1 , R_2 , k_{r1} en k_{r2}).

Een eerste vergelijking van berekende gegevens met meetgegevens verkregen bij vuilstortplaatsen heeft aangetoond, dat er een redelijke overeenkomst bestaat tussen de berekening en de werkelijke situatie. In een enkel geval blijkt met name de indringingsdiepte van de verontreiniging in een watervoerend pakket groter te zijn dan op basis van de hier gevolgde berekening mocht worden verwacht.

Mogelijk is deze verticale indringing groter als gevolg van de hogere dichtheid van het perkolatiewater (dit werd eerder verondersteld door ZEILMAKER, 1976). Het soortelijk gewicht van het perkolatiewater, zoals dat door de Stichting Verwijdering Afvalstoffen (SVA) wordt opgevangen bij de vuilstortplaats Ambt-Delden bedraagt ca. 1,03.

Hoewel de in deze nota gegeven formules slechts gelden voor sterk vereenvoudigde situaties, lijken ze goed bruikbaar voor het geven van een eerste schatting omtrent de te verwachten verontreiniging. Met name bij het bestemmen van terreinen voor verwerking van vaste of vloeibare afvalstoffen kan de aldus verkregen informatie nuttig zijn.

7. LITERATUUR

- BOLT, G.H., 1976. Transport and accumulation of soluble soil components. In: Soil Chemistry A. Basic elements. Ed: G.H. Bolt and M.G.M. Bruggenwert, Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam, p. 126-140.
- ERNST, L.F., 1973. De bepaling van de transporttijd van het grondwater bij stroming in de verzadigde zone. Nota 755, ICW, Wageningen, 42 pp.
- ZEILMAKER, D.A., 1976. Persoonlijke mededeling.

GEBRUIKTE SYMBOLEN

D	dikte van het watervoerende pakket (m)
D_s	dispersiecoëfficiënt (incl. diffusiecoëfficiënt ($m^2 \cdot \text{jaar}^{-1}$))
C	concentratie van de opgeloste stof ($kg \cdot m^{-3}$)
C_o	concentratie van de opgeloste stof in het bij de vervuiliingsbron infiltrerende water ($kg \cdot m^{-3}$)
F	flux van de opgeloste stof ($kg \cdot m^{-2} \cdot \text{jaar}$)
N	neerslagoverschot (of gedeelte daarvan), dat infiltreert in het watervoerende pakket, eventueel via een afdekkend pakket ($m \cdot \text{jaar}^{-1}$)
R	distributiefactor, die aangeeft hoe de opgeloste stof over de geadsorbeerde fase en de bodemoplossing is verdeeld ($= q/\epsilon_w C$)
R_1	distributiefactor in het afdekkende pakket
R_2	distributiefactor in het watervoerende pakket
S	'sink term', geeft aan of er opgeloste stof verdwijnt in het bodemsysteem tengevolge van adsorptie, precipitatie of biochemische afbraak ($kg \cdot m^{-3} \cdot \text{jaar}^{-1}$)
d	indringingsdiepte van het front van de opgeloste stof (m)
d_1	dikte van het afdekkende pakket (m)
k	adsorptiecoëfficiënt ($m^3 \cdot m^{-3}$)
k_r	afbraaksnelheidscoëfficiënt (jaar^{-1})
k_{r1}	afbraaksnelheidscoëfficiënt in afdekkende pakket (jaar^{-1})
k_{r2}	afbraaksnelheidscoëfficiënt in watervoerende pakket (jaar^{-1})
q	geadsorbeerde hoeveelheid van de opgeloste stof ($q = kC$) ($kg \cdot m^{-3}$)
r	straal van het waterwingebied (d.i. het gebied waarvan het neerslagoverschot wordt afgevoerd naar de waterwinput (m))
t	tijd (jaren)
t_1	verblijftijd in het afdekkende pakket (jaren)
v	Darcy-stroomsnelheid van het water ($m \cdot \text{jaar}^{-1}$)
v^*	gemiddelde stroomsnelheid van het water in de poriën ($v^* = v/\epsilon_w$) ($m \cdot \text{jaar}^{-1}$)
v_i	snelheid waarmee het front van de opgeloste stof zich in de bodem verplaatst ($m \cdot \text{jaar}^{-1}$)

Vervolg bijlage 1

x	afstand in horizontale (benedenstroomse) richting ten opzichte van de vervuilingsbron (m)
x_s	afstand van vervuilingsbron tot waterscheiding (m)
ϵ_w	watergevuuld poriënvolume ($m^3 \cdot m^{-3}$)
ϵ_{w1}	watergevuuld poriënvolume in afdekkend pakket ($m^3 \cdot m^{-3}$)
ϵ_{w2}	watergevuuld poriënvolume in watervoerend pakket ($m^3 \cdot m^{-3}$)

HP-25 Program Form

PROGRAMMA 1
 Title GRONDWATERVERONTREINIGING IN AFDEKKEND PAKKET Page of
 Switch to PRGM mode, press \square PRGM, then key in the program.

DISP/RT	KEY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTERS
01							R ₀ - N
02	RCL0	N					
03	RCL3	R ₁	Nt				R ₁ - d
04							
05							
06							
07							
08							
09							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							



HP-25 Program Form

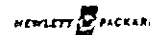
INSTRUCTIES BIJ PROGRAMMA 1
 Title GRONDWATERVERONTREINIGING IN AFDEKKEND PAKKET Page of
 Programmer

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/UNITS	KEYS				OUTPUT DATA/UNITS
1	Programma invoeren						
2	Vorbereiding		f	REG	f	PRGM	
3	Constanten invoeren	N	STO	0			
		d ₁	STO	1			
		E ₁	STO	2			
		R ₁	STO	3			
		9999	STO	7			
4	Bereken dat f ₁ is de uitkomst 9999	t	R/S				d of 9999
5	Bereken dan t ₁		R/S				t ₁
6	Herhaal stap 4 zo vaak als gewaant						
7	Go voor een berekening met nieuwe constanten terug naar stap 2						

HP-25 Program Form

PROGRAMMA 2
 Title GRONDWATERVERONTREINIGING IN WATERVOEREND PAKKET Page of
 Switch to PRGM mode, press \square PRGM, then key in the program. O. Linear

DISP/RT	KEY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTERS
01							R ₀ - N
02	RCL6	t				t ₁ x behoud uit programma 1	
03	RCL9	N	R ₁				R ₁ - d
04	RCL9	N	N(t)				
05							
06							
07							
08							
09							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							



HP-25 Program Form

INSTRUCTIES BIJ PROGRAMMA 2
 Title GRONDWATERVERONTREINIGING IN WATERVOEREND PAKKET Page of
 Programmer O. Linear

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/UNITS	KEYS				OUTPUT DATA/UNITS
1	Programma invoeren						
2	Vorbereiding		f	REG	f	PRGM	
3	Constanten invoeren	N	STO	0			
		d	STO	1			
		E ₁	STO	2			
		X ₁	STO	3			
		R ₁	STO	4			
		d ₁	STO	5			
		t ₁	STO	6			
4	Bereken x af f ₁ is de uitkomst	t	R/S				x
5	Als x <= t, dan is t te klein - t > t, kies en stap 4 herhalen		f	PRGM			
6	Als x > t, bereken dan d		R/S				d
7	Stappen 4 & 6 herhaal zo vaak als gewaant						
8	Go voor een berekening met nieuwe constanten terug naar stap 2						

Bijlage 2 vervolg

HP-25 Program Form

PROGRAMMA 3
 Title: GRONDWATERVERONTFAANING IN WATERDREND PAKKET Page 01
 Switch to PRGM mode, press \square \square then key in the program. b Radiaal - divergent

DISPLAY	KEY ENTRY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTERS
00							R ₀ N
01							
02	RCL 1	t	t			t is bekend uit programma 1	
03							
04	RCL 0	N	t-t				R ₁ D
05							
06	RCL 4	R ₁	N/(1-t)				
07							
08							
09							
10	RCL 1	t	t				
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							



HP-25 Program Form

PROGRAMMA 4B
 Title: GRONDWATERVERONTFAANING IN WATERDREND PAKKET Page 01
 Switch to PRGM mode, press \square \square then key in the program. c Radiaal - convergent (voorwaarde $t < 1$)

DISPLAY	KEY ENTRY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTERS
00							R ₀ N
01							
02	RCL 1	t	t				
03							
04	RCL 0	N	t-t				R ₁ D
05							
06	RCL 4	R ₁	N/(1-t)				
07							
08							
09							
10	RCL 1	t	t				
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							



$t_2 = -\frac{v_2(1-t_2)}{u} \ln\left[1 - \frac{v_2(1-t_2)}{u}\right] + t_1$ - dit is tijd benodigd voor transport over afstand $v_2 t_2$, dus is het meerkijpunt van de cirkel

HP-25 Program Form

INSTRUCTIONS BY PROGRAMMA 3
 Title: GRONDWATERVERONTFAANING IN WATERDREND PAKKET Page 01
 Programmer: b Radiaal - divergent

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/MTS	KEYS	OUTPUT DATA/MTS
1	Programma invoeren			
2	Voorbereiding		f REG f PRGM	
3	Constanten invoeren	N	STO 0	
		D	STO 1	
		E ₁	STO 2	
		X ₀	STO 3	
		R ₁	STO 4	
		d ₁	STO 5	
		t ₁	STO 6	
4	Bereken x als functie van t	t	R/S	X
5	Als x < 0, dan is t te klein: t > t ₁ kiezen en stap 4 herhalen		f PRGM	
6	Als x > 0, bereken dan d		R/S	d
7	Stappen 4 & 6 herhalen zo vaak als gewenst			
8	Ga voor een berekening met nieuwe constanten terug naar stap 2			

HP-25 Program Form

INSTRUCTIONS BY PROGRAMMA 4B
 Title: GRONDWATERVERONTFAANING IN WATERDREND PAKKET Page 01
 Programmer: b Radiaal - convergent

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/MTS	KEYS	OUTPUT DATA/MTS
1	Programma invoeren			
2	Voorbereiding		f REG f PRGM	
3	Constanten invoeren	N	STO 0	
		D	STO 1	
		E ₁	STO 2	
		X ₀	STO 3	
		R ₁	STO 4	
		t	STO 5	
		t ₁	STO 6	
4	Bereken x als functie van t	t	R/S	X of "error"
5	Als x < 0, dan is t te klein: t > t ₁ kiezen en stap 4 herhalen			
6	Als "error" verschijnt dan is t > t ₂ dus is uitgangspunt te breed. Herhaal stap 4 met kleinere t		f PRGM	
7	Herhaal stap 4 zo vaak als gewenst			
8	Ga voor een berekening met nieuwe constanten terug naar stap 2			

N.B. De berekening van de indringingsdiepte d van de stroombeem wordt in dit geval uitgevoerd met programma 4b.

Vervolg Bijlage 2

PROGRAMMA 4b HP-25 Program Form

Titel: GRONDWATERVERONTREINIGING IN WATERDEKEND PAKKET Page 01 of 01
 Titulo: GRONDWATERVERONTREINIGING IN WATERDEKEND PAKKET Page 01 of 01
 Programmer: C. Radual - convergent berekening van d

DISPLAY LINE	CODE	KEY ENTRY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTER
00			X					R0 - r
01		ENTER	X	X				
02		ENTER	X	X	X			
03		RCL 0	r	X	X			R1 - Xs
04		RCL 1	Xs	r	X	X		
05		-	r-A1	X	X	X		
06		2	2	r-Xs	X	X		R2 - D
07		*	2(r-A1)	X	X	X		
08		-	A	X	X	X		
09		*	Ax	X	X	X		R3 - d1
10		X > Y	X	Ax	X	X		
11		RCL 1	Xs	X	Ax	X		
12		+	XsXs	Ax	X	X		
13		+	D	X	X	X		
14		ELASCA	XsA	B	X	X		
15		RCL 0	r	A+s	B	X		
16		2	2	r	XsXs	B		
17		*	rA	A+s	B	B		
18		-	(r-A1)	B	B	B		
19		+	C	B	B	B		R4 - (C + B/(A+s) - 2D)
20		RCL 2	D	C	B	A		
21		*	CD	B	B	A		
22		RCL 3	d	CD	B	B		
23		+	d	B	B	A		



PROGRAMMA 5 HP-25 Program Form

Titel: CONCENTRATIE VAN AFBREKBAAR COMPONENTEN IN GRONDWATER Page 01 of 01
 Titulo: CONCENTRATIE VAN AFBREKBAAR COMPONENTEN IN GRONDWATER Page 01 of 01
 Programmer: C. Radual - convergent berekening van d

DISPLAY LINE	CODE	KEY ENTRY	X	Y	Z	T	COMMENTS	REGISTER
00			t					R0 - t1
01		RCL 0	t	t				
02		X > Y	t	t				
03		STO 14	t	t				R1 - kps
04		*	t	t		t		
05		RCL 1	kps	t				
06		*	kps	t				R2 - kps
07		RCL 3	A1	kps	t			
08		+	t	R1	kps	t		
09		+	1+A1	kps	kps	t		
10		+	A					R3 - R1
11		CHS	-A					
12		g < e	e-A					
13		STO 00	e-A					R4 - R2
14		RCL 1	kps	t				
15		*	kps	t				
16		RCL 3	A1	kps	t			
17		+	t	R1	kps	t		
18		+	1+A1	kps	t			
19		+	A	t	t			R5 - kps t / (1+A1)
20		X > Y	t	t	t			
21		RCL 0	t	t	t			
22		-	t-t	A1	t			
23		RCL 2	kps	t	A1	t		
24		*	kps(t-t)	A1	t			
25		RCL 4	R1	kps(t-t)	A1	t		
26		+	t	R1	kps(t-t)	A1		
27		+	1+A1	kps(t-t)	A1	A1		
28		+	D	A1	A1	A1		R6 - kps(t-t) / (1+A1)
29		+	D+A1	A1	A1	A1		
30		CHS	-(D+A1)	A1	A1	A1		
31		g < e	e-(D+A1)	A1	A1	A1		R7 - e-(D+A1) / (1+A1) - 2D



HP-25 Program Form

INSTRUCTIES BIJ PROGRAMMA 4b
 Titulo: GRONDWATERVERONTREINIGING IN WATERDEKEND PAKKET Page 01 of 01
 Programmer: C. Radual - convergent

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/UNITS	KEYS				OUTPUT DATA/UNITS
1	Programma invoeren		f	REG	f	PRGM	
2	Vorbereiding		STO	0			
3	Constanten invoeren	r	STO	1			
		Xs	STO	2			
		D	STO	3			
		d1	STO	3			
4	Bereken d als functie van x	x	R/S				d
5	Herhaal stap 4 zo vaak als gewenst						
6	Ge voor een berekening met nieuwe constanten terug naar stap 2						

HP-25 Program Form

INSTRUCTIES BIJ PROGRAMMA 5
 Titulo: CONCENTRATIE VAN AFBREKBAAR COMPONENTEN IN GRONDWATER Page 01 of 01
 Programmer: C. Radual - convergent berekening van d

STEP	INSTRUCTIONS	INPUT DATA/UNITS	KEYS				OUTPUT DATA/UNITS
1	Programma invoeren		f	REG	f	PRGM	
2	Vorbereiding		STO	0			
3	Constanten invoeren	t1	STO	1			
		kps	STO	2			
		R1	STO	3			
		R2	STO	4			
4	Bereken C/0 als functie van t	t	R/S				C/0
5	Herhaal stap 4 zo vaak als gewenst						
6	Ge voor een berekening met nieuwe constanten naar stap 2						