

NN31545.0878 A 878

I
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

EXPERIMENTELE TOETSING VAN EEN MODEL VOOR BEREKENING VAN
DE CHLORIDE UITSCOELING VAN KASGRONDEN

dr. Ph. Hamaker

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemidde-
len, 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 onderzoek nog
niet is afgesloten.

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



JSN 173 096 01

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. MODEL VOOR BEREKENING VAN ZOUTUITSPOELING	1
3. BESCHRIJVING VAN DE UITSPOELINGSEXPERIMENTEN	3
4. VERGELIJKING VAN BEREKENDE EN GEMETEN CHLORIDE UITSPOELING	6
5. DISCUSSIE	11
6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	17
LITERATUUR	18

1. INLEIDING

De berekening van onder glas geteelde gewassen met oppervlakte- of leidingwater leidt tot een ophoping van zouten in het bodemprofiel. Daardoor worden de groeiomstandigheden ongunstig beïnvloed en is periodieke zoutuitspoeling noodzakelijk.

In deze nota worden vergelijkingen afgeleid waarmee de uitspoeling van niet bij fysisch-chemische evenwichten of microbiologische processen betrokken ionen kan worden berekend. De vergelijkingen worden vervolgens getoetst aan de hand van experimentele gegevens welke tijdens uitspoeling van kasgronden werden verzameld. Tenslotte wordt de relatie tussen de vergelijkingen en andere berekeningsmethoden, welke aan de literatuur zijn ontleend, verduidelijkt.

2. MODEL VOOR BEREKENING VAN ZOUTUITSPOELING

De afleiding van vergelijkingen voor berekening van zoutuitspoeling uit het bodemprofiel berust op een model dat eerder door GOUDRIAAN (1973) werd toegepast bij andere randvoorwaarden. Het model is van toepassing op de uitspoeling van ionen welke uitsluitend in de vloeibare bodemfase voorkomen en niet bij fysisch-chemische evenwichten en microbiologische processen betrokken zijn. Verder wordt aangenomen dat tijdens uitspoeling één-dimensionale stationaire stroming van bodemvocht in verticale richting plaatsvindt.

Het bodemprofiel wordt onderverdeeld in een aantal homogene lagen van gelijke dikte. Door de beide grensvlakken van elke laag

vindt transport van ionen plaats met de massastroming van het bodemvocht. Aangenomen wordt dat in elke laag steeds volledige menging plaatsvindt van het door het grensvlak aan de bovenzijde aangevoerde bodemvocht met het in de laag aanwezige bodemvocht. De ionen-balans voor de n-de laag kan dan als volgt geschreven worden:

$$L\theta_n \frac{dc_n(t)}{dt} = \left\{ V_D c_{n-1}(t) - V_D c_n(t) \right\} dt \quad (1)$$

- L = de laagdikte (cm)
- θ_n = het volumetrisch vochtgehalte
- V_D = de Darcy stroomsnelheid (cm/dag)
- c_n en c_{n-1} = de concentraties in het bodemvocht van het betreffende ion in resp. de n-de en (n-1)-ste profiellaag (me/cm³)
- t = de tijd (dagen)

Vergelijking (1) is ook van toepassing op de bovenste profiellaag met n=0, mits c_{n-1} vervangen wordt door de constant veronderstelde concentratie, c_g , van het water waarmee wordt uitgespoeld.

Vergelijking (1) wordt, met $1/L\theta_n = A_n$, geschreven als:

$$\frac{d}{dt} \left\{ c_n(t) \right\} + A_n V_D c_n(t) = A_n V_D c_{n-1}(t)$$

Deze differentiaal vergelijking kan worden opgelost mits de randvoorwaarde bekend is. Met $c_n(t) = c_n(t_0)$ voor $t = 0$ wordt de oplossing:

$$c_n(t) = \exp(-A_n V_D t) \left\{ c_n(t_0) + \int_0^t A_n V_D \cdot \exp(A_n V_D t) \cdot c_{n-1}(t) dt \right\} \quad (2)$$

Om $c_n(t)$ te kunnen berekenen dient de integraal in vergelijking (2) uitgewerkt te worden en daartoe dient $c_{n-1}(t)$ bekend te zijn. Dit houdt in dat $c_n(t)$ achtereenvolgens berekend kan worden voor $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, waarbij $c_{n-1} = c_g$ voor $n = 0$.

Indien A_0, A_1, A_2, \dots niet aan elkaar gelijk zijn wordt de uitwerking van vergelijking (2) ingewikkelder naarmate n toeneemt.

Indien echter $A_0 = A_1 = A_2 = \dots = A$ leidt uitwerking tot:

$$c_n(t) = c_g + \sum_{k=0}^n \left[\left\{ c_k(t_0) - c_g \right\} \left\{ AV_D t \right\}^{n-k} \cdot \exp \left\{ - AV_D t \right\} \left\{ 1/(n-k)! \right\} \right] \quad (3)$$

De uitspoeling van ionen als functie van de door het profiel gepercoleerde hoeveelheid water kan met behulp van vergelijking (2) of (3) berekend worden mits de initiële distributie en de concentratie in het voor uitspoeling gebruikte water bekend zijn.

3. BESCHRIJVING VAN DE UITSPOELINGSEXPERIMENTEN

De vergelijkingen (2) en (3) werden getoetst aan de hand van experimentele gegevens betreffende de uitspoeling van chloride uit kasgronden. Deze experimenten zijn in detail beschreven door HAMAKER (1975) en SONNEVELD en VAN BEUSEKOM (1974).

De experimenten van Hamaker vonden plaats in drie lysimeters met een profiel bestaande uit een bovengrond van humeus slibhoudend zand en een ondergrond van humusarm slibhoudend zand tot een diepte van 100 cm. In een eerste experiment vond uitspoeling plaats door met regelmatige tussenpozen leidingwater op het lysimeteroppervlak te brengen tot een totale hoeveelheid van 60 cm. Vóór de aanvang van uitspoeling werd het profiel bemonsterd en uit de analyseresultaten werd de initiële chloride distributie afgeleid. Het gemiddelde vochtgehalte tijdens uitspoeling werd geschat. Gedurende de uitspoeling werd het drainwater regelmatig bemonsterd.

In een tweede experiment werden de drie lysimeters uitgespoeld met water met verschillende chloride-concentraties. Dit experiment is niet elders in detail beschreven maar werd overeenkomstig het bovenstaande uitgevoerd. De totale uitspoeling was in dit geval 40 cm.

De chloride distributie bij aanvang van uitspoeling en het gemiddelde vochtgehalte van het profiel tijdens uitspoeling, alsmede de chloride concentratie van het water waarmee uitspoeling plaatsvond zijn voor beide experimenten opgenomen in tabel 1.

Tabel 1. Chloride concentratie, $c(t_0)$, van het bodemvocht bij
aanvang van uitspoeling en van het water waarmee uitspoeling
plaatsvond, beide uitgedrukt in milliequivalenten
per liter, en het gemiddelde volumetrische vochtgehalte,
 $\bar{\theta}$, tijdens uitspoeling

Experimenten 1972							
Lysimeter							
profiellaag	I		II		III		$L\theta = A^{-1}$ (cm)
	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	
0 - 25 cm	17.6	.35	24.5	.35	37.8	.35	8.75* 4.37**
25 - 50 cm	18.4	.36	27.6	.36	39.2	.36	9.00 4.50
50 - 75 cm	18.0	.30	38.0	.30	47.0	.30	7.50 3.75
75 -100 cm	15.0	.34	32.0	.34	35.0	.34	8.50 4.25
Chloride conc. spoelw.	6.0		6.0		6.0		

Experimenten 1970							
	I		II		III		
	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	
0 - 25 cm	11.2	.43	16.4	.43	30.7	.43	10.75 5.37
25 - 50 cm	15.0	.39	23.5	.39	34.5	.39	9.75 4.87
50 - 75 cm	20.1	.34	24.0	.34	19.4	.34	8.50 4.25
75 -100 cm	15.0	.35	10.0	.35	10.0	.35	8.75 4.37
Chloride conc. spoelw.	6.0		11.0		15.0		

*voor L = 25 cm
**voor L = 12,5 cm

Ook tijdens uitspoeling werd het bodemvocht op verschillende diepten in het profiel bemonsterd. De gebruikte bemonsteringstechniek leidde echter tot onttrekking van monsters met een chloridegehalte dat afweek van de gemiddelde chloride-concentratie van het bodemvocht (HAMAKER, 1975). Deze experimentele gegevens lenen zich daarom niet voor vergelijking met de berekende uitspoeling. Daarom werden bij deze experimenten alleen het berekende en experimenteel bepaalde verloop van de chloride-concentratie van het drainwater met elkaar vergeleken.

Het experiment van SONNEVELD en VAN BEUSEKOM had betrekking op uitspoeling van een lichte zavelgrond in een kas waarin een factorenproef had plaatsgevonden om de zoutgevoeligheid van tuinbouwgewassen na te gaan. De zoutuitspoeling werd gemeten in drie proefvakken door periodieke bemonstering van de profiellagen 0-15 cm, 15-30 cm, en 30-45 cm. Binnen de drie proefvakken werden de tijdens de voorafgaande teelt beregende strook en het niet beregende looppad afzonderlijk bemonsterd. Gedurende uitspoeling werd het gehele grondoppervlak beregend met leidingwater tot een totale hoeveelheid van 75 cm.

De kas is voorzien van drains op een diepte van 75 cm beneden maaiveld bij een drainafstand van 6.4 m. Het drainwater van het gehele kasgedeelte werd tijdens uitspoeling regelmatig bemonsterd. Aan de hand van de initiële chloride-distributie in de stroken en paden van de afzonderlijke proefvakken werd de gemiddelde initiële distributie van chloride voor het gehele kasgedeelte bij benadering berekend. Zodoende konden naast de experimenteel bepaalde en berekende uitspoeling voor de drie stroken en paden ook het gemeten en berekende verloop van de chloride-concentratie van het drainwater met elkaar worden vergeleken.

Tabel 2 tenslotte geeft een overzicht van de initiële chloride distributie en het gemiddelde vochtgehalte tijdens uitspoeling. Het blijkt dat de toegepaste strookberekening heeft geleid tot een relatief sterke verzouting van de looppaden.

Tabel 2. Chloride concentratie, $c(t_0)$, van het bodemvocht bij aanvang van uitspoeling, en van het leidingwater waarmee uitspoeling plaatsvond, uitgedrukt in milliequivalenten per liter; $\bar{\theta}$ is het gemiddelde volumetrische vochtgehalte tijdens uitspoeling

Proefvak									
	2200		0200		2000		gehele kas		
	$c(t_0)$		$c(t_0)$		$c(t_0)$		$c(t_0)$	$\bar{\theta}$	$L\theta=A^{-1}$
profiellaag	pad	strook	pad	strook	pad	strook	(cm)		
0 - 15 cm	128.0	58.0	102.0	62.0	114.0	47.0	67.0	.30	4.5
15 - 30 cm	124.0	58.0	96.0	53.0	97.0	44.0	60.0	.30	4.5
30 - 45 cm	61.0	64.0	41.0	53.0	30.5	36.0	43.5	.30	4.5
45 - 60 cm	-	-	-	-	-	-	36.0	.30	4.5
60 - 75 cm	-	-	-	-	-	-	28.5	.30	4.5
Leidingwater	5.0		5.0		5.0		5.0		

4. VERGELIJKING VAN BEREKENDE EN GEMETEN CHLORIDE UITSPOELING

In figuur 1 is het gemeten en berekende verloop van de chlorideconcentratie in het drainwater van de lysimeters uitgezet tegen de cumulatieve hoeveelheid drainwater. De berekeningen werden uitgevoerd volgens vergelijking (2) voor twee verschillende laagdikten en met behulp van de gegevens in tabel 1. Bij de berekeningen met $L = 12.5$ cm werd aangenomen dat $c_0(t_0) = c_1(t_0)$ en $A_0 = A_1$, $c_2(t_0) = c_3(t_0)$ en $A_2 = A_3$, enz.

Het berekende verloop heeft eigenlijk geen betrekking op het drainwater dat het grensvlak op 100 cm beneden maaiveld passeert, maar op de gemiddelde concentratie in de onderste profiellaag, dit wil zeggen op 87.5 cm en 93.75 cm beneden maaiveld voor de berekeningen met respectievelijk $L = 25$ cm en $L = 12.5$ cm.

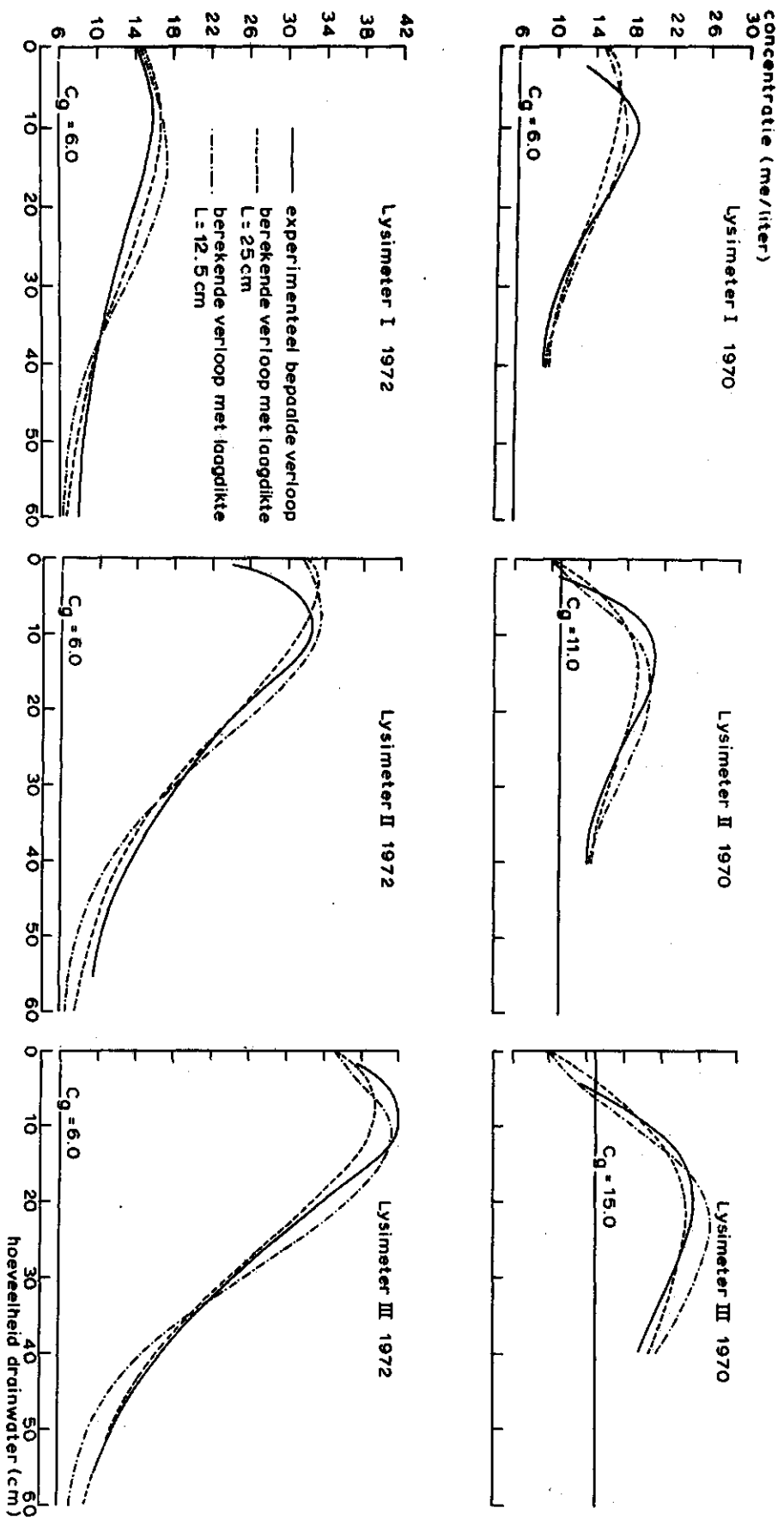


Fig. 1. Het verloop van de chloride concentratie van het drainwater tijdens uitspoeling van de lysimeters in de experimenten van HAMAKER (1975)

De invloed van de laagdikte op de resultaten van de berekende chloride-uitspoeling komt in fig. 1 duidelijk tot uiting. Het rekenen met eindige laagdikten waarin volledige menging wordt verondersteld leidt tot een kunstmatig dispersie effect, bekend als pseudo-dispersie (GOUDRIAAN, 1973). De pseudo-dispersie neemt toe met toenemende laagdikte. Hierop wordt in de discussie nader teruggekomen.

Fig. 1 laat verder zien dat de overeenkomst tussen het gemeten en berekende verloop van de chloride-concentratie van het drainwater redelijk goed is. Hieruit wordt geconcludeerd dat vergelijking (2) een aanvaardbare beschrijving geeft van het uitspoelingsproces in dit experiment.

De resultaten van de berekeningen en de experimentele gegevens van de uitspoeling van de kasgrond in de onderzoeken van SONNEVELD en VAN BEUSEKOM (1974) zijn weergegeven in fig. 2. De curves hebben betrekking op de berekende uitspoeling voor de profiellagen 0-15 cm, 15-30 cm, en 30-45 cm beneden maaiveld. De berekeningen werden in dit geval uitgevoerd volgens vergelijking (3) met $L = 15$ cm, $\bar{\theta} = .30$ en de gegevens uit tabel 2. De open en gesloten cirkels alsmede de kruisjes in de figuur geven de experimenteel bepaalde chloride-concentraties van het bodemvocht aan.

In vier van de zes beschouwde gevallen zijn de berekende en gemeten concentraties redelijk met elkaar in overeenstemming. In de overige twee gevallen (de stroken van de proefvakken 0200 en 2000) blijft de experimenteel bepaalde uitspoeling ten achter op de berekende uitspoeling. Waarschijnlijk was in deze gevallen de door het profiel gepercoleerde hoeveelheid water kleiner dan op grond van de beregende hoeveelheden werd aangenomen. Dit hangt samen met de natuurlijke helling van het maaiveld in de betreffende kas, waardoor tijdens uitspoeling oppervlakkige afstroming van water heeft plaatsgevonden in het kasgedeelte van de proefvakken 0200 en 2000 (persoonlijke mededeling van SONNEVELD).

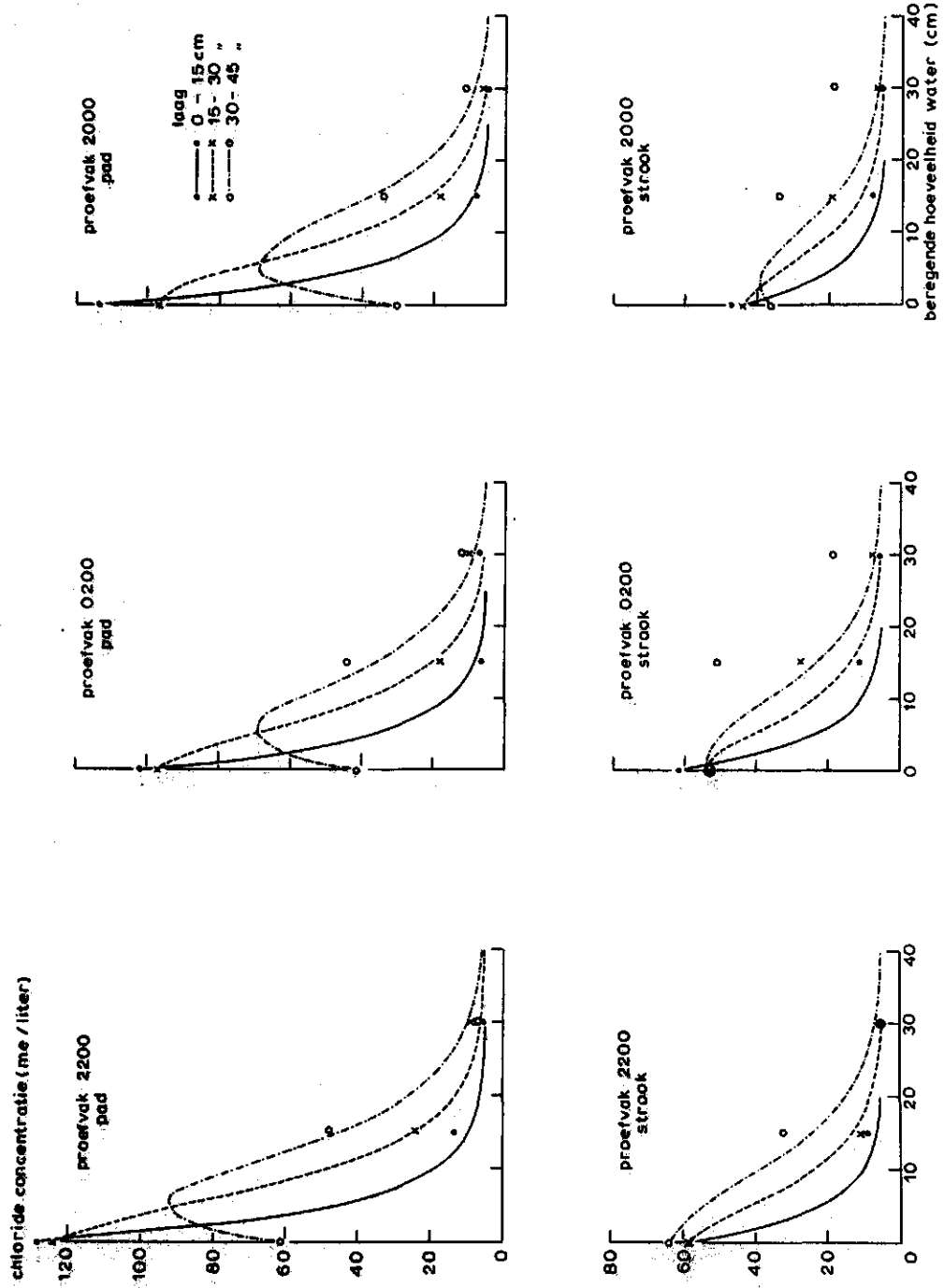


Fig. 2. Het berekende verloop (curves) en de experimenteel bepaalde chloride-concentraties (punten) van de bodemplossing tijdens uitspoeling van een kasgrond in de experimenten van SONNEVELD en VAN BEUSEKOM (1974)

Het verloop van de chloride-concentratie van het drainwater is weergegeven in fig. 3. Het berekende verloop is gebaseerd op de gegevens in tabel 2 voor de gehele kas en betreft de chloride-concentratie van het water dat via verticale stroming door het profiel het grensvlak op 75 cm beneden maaiveld (draaindiepte) passeert. Het gemeten verloop heeft daarentegen betrekking op het water dat via de drainreeksen werd opgevangen. Het verschil tussen het berekende en gemeten verloop in fig. 3 wekt dan ook geen verwondering aangezien bij de berekeningen geen rekening is gehouden met de extra weglengte bij stroming in de verzadigde zone naar de drains.

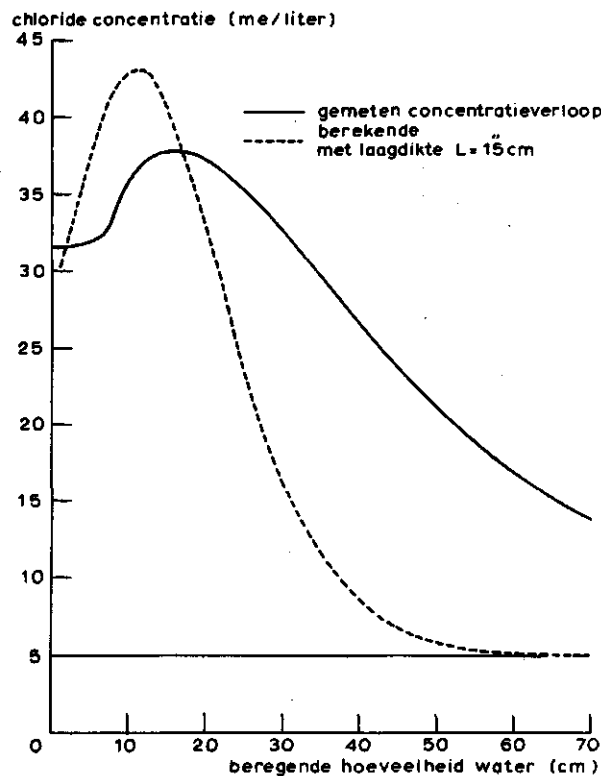


Fig. 3. De chloride-concentratie van het drainwater van de kasgrond als functie van de beregende hoeveelheid water in het uitspoelingsexperiment van SONNEVELD en VAN BEUSEKOM (1974)

Uit fig. 3 valt op te maken dat de cumulatieve chloride uitspoeling veel groter is dan de oorspronkelijk in het profiel over een diepte van 75 cm aanwezige hoeveelheid. Dit wijst erop dat een aanzienlijk deel van het via de drains afgevoerde chloride niet uit het bodemprofiel maar uit het grondwater tussen en onder de drains afkomstig is. Aangezien de kassen van het Proefstation in een wegzijgingsgebied gelegen zijn mag aangenomen worden dat het in het ondiepe grondwater aanwezige chloride samenhangt met de ter plaatse uitgeoefende glastuinbouw en niet met zoute kwel vanuit het diepe grondwater.

5. DISCUSSIE

In de discussie wordt nader ingegaan op de relatie tussen de vergelijkingen (2) en (3) en andere berekeningsmethoden uit de literatuur. Talrijke onderzoekers hebben zich beziggehouden met zowel de theoretische als praktische aspecten van zoutverplaatsing in poreuze media. Aan de hand van laboratorium-experimenten met grondkolommen werd door NIELSEN en BIGGAR (1962) aangetoond dat het transport van ionen onder invloed van massastroming en diffusie kan worden beschreven door de differentiaalvergelijking

$$\partial c / \partial t = -v^* \partial c / \partial x + D \partial^2 c / \partial x^2 \quad (4)$$

- $v^* = V_D / \theta$ is de gemiddelde stroomsnelheid in de poriën (cm/dag)
- D = de schijnbare diffusie coëfficiënt (cm²/dag)
- c = de concentratie van het betreffende ion in de bodemoplossing (me/cm³)
- x = de afstand (cm)
- t = de tijd (dagen)

De schijnbare diffusiecoëfficiënt wordt door FRISSEL et al. (1970) geschreven als de som van de diffusiecoëfficiënt, D_{diff} , en de hydrodynamische dispersiecoëfficiënt, D_{disp} , volgens

$$D = D_{diff} + D_{disp} = \theta \lambda D_0 + v^* d \quad (5)$$

- λ = een dimensieloze labyrintfactor
- D_0 = de zelfdiffusiecoëfficiënt van het betreffende ion in water (cm^2/dag)
- d = de zogenaamde dispersielengte (cm)

Volgens vergelijking (5) is $D_{\text{disp.}}$ evenredig met V^* omdat d evenals λ bij gegeven θ als constanten worden beschouwd, welke karakteristiek voor het betreffende poreuze medium zouden zijn.

Vergelijking (4) is van toepassing op ééndimensionaal transport en bevat geen produktieterm. De vergelijking is derhalve slechts van toepassing op de verplaatsing van ionen welke niet bij fysisch-chemische evenwichten en microbiologische processen betrokken zijn. In de literatuur vindt men oplossingen van vergelijking (4) voor de volgende randvoorwaarden:

$$\begin{aligned} c &= c_i, & x > 0, & t = 0 \\ c &= c_g, & x = 0, & t > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

en

$$\begin{aligned} c &= c_i, & x > 0, & t = 0 \\ V^* c_g &= V^* c - D \frac{dc}{dx}, & x = 0, & t > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

De randvoorwaarde (6) en (7) zijn beide van toepassing op stationaire uitspoeling van het half-oneindig homogeen profiel met een uniforme initiële ionen distributie; c_g is de concentratie van het ion in het water waarmee wordt uitgespoeld. Bij randvoorwaarde (6) treedt transport van ionen in opwaartse richting door het grensvlak $x = 0$ (maaiveld) op. Randvoorwaarde (7) sluit dit uit. Uitspoeling van kasgronden vindt plaats door periodieke beregening zonder dat het grondoppervlak daadwerkelijk wordt geïnnundeerd. Daarbij kan dus geen transport van ionen in opwaartse richting door het grensvlak $x = 0$ plaatsvinden, zodat randvoorwaarde (7) van toepassing is. De oplossing van vergelijking (4) is dan volgens BRENNER (1962):

$$\frac{c(x,t) - c_g}{c_i - c_g} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{v^* t - x}{2\sqrt{D}t} \right) - \sqrt{\frac{v^{*2}}{\pi D}} \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{v^* t - x}{2\sqrt{D}t} \right)^2 \right\} +$$

$$+ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v^* x}{D} + \frac{v^{*2} t}{D} \right) \cdot \exp \left(\frac{v^* x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{v^* t + x}{2\sqrt{D}t} \right) \quad (8)$$

Oplossing (8) heeft weinig praktische betekenis voor de berekening van uitspoeling van kasgronden omdat met name aan de voorwaarde van een uniforme initiële distributie niet wordt voldaan. Bij een niet-uniforme initiële distributie zal men zijn toevlucht moeten nemen tot numerieke oplossing van vergelijking (4) of tot andere methoden van berekening, bijvoorbeeld volgens het eerder besproken model waaruit vergelijking (2) werd afgeleid.

In dit verband is het interessant de relatie tussen vergelijking (2) en oplossing (8) nader te bekijken. Voor een uniforme initiële ionen-distributie in een homogeen profiel gaat vergelijking (2) via vergelijking (3) met $c_k(t_0) = c_i$ over in

$$\frac{c_n(t) - c_g}{c_i - c_g} = \sum_{k=0}^n (AV_D t)^k \cdot \exp(-AV_D t) \frac{1}{k!} \quad (9)$$

De rechterzijde van vergelijking (9) is gelijk aan de cumulatieve som van de Poisson-distributie met verwachtingswaarde $AV_D t$ en standaardafwijking $\sqrt{AV_D t}$. De cumulatieve som is bij benadering gelijk aan de integraal van de normale distributie met dezelfde verwachtingswaarde en standaardafwijking mits $AV_D t$ voldoende groot is. Indien de integraal van de normale distributie in de vorm van een 'error'-functie geschreven wordt leidt dit, met $AV_D t = a$, tot

$$\sum_{k=0}^n \left\{ a^k \cdot \exp(-a) \frac{1}{k!} \right\} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(n+\frac{1}{2})/\sqrt{a}} \exp(-\zeta^2/2) d\zeta =$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{n+\frac{1}{2}}{\sqrt{2a}} \right) \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{a-n-\frac{1}{2}}{\sqrt{2a}} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{v_D t / 0 - (n+\frac{1}{2})L}{\sqrt{2v_D} t L/0} \right\} = \frac{c_n - c_g}{c_i - c_g}$$

Indien de beperking tot integere n-waarden vervalt resulteert uiteindelijk

$$\frac{c(x,t) - c_g}{c_i - c_g} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{V^* t - x}{\sqrt{2V^* t L}} \quad (10)$$

De relatie tussen vergelijking (9) en oplossing (8) wordt nu duidelijk. Vergelijking (10) volgt rechtstreeks uit vergelijking (9) voor voldoende grote waarden van $AV_D t$, en komt overeen met de eerste term van oplossing (8) mits aan de voorwaarde

$$D = V^* L / 2 \quad (11)$$

wordt voldaan.

Resultaten van enige berekeningen van uitspoeling van een homogeen profiel met een uniforme initiële distributie zijn weergegeven in fig. 4. De distributie werd berekend volgens vergelijking (9) en oplossing (8) voor een uitspoeling van 5 cm en 20 cm water, met $c_g = 0$ en $\theta = .5$. De schijnbare diffusiecoëfficiënt, D , en de laagdikte, L , werden zodanig gekozen dat aan relatie (11) wordt voldaan. De berekeningen volgens vergelijking (9) werden uitgevoerd met behulp van tabellen voor de cumulatieve som van de Poisson-distributie.

De erfc-functietermen in oplossing (8) werden numeriek berekend (zie bijlage).

Uit fig. 4 blijkt dat vergelijking (9) en oplossing (8) tot praktisch hetzelfde resultaat leiden. Dit houdt in dat de som van de tweede en derde term van oplossing (8) klein is ten opzichte van de eerste term en verwaarloosd mag worden bij berekening van uitspoeling van kasgronden onder praktijkomstandigheden, zeker voor grote $V_D t$ -waarden, dit wil zeggen naarmate uitspoeling voortgang vindt.

Het bovenstaande leidt tot de conclusie dat de vergelijkingen (2) en (3) aanvaard kunnen worden als uitgangspunt voor berekening van de chloride-uitspoeling onder praktijkomstandigheden bij een niet-uniforme initiële distributie in het profiel.

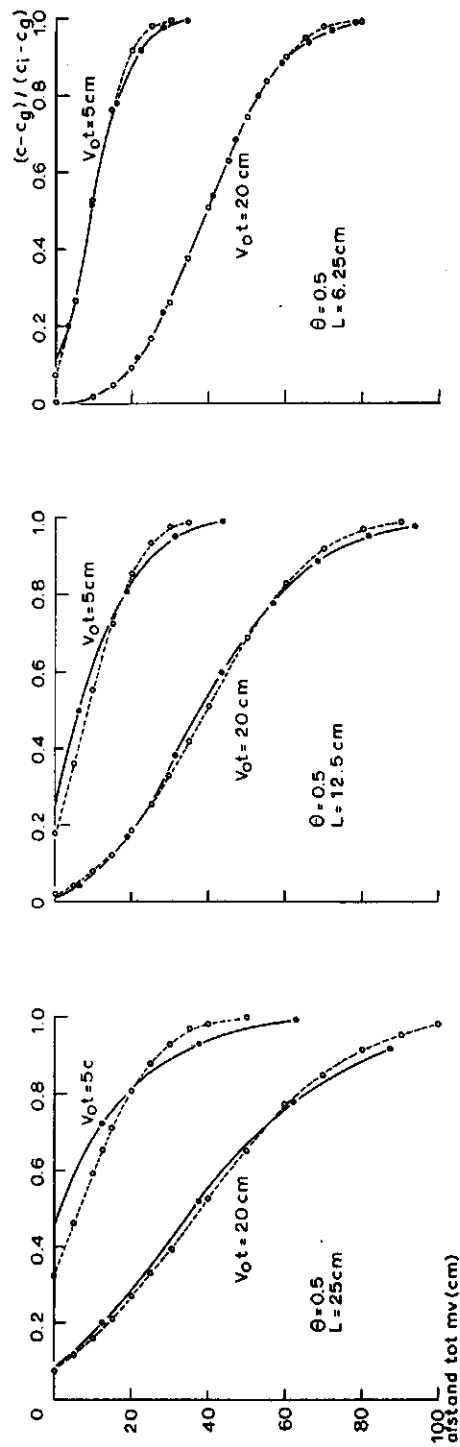


Fig. 4. De chloride distributie in het profiel tijdens uitspoeling, berekend volgens vergelijking (9) () en volgens oplossing (8) ()

Volgens de vergelijkingen (2), (3) en (9) wordt de ionen-distributie tijdens uitspoeling bij gegeven θ , L , en initiële distributie uitsluitend bepaald door de hoeveelheid water, $V_D t$, welke door het profiel gepercoleerd is, onafhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid V^* in de poriën. Dit geldt eveneens voor berekeningen volgens vergelijking (8) indien de schijnbare diffusiecoëfficiënt uit vergelijking (5) gelijk is aan

$$D = D_{\text{disp.}} = V^* d$$

Dit zou inhouden dat de grootte van de schijnbare diffusiecoëfficiënt uitsluitend bepaald wordt door hydrodynamische dispersie. De relatieve grootte van de effecten van hydrodynamische dispersie en moleculaire diffusie vormen een punt van uitgebreide discussie in de literatuur waarop hier niet nader wordt ingegaan.

In het algemeen wordt gesteld dat bij gegeven vochtgehalte θ de rol van moleculaire diffusie relatief kleiner wordt naarmate V^* toeneemt.

De berekeningen van de chloride uitspoeling van de lysimeters werden uitgevoerd volgens vergelijking (2) met L -waarden van 12.5 en 25 cm. De berekende uitspoeling van de kasgrond was gebaseerd op vergelijking (3) met $L = 15$ cm. In de discussie is gebleken dat de gekozen laagdikte van invloed is op de grootte van het pseudo-dispersie effect. De laagdikte zou dus zodanig gekozen moeten worden dat het effect van de pseudo-dispersie even groot wordt als het effect van de werkelijke hydrodynamische dispersie. Echter, de grootte van de hydrodynamische dispersiecoëfficiënt was noch voor het lysimeterprofiel noch voor de kasgrond bekend. Daarom werd de keuze van laagdikte voor beide gevallen bepaald door praktische overwegingen, namelijk door de dikte van de lagen welke vóór en tijdens de uitspoeling werden bemonsterd.

6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In deze nota worden experimentele gegevens betreffende de uitspoeling van chloride ionen uit een lichte zavelgrond vergeleken met de volgens een model berekende uitspoeling. Het model berust op de beschouwing van de ionenbalans van denkbeeldige profiel-lagen en leidt tot vergelijkingen waarmee het uitspoelingsproces uit een niet-homogeen profiel bij een niet-uniforme initiële distributie van ionen kan worden berekend. De berekende en gemeten uitspoeling blijken in het algemeen redelijk goed overeen te komen.

In het model wordt gerekend met een eindige laagdikte waarin volledige menging wordt verondersteld. Hierdoor wordt een pseudo-dispersie effect geïntroduceerd. De afgeleide vergelijkingen worden vergeleken met een oplossing van de algemeen aanvaarde partiële differentiaalvergelijking voor transport van ionen in poreuze media onder invloed van massastroming en diffusie. In deze oplossing komt een dispersie-coëfficiënt voor. Het blijkt dat de grootte van de effecten van genoemde pseudo-dispersie en van hydrodynamische dispersie in de oplossing van de differentiaalvergelijking aan elkaar gelijk gemaakt kunnen worden door aanpassing van de laagdikte in de berekeningen volgens het lagenmodel.

Het is wenselijk het gehanteerde model nader op zijn bruikbaarheid voor berekening van uitspoeling van kasgronden te toetsen. Daarbij dienen dan met name ook gronden met een zwaardere textuur en veengronden betrokken te worden.

LITERATUUR

- BRENNER, H., 1962. The diffusion model of longitudinal mixing in beds of finite length. *Chem. Eng. Sci.* 17: 229-243
- FRISSEL, M.J., P. POELSTRA en P. REINIGER, 1970. Chromatographic transport through soils: III. A simulation model for the evaluation of the apparant diffusion coefficient in undisturbed soils with tritiated water. *Plant and Soil* 33: 161-176
- GOUDRIAAN, J., 1973. Dispersion in simulation models of population growth and salt movement in the soil. *Neth. J. of Agric. Sci.* 21: 269-281
- HAMAKER, PH., 1975. Lysimeter onderzoek betreffende uitspoeling van zouten en meststoffen uit een kasgrond van lichte textuur. *Nota I.C.W. nr. 877.* (In voorbereiding)
- NIELSEN, D.R. and J.W. BIGGAR, 1962. Miscible displacement: III. Theoretical considerations, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26: 216-221
- SONNEVELD, C. en J. VAN BEUSEKOM. Het doorspoelen van een lichte zavelgrond. Verslag no. 677 (1974) van het Proefstation voor de Groenten- en Fruitteelt onder Glas te Naaldwijk

Volgens BRENNER (1962) wordt de chloride distributie tijdens uitspoeling van een half-oneindig homogeen profiel bij de desbetreffende randvoorwaarden beschreven door oplossing (8) van deze nota. Fig. 4 is op berekeningen volgens oplossing (8) gebaseerd. Voor berekening van de termen met $\operatorname{erfc}\left(\frac{V^*t-x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ en $\operatorname{erfc}\left(\frac{V^*t+x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ werd gebruik gemaakt van de volgende numerieke benaderingen:

$$1: \quad \operatorname{erfc}(p) = \frac{\exp(-p^2)}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{1}{p} - \frac{1}{2p^3} + \frac{3}{4p^5} \right\} \text{ voor } p \geq 3$$

(zie CARSLAW and JAEGER, Conduction of Heat in Solids, second edition 1959, Oxford University Press, Appendix II).

$$2: \quad \operatorname{erfc}(p) = 1 - \operatorname{erf}(|p|) \text{ voor } 0 < p < 3$$

$$\operatorname{erfc}(p) = 1 + \operatorname{erf}(|p|) \text{ voor } -2 < p < 0$$

waarin $\operatorname{erf}(|p|) = 1 - (a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5) \exp(-p^2)$

$$\text{met } t = \frac{1}{(1+b_1 \cdot |p|)}$$

$$b_1 = .3275911$$

$$a_1 = .254829592$$

$$a_2 = -.284496736$$

$$a_3 = 1.421413741$$

$$a_4 = -1.453152027$$

$$a_5 = 1.061405429$$

(zie ABRAMOWITZ and STEGUN, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, Inc., New York, chapter 7).

$$3: \quad \operatorname{erfc}(p) = 2 \text{ voor } p \leq -2$$