

NOTA 723

februari 1973

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING  
WAGENINGEN

**ALTERRA**  
Wageningen Universiteit & Research centr  
Omgevingswetenschappen  
Centrum Water & Klimaat  
Team Integraal Waterbeheer

"SIMULATIE VAN DE VERPLAATSING VAN IN WATER  
OPGELOSTE AFVALSTOFFEN DOOR DE BODEM  
VAN MAAVELD TOT DRAIN"

G.A. Stasse en ir. G.P. Wind

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, 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.

## 1. INLEIDING

### 1.1. Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is een bijdrage te leveren aan een methode van verwerking van het veenkoloniale afvalwater. Deze methode bestaat uit bevloeiing of beregening van het proceswater uit de aardappelmeelfabrieken op velden. In de grond onder die velden vindt een microbiologische afbraak van het afval plaats. Het afval of de afbraakproducten ervan verplaatsen zich door de bodem en bereiken het open water of het grondwater. Juist deze vervuiling van het open water of van het grondwater moet voorkomen worden. Dit kan gebeuren door eenvoudige ingrepen (o.a. methode van bevloeiing of beregening), indien bekend is wat er precies in de bodem gebeurt.

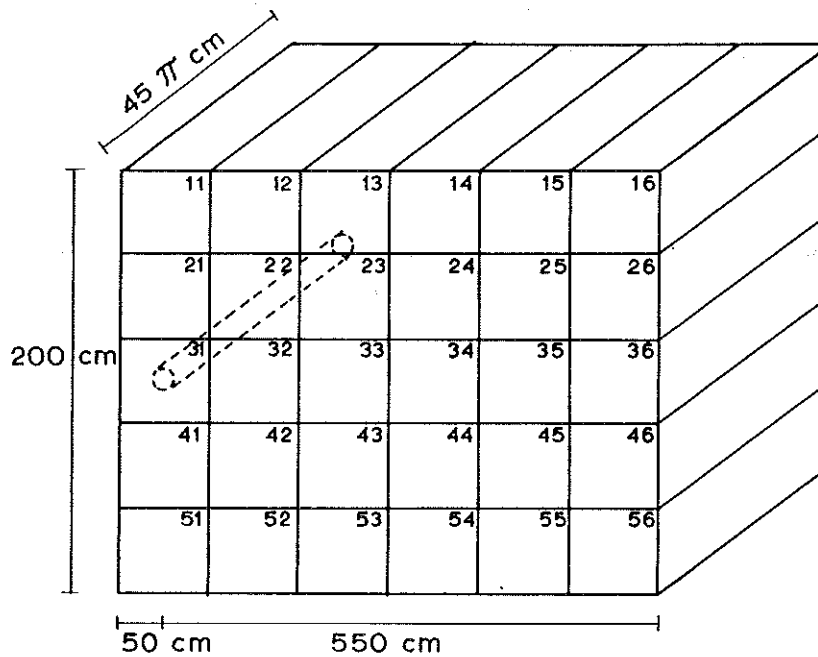
De problemen zijn:

1. Waar, hoe snel en onder wat voor omstandigheden wordt het afval afgebroken.
2. Op welke manier en hoe snel stroomt het afval of stromen de restanten hiervan door de bodem en wanneer wordt een evenwichtstoestand van afvalprodukten bereikt en wat zijn hiervan karakteristieken.

Punt 1 is onderwerp van een onderzoek op de afdeling Landbouwscheikunde van de Landbouwhogeschool door de Korte. Punt 2 is onderwerp van dit verslag.

### 1.2. Methode van onderzoek

Het laatste probleem trachten we op te lossen met een analoog model, dat berust op het model van WIND (1972). Een zoutoplossing bootst het met vuil belaste water na. De gangen van deze zoutoplos-



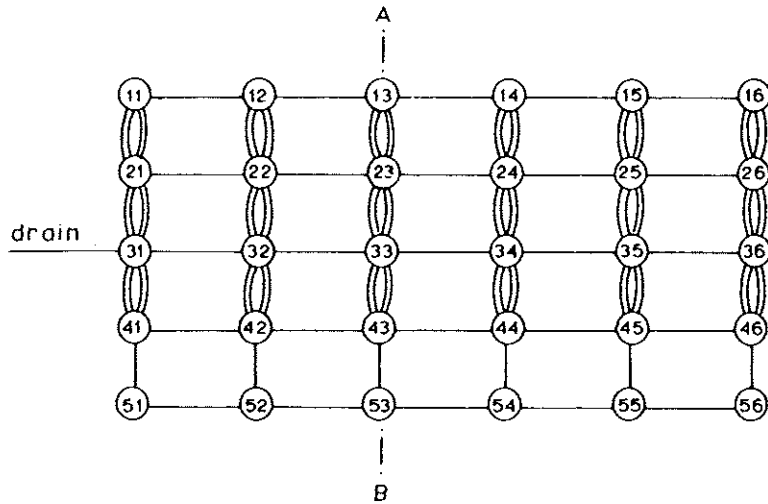
Figuur 2.1. De moot grond en de 30 grondblokken

Ieder blok grond van  $40$  bij  $100$  bij  $45 \pi \text{ cm}^3$  wordt nu voorgesteld door een vat. Deze zijn in dit verslag genummerd. Iedere bodemlaag wordt rij genoemd en  $5$  op een volgende bodemlagen van  $100$  bij  $45 \pi \text{ cm}^2$  wordt een kolom genoemd (zie de figuren 2.2. en 2.3.).

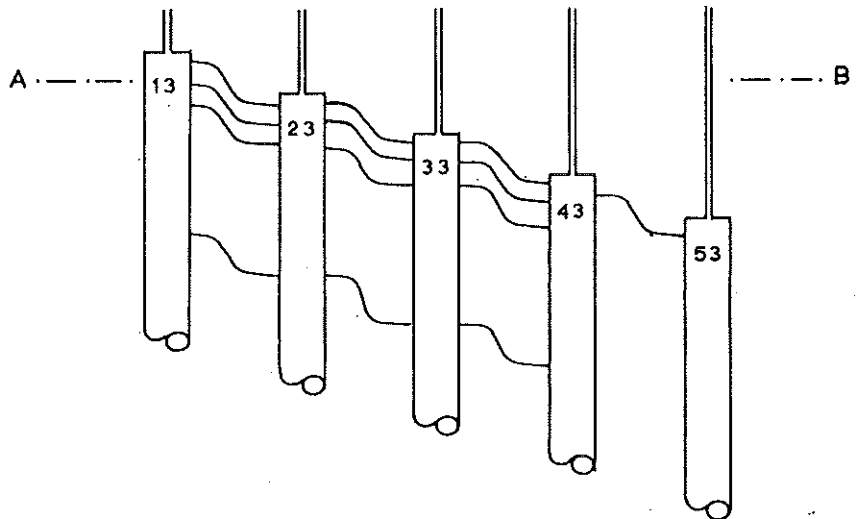
Er kan nu opgemerkt worden, dat het model 2-dimensionaal is, bestaande uit  $6$  modellen van WIND naast elkaar ( $6$  kolommen). Uitgaande van ons probleem zijn er twee belangrijke verschillen met het model van WIND:

1. omdat het gaat om de zoutstroming in de bodem, dient al het water van de bodem in het model te worden betrokken. De inhoud van de vaten stelt dan ook het totale poriën-volume van zo'n grondblok voor.
2. omdat vooral de nadruk ligt op de verzadigde stroming door het model is de  $K - \psi$  - relatie voor het onverzadigde gedeelte vereenvoudigd weergegeven door  $4$  verbindingen. Eenvoudigheidshalve wordt de vocht karakteristiek geacht een rechte te zijn en het vat kan derhalve worden voorgesteld door een cilindrische buis.

Voorts dient opgemerkt te worden dat het model continu is in de tijd en discreet in de afstanden.



Figuur 2.2. Boven aanzicht van het model



Figuur 2.3. Dwarsdoorsnede van figuur 2.2. over kolom 3

### 2.2.3. De berekening van het model

Hier worden achtereenvolgens behandeld:

1. De schaalfactoren
2. De buizen
3. De slangetjes
  - 3.1. De verzadigde doorlatendheid
  - 3.2. De onverzadigde doorlatendheid
  - 3.3. De lengten, diameters en aanbrenghoogten van de slangetjes
  - 3.4. Het maaiveld in het model
  - 3.5. De verbinding van het maaiveld met rij 1
  - 3.6. De drainbuis
4. De bouw van het model
  - 4.1. Buizen, slangetjes en goot
  - 4.2. De menging
  - 4.3. De neerslag

2.2.3.1. De schaalfactoren. Het model is gebaseerd op de volgende drie schaalfactoren:

1. de schaalfactor voor de verticale lengtematen

$$S_v = 0,1$$

40 cm in werkelijkheid is 4 cm in het model

2. de schaalfactor voor de hoeveelheden

$$S_h = 0,01$$

1 liter in werkelijkheid is 10 cm<sup>3</sup> in het model

3. de schaalfactor voor de tijd

$$S_t = \frac{5}{1440}$$

1 dag in werkelijkheid is 5 minuten in het model

2.2.3.2. De buizen. De invloed van een grondblok is  $lbh \text{ cm}^3$ . Het poriën-volume  $\rho$  van het grondblok wordt in het model weergegeven door:

$$I = 1 b h \rho S_h \text{ cm}^3 = 2.260 \text{ cm}^3$$

overeenkomend met de inhoud van één buis.

De doorsnede van de buis wordt als volgt gevonden. Tussen  $\Psi = 0$  en  $\Psi = -100 \text{ cm}$  worden  $m$  volumedelen water geborgen. Iedere cm vocht-

spanning wordt voorgesteld door  $1 S_v$  cm. Dit betekent, dat indien de waterspiegel in de buis  $100 S_v$  cm stijgt, en  $1 b h S_h m$  cm<sup>3</sup> water geborgen moet worden.

De doorsnede is dan:

$$\pi R^2 = \frac{1 b h S_h m}{100 S_v} = 9 \pi \text{ cm}^2$$

De diameter van de buis is dus 6 cm

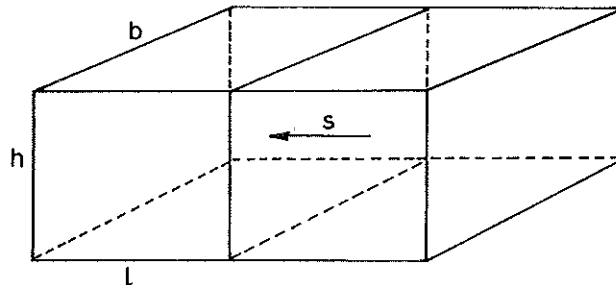
De lengte van de buis bedraagt:

$$\frac{1 b h S_h p}{\pi R^2} = 80 \text{ cm}$$

### 2.2.3.3. De s l a n g e t j e s

#### 2.2.3.3.1. De verzadigde doorlatendheid

##### 1. De horizontale verzadigde stroming:



Figuur 2.4. de horizontale stroming

Volgens Darcy geldt:

$$v = -k \frac{d\phi}{ds} = -k \left( \frac{dY}{ds} + \frac{dz}{ds} \right) \text{ cm.dag}^{-1} \quad (1)$$

Hier is  $z$  constant en  $\frac{dz}{ds} = 0$

In overeenstemming hiermee is het debiet in het model:

$$q = -k \frac{d\psi}{ds} \cdot h b \frac{S_h}{S_t} \frac{1}{1440} \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$$

en bij verwaarlozing van het minteken en met een gradiënt  $\frac{d\psi}{ds} = 1$ , geldt:

$$q = k h b \frac{S_h}{S_t} \frac{p}{\rho} \frac{1}{1440} = \frac{1}{40} \frac{kI}{t} \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

Hiervoor geldt volgens Poiseuille:

$$q = \frac{60}{8\eta} r^4 \cdot \frac{P}{L_s} \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

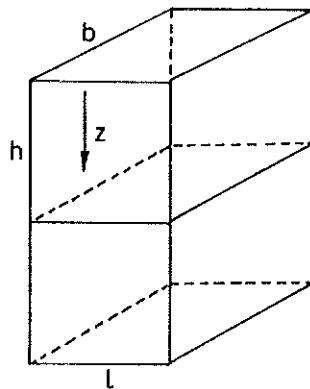
waarbij P bij een gradiënt 1 gelijk is aan

$$P = e.g.h.S_v = 1 \cdot 10^3 \cdot 10^2 \cdot 10^{-1} = 10^4 \text{ dyne cm}^{-2}$$

De lengte  $L_s$  van de slangetjes is na gelijkstelling van (2) en (3)

$$L_{s, \text{ horizontaal}} = 1,19 \cdot 10^5 \cdot r^4 \text{ cm} \quad (4)$$

## 2. De verticale verzadigde stroming



Figuur 2.5. De verticale stroming

Volgens Darcy geldt:

$$v = -k \frac{d\phi}{dz} = -k \left( \frac{d\Psi}{dz} + 1 \right) \text{ cm.dag}^{-1}$$

Voor de verticale stroming geldt bij gradiënt 1

$$\frac{d\Psi}{dz} = 0$$

Het debiet in het model is nu:

$$q = -k \cdot l \cdot b \cdot \frac{S_h}{S_t} \cdot \frac{1}{1440} \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Bij verwaarlozing van het min teken geldt:

$$q = \frac{1}{16} \frac{k \cdot l}{t} \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \quad (5)$$

Dit is volgens Poiseuille

$$q = \frac{60 \pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{P}{L_s} \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \quad (6)$$

waarbij  $P = 1 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-1} = 4 \times 10^3 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-2}$

De lengte  $L_s$  van de slangetjes is na gelijkstelling van (5) en (6)

$$L_s, \text{ verticaal} = 3,34 \cdot 10^5 \cdot \frac{r^4}{k} \text{ cm} \quad (7)$$

### 2.2.3.3.2. De onverzadigde doorlatendheid

#### 1. De horizontale onverzadigde stroming:

Volgens RIJTEMA geldt, dat het verband tussen de onverzadigde doorlatendheid en de lokale stijghoogte van het bodemvocht weergegeven kan worden door

$$k = k_0 e^{\alpha\Psi} \text{ cm. dag}^{-1} \quad (8)$$

waarbij  $-100 < \Psi < 0$ .



Ingevuld in de formule van Darcy (1), waarbij geldt dat  $\frac{dz}{ds} = 0$ , geeft dit

$$v = -k_0 e^{\alpha\psi} \frac{d\psi}{ds}$$

Integratie geeft, waarbij de grenswaarden voor  $\psi$ ,  $\psi_1$  en  $\psi_2$  zijn en voor  $S$ ,  $S_1$  en  $S_2$

$$v = \frac{k_2 - k_1}{\alpha(S_1 - S_2)} \text{ cm. dag}^{-1} \quad (9)$$

2. De verticale onverzadigde stroming:

Combinatie van de formules (1) en (8) levert:

$$v = -k_0 e^{\alpha\psi} \left( \frac{d\psi}{dz} + 1 \right)$$

waarbij

$$dz = \frac{d\psi}{\frac{v}{k_0} e^{\alpha\psi} + 1}$$

Integratie geeft voor  $\psi$  van  $\psi_1$  naar  $\psi_2$  en voor  $z$  van  $z_1$  naar  $z_2$

$$z_2 - z_1 = \psi_1 - \psi_2 + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\frac{k_0}{v} + e^{\alpha\psi_1}}{\frac{k_0}{v} + e^{\alpha\psi_2}}$$

Stel  $z_2 - z_1 = d$ , dan geldt:

$$v = \frac{k_2 - k_1}{e^{\alpha d} - 1} - k_1 \text{ cm. dag}^{-1} \quad (10)$$

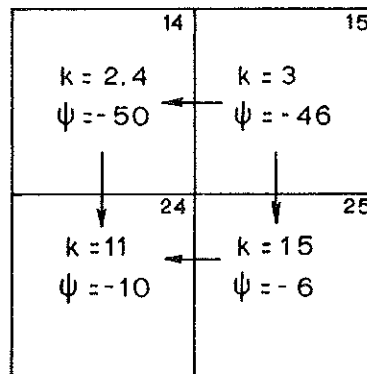
3. De verhouding tussen de horizontale en de verticale onverzadigde stroming:

Om de verhouding tussen de horizontale en de verticale onverzadigde stroming te bepalen, werd de stroomsnelheid in het blok van de

buizen 14, 15, 24 en 25 met de formules (9) en (10) berekend. Uitgegaan werd hierbij van de gegevens behorende bij figuur 3.1. voor een  $m_0$ -waarde van 55 cm. De uitkomsten zijn:

$$v_{\text{hor.}}^{15, 14} = -0,15 \text{ cm/etm}; v_{\text{vert.}}^{14, 24} = -13,2 \text{ cm/etm}$$

$$v_{\text{hor.}}^{25, 24} = -1 \text{ cm/etm}; v_{\text{vert.}}^{15, 25} = -18,4 \text{ cm/etm}$$



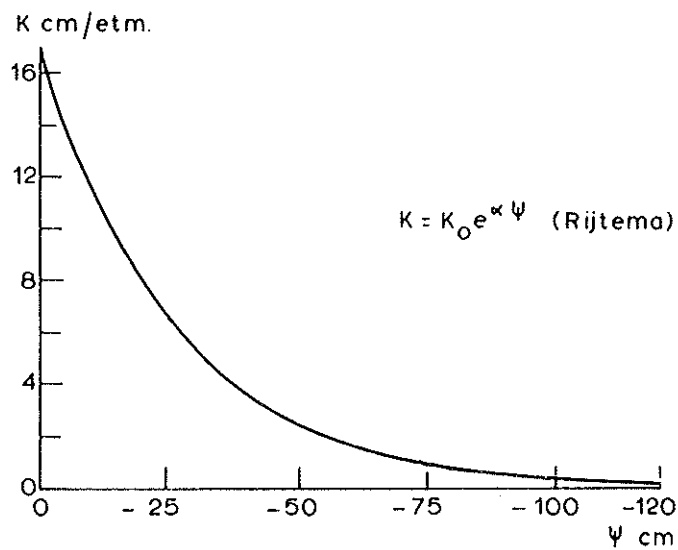
Figuur 2.6. Onverzadigde stroming tussen de grondblokken 14, 15, 24 en 25

Voor dit willekeurige geval blijkt, dat de horizontale onverzadigde stroming te verwaarlozen is.

4. De verdeling van de verbindingsslangetjes voor het onverzadigde gedeelte:

Voor de horizontale stroming is er één enkele verbinding tussen de buizen gemaakt wegens de geringe intensiteit van de horizontale onverzadigde stroming.

Voor de verticale stroming is de doorlatendheid verdeeld over 4 slangetjes, waarbij moet gelden dat  $\sum k = k_0$ . De gekozen slangetjes zijn evenredig over het vochttraject verdeeld (zie figuur 2.7.).



Figuur 2.7. De  $k - \Psi$  relatie volgens RIJTEMA

Er is gekozen voor:

$\Psi = -16,6$	cm	-	$k = 9$	$\text{cm.min}^{-1}$
$\Psi = -30$	cm	-	$k = 5,25$	$\text{cm.min}^{-1}$
$\Psi = -44$	cm	-	$k = 3,091$	$\text{cm.min}^{-1}$
$\Psi = -120$	cm	-	$k = 0,144$	$\text{cm.min}^{-1}$

De lage waarde van  $\Psi = -120$  cm is gekozen om bij lage vochtspanningen toch nog een zekere stroming te kunnen realiseren.

#### 2.2.3.3.3. De lengten en de diameters der verbindingsslangetjes:

Met behulp van de formules (4) en (7) zijn de lengten en diameters der verbindingsslangetjes berekend.

Tabel 2.1. Lengte van de verbindingsslangetjes in cm.

Soort stroming	$\phi = 0,15$ cm	$\phi = 0,3$ cm	$\phi = 0,45$ cm
Horizontale stroming $L_s$	-	<u>60</u>	190
Vertikale stroming			
Onverzadigd $L_k = 0,144$	<u>75</u>	-	-
Onverzadigd $L_k = 3,091$	-	<u>55</u>	277
Onverzadigd $L_k = 5,25$	-	<u>32</u>	163
Onverzadigd $L_k = 9$	-	<u>18,8</u>	95
verzadigd $L_{ko} = 17,5$	-	-	<u>49</u>

De onderstreepte waarden (cm) zijn in het model gebruikt

De aanbrenghoogten van de slangetjes zijn op  $\Psi_w \cdot S_v$  cm beneden de bovenkant van de buizen.

#### 2.2.3.3.4. Het maaiveld in het model: de 'goot'.

Aan het begin van de proeven wordt het maaiveld bevoeid met 100 mm zoutoplossing. Deze hoeveelheid werd uit een vat in een goot gepompt. In de goot was een overloop aangebracht zo, dat het water hierin niet hoger kwam te staan dan 1 cm. Uit de goot stroomde het water naar de buizen van rij 1.

Deze methode gaf het bezwaar, dat de kolommen dichterbij de drain te veel water toegevoerd kregen, doordat de oppervlakte afvoer in de goot in geen verhouding stond tot de werkelijke oppervlakte afvoer in het veld. Bij gebrek aan gegevens op dit punt is besloten de oppervlakte afvoer geheel uit te schakelen door in de goot tussenschotten aan te brengen. Deze is hierdoor verdeeld in 6 delen, 1 deel boven iedere kolom. De input werd hierdoor een gegeven.

#### 2.2.3.3.5. De verbinding van de goot met rij 1:

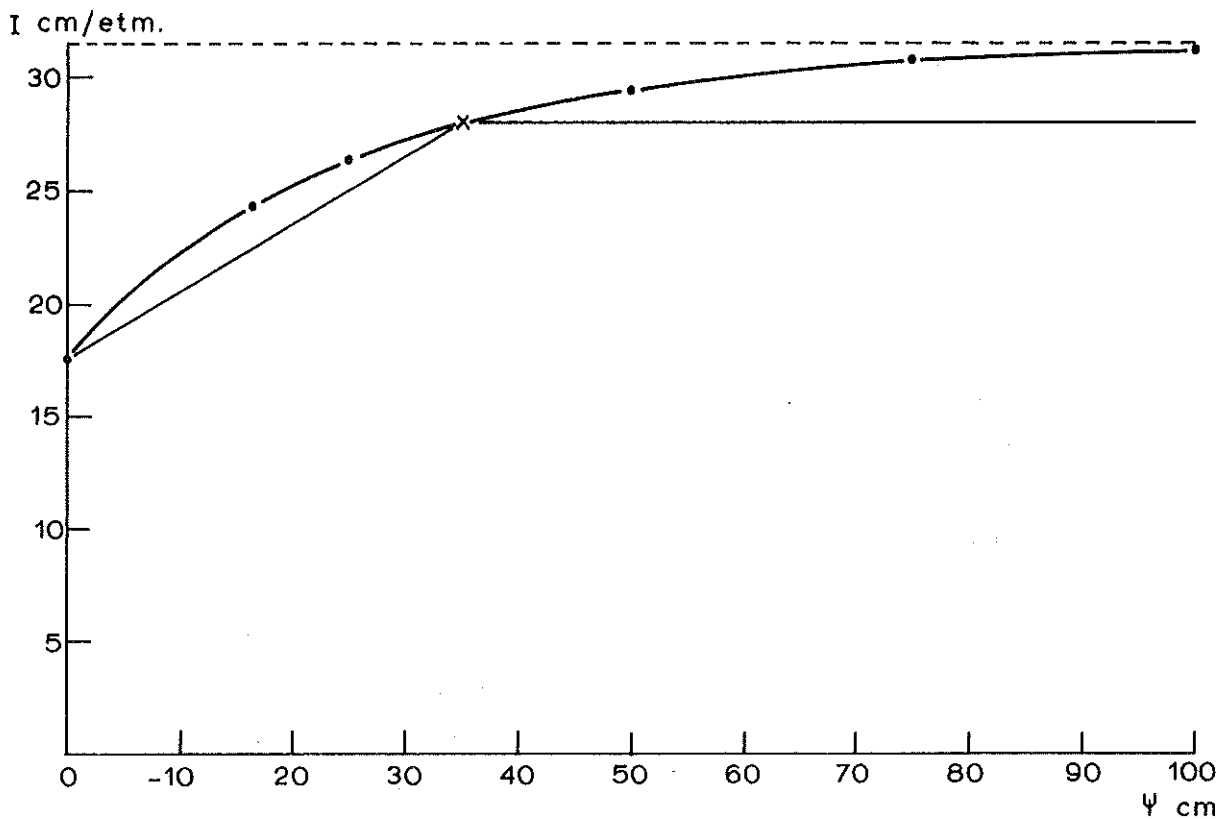
Om de intree weerstand van de bodem voor het water te beschrijven, wordt gebruik gemaakt van de formule voor de verticale onverzadigde doorlatendheid (10), waarbij  $v_{vert}$  de infiltratiesnelheid  $I$  genoemd wordt.

$$I = \frac{k_2 - k_1}{e^{ad} - 1} - k_1 \text{ cm.dag}^{-1}$$

hierbij is  $k_1 = 17,5 \text{ cm.dag}^{-1}$

$$k_2 = k_1 e^{0,04\psi} \text{ cm.dag}^{-1}$$

$$d = 20 \text{ cm}$$

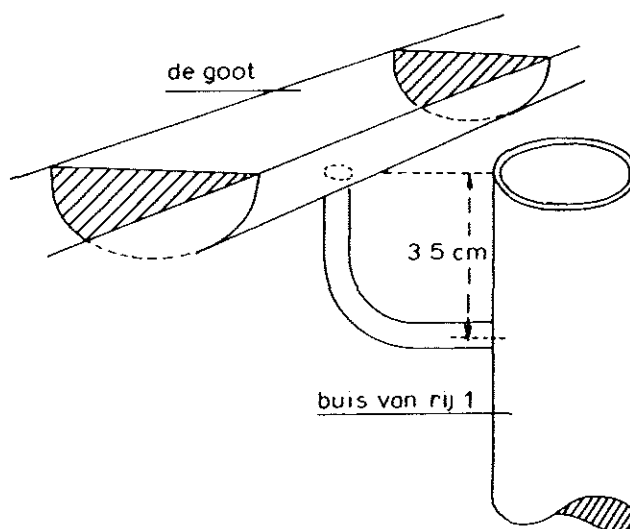


Figuur 2.8. Het verband tussen de infiltratie-snelheid en de negatieve zuigspanning van het bodemvocht.

In het model is deze kromme benaderd door de 2 geschetste rechten, die geknikt zijn bij  $\psi = -35 \text{ cm}$ . Deze  $\psi$  - waarde wordt bij infiltratie-processen vaak gevonden als gemiddelde  $\psi$  - waarde voor de

"transmission zone". In het model wordt de verbindingsslang van de goot met rij 1 aangebracht op  $35 S_v$  cm beneden de bovenkant van de buizen van rij 1. Door het wisselen van de waterstanden in deze buizen wordt automatisch het lineaire verband van de infiltratie-curve verwezenlijkt.

De lengte en de diameter van de verbindingsslangetjes worden berekend met behulp van de formules (5) en (6).



Figuur 2.9. Verbinding van het 'maaiveld' met de buizen van rij 1

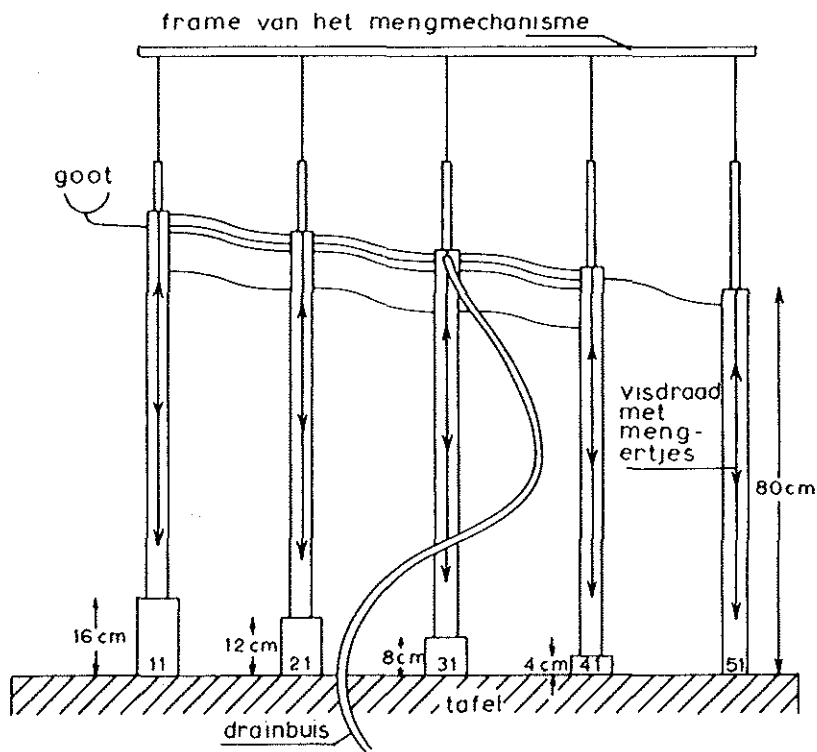
#### 2.2.3.3.6. De drainbuis:

De drainbuis is in het model aangebracht in rij 3 (de laag van 80 - 120 cm) op 2 cm beneden de bovenkant van de buis. De geringe weerstand van het de drain nabootsende slangetje kan opgevat worden als de intree-weerstand bij de drain.

## 2.2.4. De bouw van het model

### 1. Het hydraulische gedeelte:

De figuren 2.1. en 2.2. geven een overzicht hoe de te beschouwen grondmoot in het model geprojecteerd is. In figuur 2.10 worden alle essentiële onderdelen van het model in een dwarsdoorsnede weergegeven (vergelijk figuur 2.3.), behalve het frame.



Figuur 2.10. Doorsnede van het model over kolom 1

### 2. De menging:

Er is uitgegaan van de veronderstelling, dat de concentratie van de oplossing in de bodem, per blok op ieder punt het zelfde is. Daarom moet er in het model een goed mengmechanisme aanwezig zijn, zodat in een willekeurige buis de zoutconcentratie overal gelijk is.

Op grond van experimenten is gekozen voor een mechanische menginrichting, die over de gehele lengte van de buizen mengde. De menginrichting bestond uit 3 stukjes hoekstaal per buis die met nylon visdraad aan een frame waren verbonden (zie figuur 2.10). Dit frame werd op en neer bewogen met behulp van een door een elektromotor ronddraaiend fietswiel. Doordat op de velg van het wiel een bevestiging door middel van touw met het frame was gemaakt, werd de ronddraaiende beweging van het wiel omgezet in een op en neer gaande beweging van het frame.

### 3. De neerslag:

Om een reëel overzicht te verkrijgen van de situatie in de grondmoot één jaar na de bevloeiing is er een regenprogramma aan het model toegevoegd. Gekozen werd de regenperiode van 1 september tot 1 maart. Voor de uitwerking van de regenschema's werden de neerslagcijfers van Hoofddorp gebruikt. Hierbij zijn de volgende criteria gehanteerd:

1. Voor de 90- en 180-daagse neerslagsommen zijn de gemiddeld optredende waarden ongeveer aangehouden.
2. Voor de 1-, 2-, 5-, 10- en 30-daagse neerslagsommen is de met een frequentie van eens per jaar optredende neerslag niet overschreden.

De indeling voor de 30- en 10-daagse periode was als volgt: (neerslag-hoeveelheden in millimeters)

	30-daagse periode	I <sup>e</sup>	II <sup>e</sup>	III <sup>e</sup>	10-daagse periode
september	50	20	30	0	
oktober	70	60	0	10	
november	130	10	70	50	
december	60	40	20	0	
januari	40	0	30	10	
februari	50	30	0	20	

Het totale regenprogramma is in een ponsband verwerkt. Deze wordt afgelezen door een apparaat, dat een elektro-magnetische klep bedient. Een vat met een constant waterniveau zorgt ervoor, dat op de klep een constante druk staat, zodat de vereiste hoeveelheden water



worden gegeven. Vanuit de verdeler loopt de regen in een vat, waarin in het laagste gedeelte een aftapbuis is aangebracht, die aan de onderkant overgaat in 6 gelijke slangetjes. Deze slangetjes geleiden de neerslag naar de 6 delen van de goot.

Deze constructie kent twee nadelen:

1. De overdrukhoogte is zo klein, dat kleine schommelingen in het overdrukvat een afwijking veroorzaken in de neerslag van  $\pm 10\%$ . Het hoger plaatsen van het drukvat of het lager plaatsen van het verdeelvat was niet mogelijk in verband met andere delen van de constructie.
2. De verdeling van het water vanuit het verdeelvat naar de 6 slangetjes gaf een fout van  $\pm 10\%$ .

### 3. METINGEN EN UITKOMSTEN

#### 3.1. De gang van zaken bij een proef

Bij het begin van iedere proef is het model gevuld met gedestilleerd water. De opbolling midden tussen de drains is 0 cm.

Op 26 augustus begint de bevloeiing van 100 mm afvalwater (0,1 N NaCl-oplossing). Nadat deze hoeveelheid is uitgezakt, begint de neerslag van een half jaar op 4 september met 4 mm regen (zie 2.2.4.3.).

#### 3.2. De hydraulische metingen en uitkomsten

Alvorens met de proeven te beginnen werd een proefbevloeiing van 100 mm water uitgevoerd om het model op zijn hydraulische eigenschappen te testen.

Gemeten werden enige karakteristieken van de bevloeiing,  $m_0$ -waarden en drainafvoeren en de tijdstippen, dat deze optraden. De  $m_0$ -waarden werden afgelezen op een stijgbuis aangebracht in buis 36. (zie tabel 3.1.).

Met behulp van de formule van Hooghoudt kan de dikte van het doorstroomde pakket worden berekend.

$$s = \frac{4 k_o (H^2 - h^2)}{L^2} \quad (\text{Hooghoudt})$$

waarbij H de hoogte van de grondwaterspiegel midden tussen de drains  
boven de ondoorlatende laag.

en h de hoogte van het water in de drain boven de ondoorlatende  
laag.

Hier is  $H - h = m_o$  en  $\frac{H + h}{2} = d$

zodat  $\frac{H + h}{2} = \frac{m_o}{2} + h$  (1)

en  $d = \frac{L^2}{8k_o} \cdot \frac{s}{m_o} = \frac{121}{1,4} \cdot \frac{s}{m_o}$  (2)

Tabel 3.1.: Opbolling en afvoer in het model

Karakteristieken	Opbolling cm	tijd min.	sec.	drainafvoer mm.dag	$\frac{s}{m_o}$ -waarde dag <sup>-1</sup>
Begin proef	0	0	0		
Drain gaat lopen		1	30		
Model verzadigd	100	3	30		
$m_o$ -maximaal	125	11	0		
Maaiveld droog	100	26	0	8,27	0,0083
	82	27	0	7,8	0,0095
	70	29	0	6,5	0,0093
	60	31	0	5,4	0,009
	50	33	30	4,3	0,0085
	40	38	30	2,7	0,0068
	30	43	0	2,06	0,0068

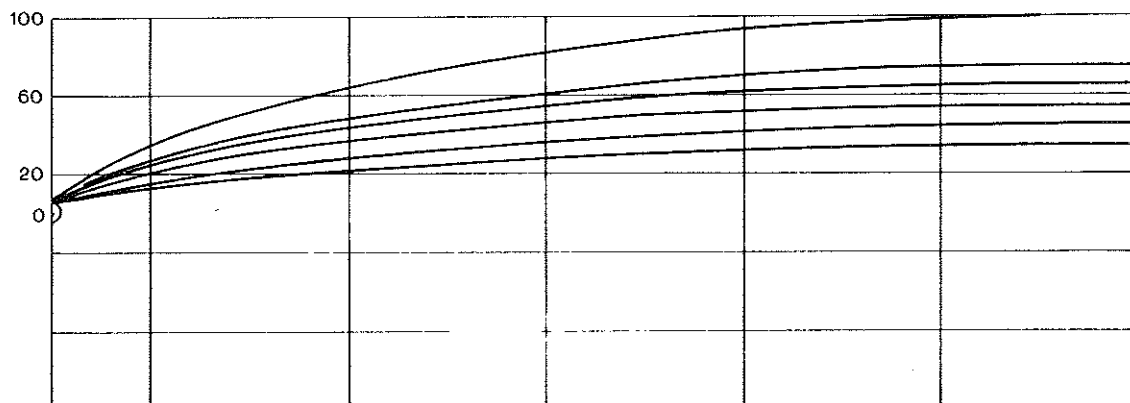
Berekening van de diverse waarden afgeleid uit die van tabel  
3.1. geeft tabel 3.2.

Tabel 3.2. Overzicht van gemeten en afgeleide hydraulische grootheden van het model (in cm).

Opbolling $m_o$	d (formule 2)	$\frac{m_o}{2}$	h (formule 1)
82	82	41	41
70	80	35	45
60	78	30	48
50	74	25	49
40	59	20	39
30	59	15	44

De uit tabel berekende gemiddelde h-waarde bedraagt 44 cm. Bij een afvoer van  $7 \text{ mm.dag}^{-1}$  is de opbolling 74 cm. De dikte van het doorstroomde pakket is dan 81 cm (formule 1). Volgens de tabellen van Hooghoudt moet deze waarde 85 cm zijn ( $H = 2 \text{ m}$  en  $L = 11 \text{ m}$ ) bij een drain-diameter van 6 cm. Alhoewel dit vrij goed klopt - met de veronderstelling dat de drain in het model overeenstemt met een drain met  $\phi 6 \text{ cm}$  in het veld -, was het model ontworpen voor een  $\frac{S}{m_o}$  - waarde van  $0,014 \text{ dag}^{-1}$ . De in het model optredende weerstand is dus iets groter dan is aangegeven.

Tevens werd de vorm van het freatisch vlak bepaald uit waterstandshoogten van rij 3 bij verschillende opbollingen (zie figuur 3.1.).



Figuur 3.1. Het verloop van het freatisch vlak bij diverse  $m_0$ -waarden

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het model niet te veel afwijkt van de werkelijkheid.

De volgende getallen geven een idee om welke hoeveelheden water het gaat.

Het model bevat bij:

- |                           |        |
|---------------------------|--------|
| 1). volledige verzadiging | 800 mm |
| 2). $m_0 = 0$             | 764 mm |
| een enkele bevoeijing is  | 100 mm |
| neerslag van een jaar is  | 400 mm |

### 3.3. De zoutmetingen en de uitkomsten

#### 3.3.1. De metingen

De proeven kunnen wat de bevoeijing betreft verdeeld worden in 2 soorten:

- 1). boven één kolom wordt 100 mm zoutoplossing gebracht en tegelijkertijd wordt boven de overige 5 kolommen 100 mm gedestilleerd water gebracht. (proeven 2, 3, 4 en 5).
- 2). boven alle kolommen wordt tegelijkertijd 100 mm zoutoplossing ge-

bracht (proeven 1 en 6). Bij proef 6 werd gedurende 5 jaren het proces van bevloeiing met 100 mm zoutoplossing en een half jaar regen herhaald, teneinde gegevens te verkrijgen over een evenwichtstoestand.

De tijdstippen waarop de metingen plaats vonden, waren bij de proeven 1, 2, 3, 4 en 5 tijdens de bevloeiing en enige tijd daarna (26, 29 augustus, 1, 4, 7 en 10 september), na de perioden van grote regenval (16 oktober, 15 december) en aan het einde van het jaar voor het eindresultaat (8 en 28 februari). Bij proef 6 werd één maal per maand op vaste tijdstippen gemeten, teneinde het verloop van de zoutconcentraties in de tijd te kunnen bezien.

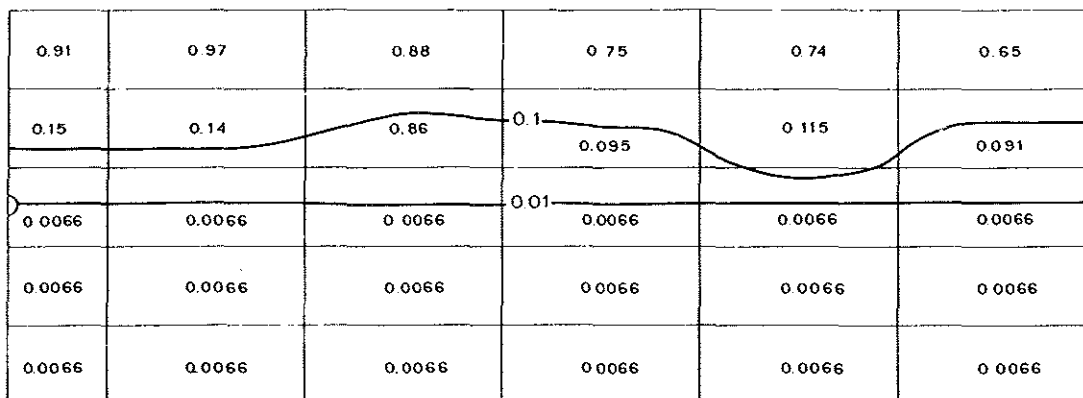
De meetmethode was als volgt: Op het betreffende tijdstip werden eerst de monsterleidingen, die onderaan in alle 30 buizen bevestigd waren, doorgeblazen, om deze schoon te maken en om van goede monsters verzekerd te zijn. (tijdsduur 1 à 1,5 minuut). Vervolgens werden de 30 monsters genomen door gelijktijdig de einden van de monsterleidingen boven 30 potjes te houden. Hierna werd de opgevangen drainafvoer gemeten en bemonsterd op zoutgehalte. Naast deze gegevens werd de  $m_o$  - waarde geregistreerd. Als laatste werd het zoutgehalte van de 30 monsters gemeten met een geleidbaarheidsmeter. Uit de verkregen cijfers kon na omrekening ook een zoutbalans en een waterbalans worden samengesteld.

### 3.3.2. De uitkomsten en de interpretatie van de proeven

De gemeten concentraties en de zout- en waterbalansen van de proeven zijn te verkrijgen bij de auteurs. Per tijdsopname kan van het concentratieverloop van het zout een beeld geschetst worden door lijnen van gelijk zoutgehalte (isohalinen) uit te zetten (zie b.v. figuur 3.2.).

#### Proef 1:

Bij de infiltratie en de stroming van de zoutoplossing door het model kunnen in het verloop van de tijd een drietal deelprocessen worden onderscheiden. Het eerste proces bestaat uit een verticale verplaatsing van de zoutoplossing, waardoor het model geheel verzadigd wordt. De isohalinen lopen hier min of meer horizontaal (zie figuur 3.2.).



Figuur 3.2. Verloop van de isohalinen  $\text{gr NaCl} \cdot \text{l}^{-1}$  op 26 augustus bij het begin van de bevoeiing. Het model is nog niet verzadigd

Het tweede proces begint, nadat door infiltratie van de zoutoplossing het freatisch niveau is gaan stijgen. Door de verhoging van het freatisch vlak ontstaat er een drain-stroming. Figuur 3.3. geeft voor het model daarvan een beeld door het verloop van de stroomlijnen en equipotentiaallijnen bij een  $m_0$  - waarde van 55 cm.

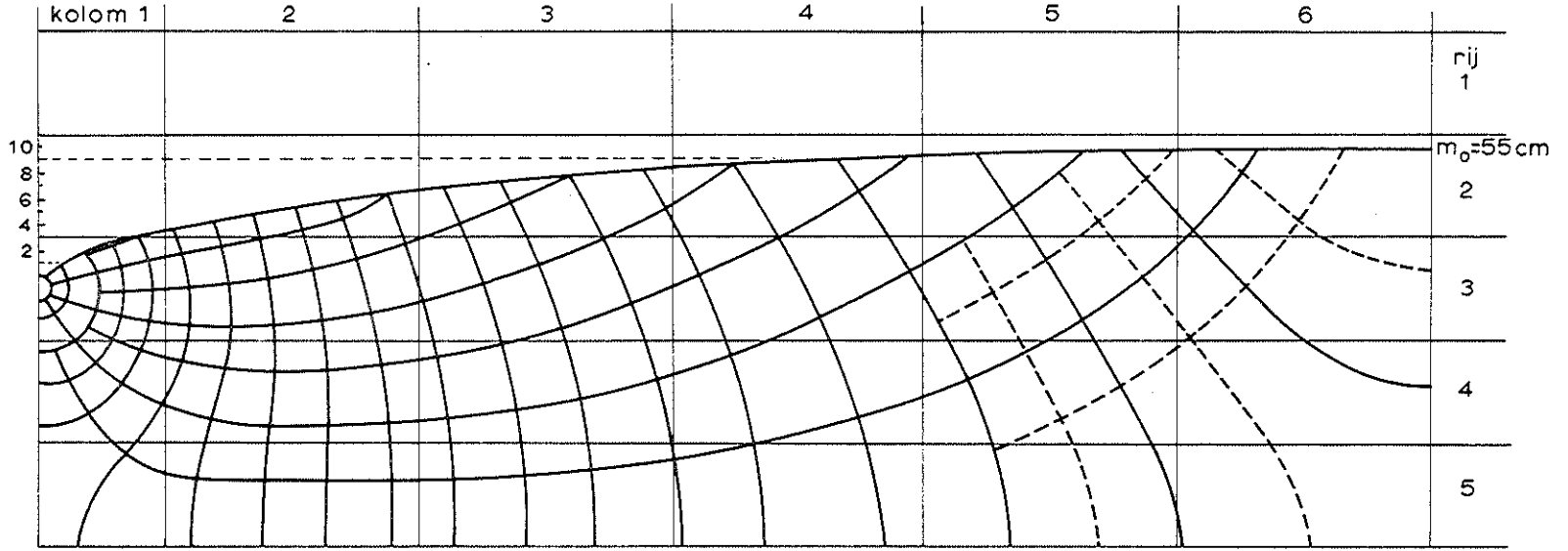


Fig. 3.3. Het verloop van de stroomlijnen en equipotentiaallijnen in het model bij een opbolling van 55 cm

Het is vanzelfsprekend het zoutwatertransport te koppelen aan het watertransport door het model. Uit figuur 3.3. blijkt dat water met de grootste concentratie aan zout zich voornamelijk in kolom 2 zal bevinden. Bovendien zal de zoutoplossing bevoeid boven kolom 3 en 4 zich eerder in kolom 2 bevinden dan de zoutoplossing bevoeid boven kolom 5 en 6 (zie de figuren 3.4. en 3.5.)

2 7	2 9	2 6	2 5	2 5	2 4
0.96	0.95	0.82	0.7	0.73	0.72
0.3	0.3	0.175	0.095	0.091	0.077
0.015	0.045	0.015	0.01	0.0083	0.0066
0.0066	0.0066	0.066	0.0066	0.0066	0.0066

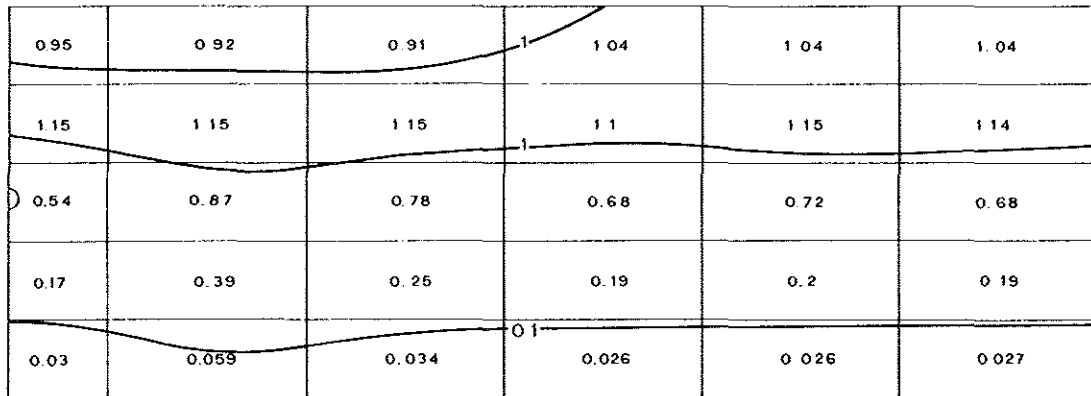
Figuur 3.4. Verloop van de isohalinen op 1 september. Het maaiveld is + 12 uur droog



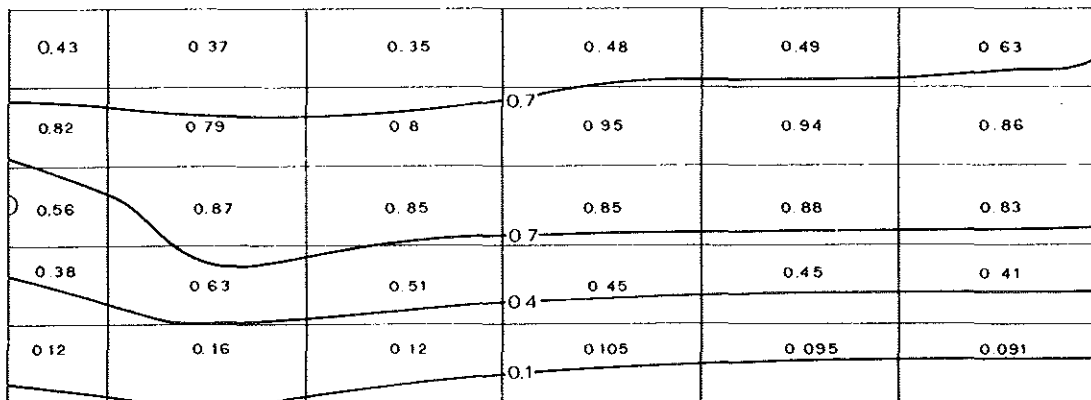
2.65	2.9	2.7	2.6	2.7	2.65
			1		
1	1.04	0.92	0.82	0.85	0.84
0.28	0.34	0.22	0.165	0.15	0.13
			0.01		
0.02	0.069	0.028	0.018	0.015	0.013
			0.01		
0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066

Figuur 3.5. Verloop van de isohalinen op 4 september

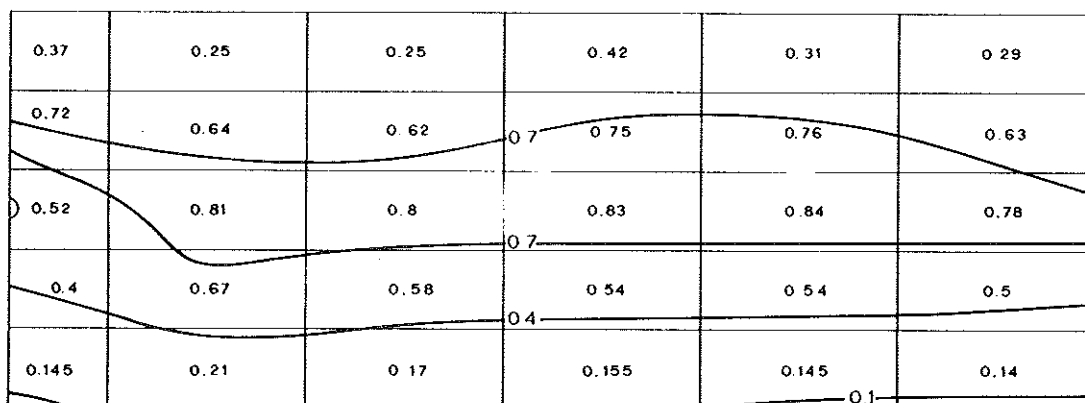
De reden dat met name buis 31 water met lagere zoutconcentraties heeft, is hoogst waarschijnlijk een foutieve constructie van kolom 1 (zie hoofdstuk 5). Naarmate de stroming langer voortduurt, diept het beeld zich uit en ontstaat er een gelijkmatig verloop van glooiende isohalinen. Hierbij neemt de concentratie van het zout vanaf het midden - tussen - de - drains naar de drain geleidelijk toe. Het derde proces komt na de infiltratie van de zoutoplossing op gang, wanneer de eerste regen in gevallen. Eerst wordt de grondlaag direct onder het maaiveld ontzilt. Een zekere drukgradiënt ten opzichte van de drain blijft gehandhaafd door de aanvulling van het grondwater. Hierdoor wordt als het ware een zak van iets hoger zoutgehalte in de richting van de drain bewogen (zie de figuren 3.6., 3.7. en 3.8.)



Figuur 3.6. Verloop van de isohalinen op 20 november  
Som neerslag is 200 mm.



Figuur 3.7. Verloop van de isohalinen op 9 februari  
Som neerslag is 380 mm.



Figuur 3.8. Verloop van de isohalinen op 28 februari  
Som neerslag is 400 mm.

De proeven 2, 3, 4 en 5:

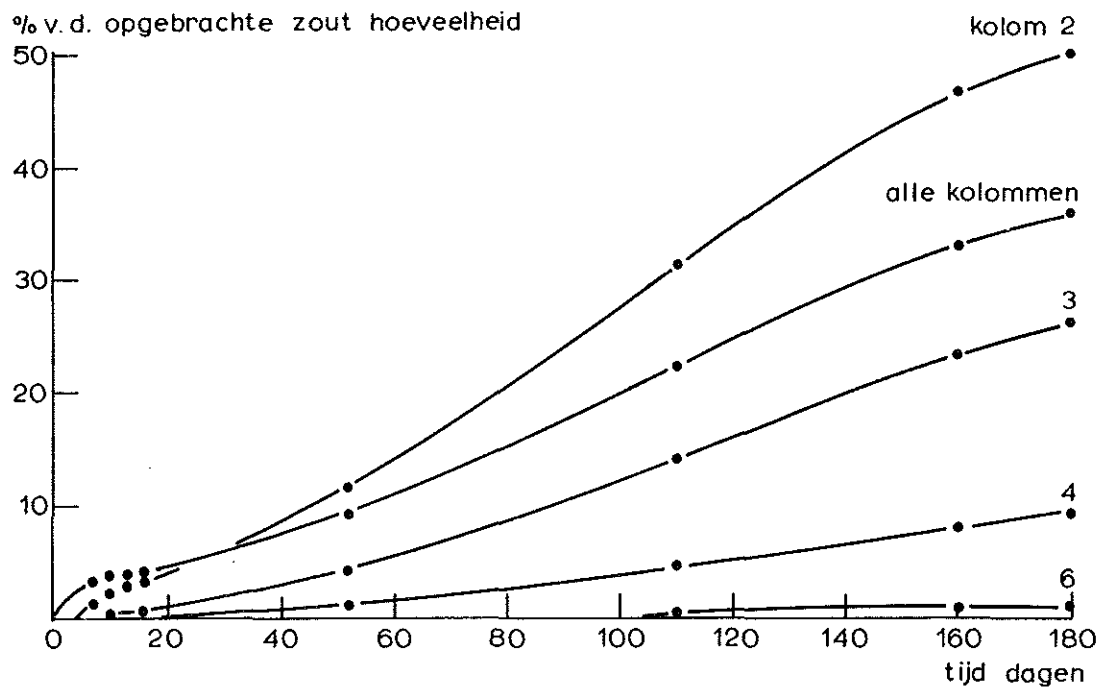
Deze proeven zijn genomen om te zien hoe snel en langs wat voor weg een zoutoplossing die boven een willekeurige kolom geïnfiltreerd is, door het model stroomt. Bij deze proeven is de zoutoplossing geïnfiltreerd in respectievelijk de kolommen 6, 4, 2 en 3.

Uit de gegevens is af te leiden, dat het eerste zout de drain bereikt:

uit kolom 2 na 3 à 4 dagen  
 uit kolom 3 na 7 à 10 dagen  
 uit kolom 4 na 14 à 17 dagen  
 uit kolom 6 na 100 à 110 dagen

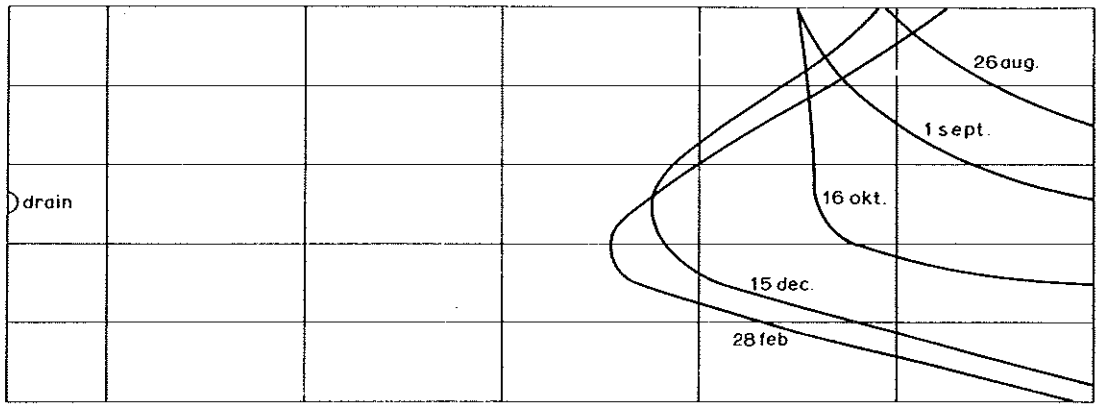
Voor kolom 1 is de proef niet uitgevoerd omdat deze kolom verkeerd gebouwd is. Geschat wordt echter dat hier binnen één dag, wellicht binnen enkele uren het eerste zout de drain bereikt.

Een beeld van de hoeveelheden zout, die via de drain worden afgevoerd als functie van de tijd, wordt voor de proeven 1, 2, 3, 4 en 5 weergegeven in figuur 3.9.

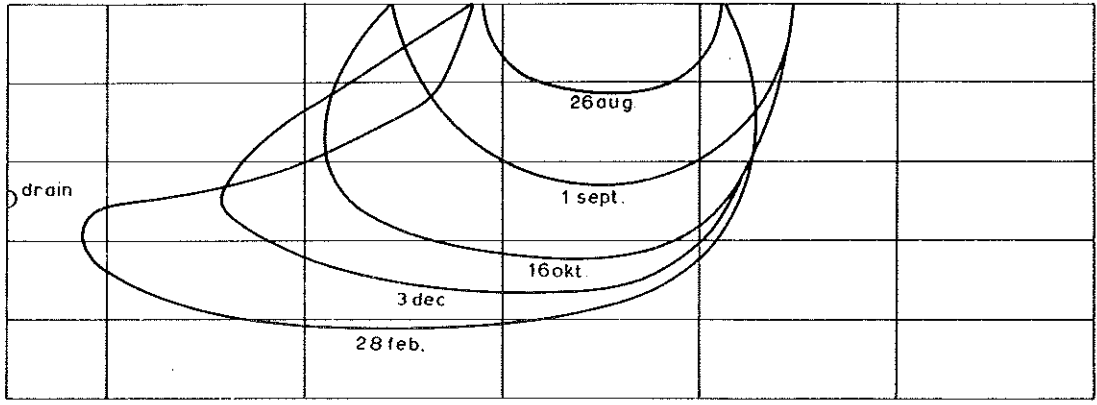


Figuur 3.9. Verloop van het door de drain afgevoerde zout in procenten van de opgebrachte hoeveelheid zout met de tijd

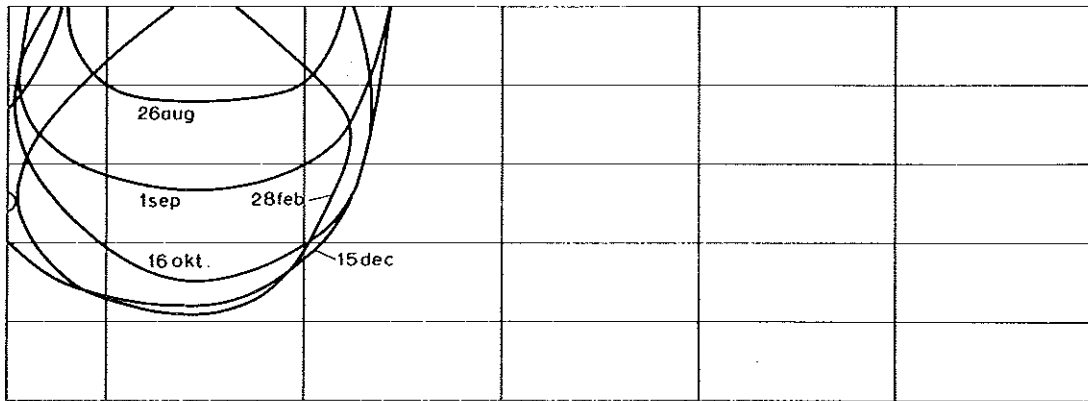
De weg waarlangs de zoutoplossing zich beweegt kan nagegaan worden door per proef het verloop van de 0,1 gr NaCl per liter isohalinen in één figuur weer te geven.



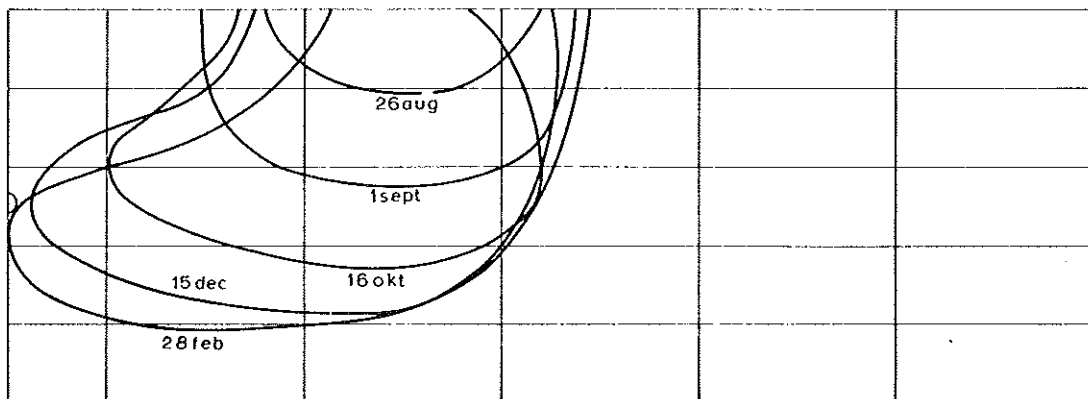
Figuur 3.10. Verloop van de 0,1 gr NaCl/l isohalinen bij infiltratie in kolom 6 van 100 mm zoutoplossing



Figuur 3.11. Verloop van de 0,1 gr NaCl/l isohalinen bij infiltratie in kolom 4 van 100 mm zoutoplossing

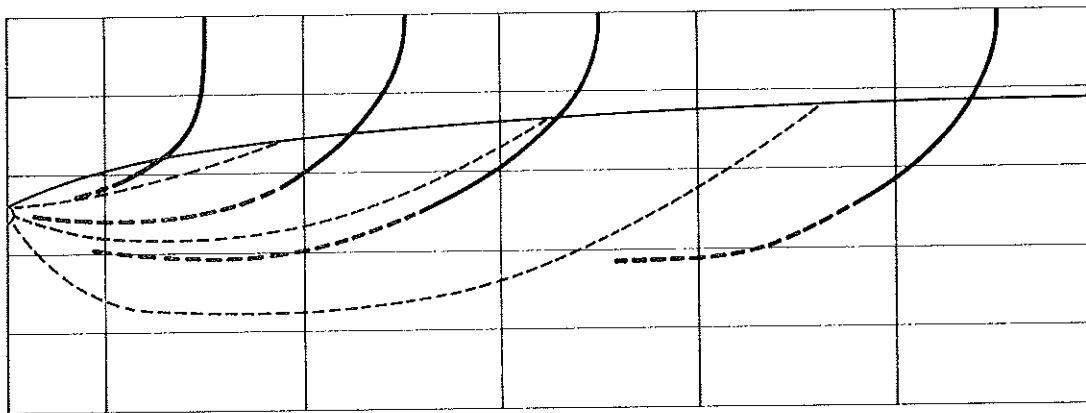


Figuur 3.12. Verloop van de 0,1 gr NaCl/l isohalinen bij infiltratie in kolom 2 van 100 mm zoutoplossing



Figuur 3.13. Verloop van de 0,1 gr NaCl/l isohalinen bij infiltratie van 100 mm zoutoplossing in kolom 3

Uit de figuren volgt, dat er alleen stroming in de richting van de drain plaats vindt en dat de baan die de zoutoplossing aflegt afhankelijk is van de plaats voor de zoutoplossing in het model is geïnfilteerd. Het beeld kan nauwkeuriger worden weergegeven door de zwaartepunten van deze isohalinen te verbinden. Deze lijnen geven de weg aan waarlangs het zwaartepunt van de zoutmassa stroomt.



Figuur 3.14. Verplaatsing van de geschatte zwaartepunten van de zoutstromingen uit de figuren 3.9, 3.10, 3.11 en 3.12, en enkele stroomlijnen uit figuur 3.3

Vergelijking van deze lijnen met het verloop van de stroomlijnen van figuur 3.3. geeft aan, dat de zoutoplossingen zich bewegen zoals de stroomlijnen aangeven. Tevens blijkt uit de figuur dat naarmate de infiltratie dichterbij de drain plaats vindt, de snelheid van de stroming van de zoutoplossing groter wordt. Uit het bovenstaande blijkt, dat zowel de absolute snelheid van stroming van de zoutoplossing als de weg waarlangs deze stroomt in het model overeenstemt met de relatieve stroomsnelheid en de weg waarlangs het water stroomt zoals door de grootte en het verloop van de vierkantjes in figuur 3.3 wordt weergegeven.

In dit verband dienen de resultaten van veldproeven van de Zweed Gustafsson genoemd te worden. In grasland werd 50 cm onder de zode-laag op bepaalde plekken keukenzout gebracht. Na één jaar werd geanalyseerd hoe het zout zich in de gedraineerde bodem verplaatst had. Het resultaat was iets dergelijks als weergegeven in de figuren 3.10, 3.11, 3.12. 3.13.

#### Proef 6:

Met deze proef werd nagegaan wanneer in de bodem een evenwichtstoestand ontstaat, indien ieder jaar een zelfde hoeveelheid zoutoplossing bevoeid wordt. Hierbij wordt de evenwichtstoestand gedefinieerd als die toestand, waarbij het verloop in zoutconcentraties gedurende een willekeurig jaar hetzelfde is als het verloop in het voorgaande of navolgende jaar. Het zoutconcentratie verloop in de vijf rijen gedurende 6 jaren geeft te zien, dat de evenwichtstoestand in de diepere lagen later ontstaat dan in de daar boven gelegen lagen.

laag 1 evenwicht in het derde jaar

laag 2 evenwicht in het derde jaar

laag 3 evenwicht in het vierde jaar

Van de lagen 4 en 5 kon op deze manier geen evenwichtstoestand bepaald worden door gebrek aan langduriger metingen.

Hier kan evenwel een andere methode gebruikt worden om te zien of er een evenwichtstoestand in het gehele profiel is ontstaan. Hierbij wordt van de gedachte uitgegaan, dat indien er een evenwichtstoestand is, de drainafvoer een zelfde hoeveelheid zout moet bevatten als de 100 mm zoutoplossing, waarmee bevoeid is. De uitkomsten van de uitgespoelde zouthoeveelheden als percentage van de opgebrachte hoeveelheid zout zijn vermeld in tabel 3.3. Uit deze cijfers moet opgemaakt worden, dat er een evenwichtstoestand is bereikt in jaar 5 en 6.



Tabel 3.3.: Verloop van het door de drain afgevoerde zout in procenten van de opgebrachte hoeveelheid zout per jaar in proef 6

Jaar	Toevoer gr NaCl/l	Afgevoerde percentages op:					
		29/8	22/9	28/10	21/11	15/12	28/2
1	41,6	2,9	----	9,6	22,6	32,8	35,7
2	49,5	5,05	13,2	21	----	42	52,3
3	49,5	8,6	21,3	34,7	56	71	88
4	49,5	10,1	25,3	38,8	----	----	98
5	49,5	10,4	26,2	42	60,5	83,2	108
6	49,5	----	28	42,3	63,3	90,5	108

De evenwichtstoestand in het gehele profiel aan het einde van een jaar kan berekend worden op grond van het feit, dat de evenwichtsconcentratie na langere tijd doorspoelen van het model met een zoutoplossing gelijk wordt aan de concentratie van die zoutoplossing. De evenwichtsconcentratie is dan (49,5 gr zout op 500 mm à 0,08.48 l) 1,17 gr NaCl/l. Uit de metingen blijkt dat aan het einde van het 5e jaar 68,23 gram NaCl aanwezig is in het model en een hoeveelheid water van 773,5 mm. De gemiddelde zoutconcentratie is dan 1,04 gr NaCl/l, lager dan de berekende evenwichtsconcentratie. Aan het einde van het 6e jaar is 66,43 gram NaCl aanwezig in het model en een hoeveelheid water van 776 mm. De gemiddelde zoutconcentratie is dan 1,01 gr NaCl/l, minder dan in het 5e jaar.

Op grond van de uitkomsten van de verschillende benaderingsmethoden om te bepalen welk jaar de evenwichtstoestand in deze bodem tot stand komt, kan geconcludeerd worden dat:

1. de evenwichtstoestand na 6 jaar bereikt is
2. de evenwichtstoestand boven in het profiel eerder bereikt wordt dan lager in het profiel
3. de uiteindelijke evenwichtstoestand afhankelijk is van de hoeveelheid zout en water die per jaar toegediend wordt, gesteld dat deze hoeveelheden voor een reeks van jaren constant zijn.

#### 4. CONCLUSIE EN ADVIES

Uit de interpretatie van de uitkomsten van de proeven kan de gevolgtrekking worden gemaakt, dat het afvalwater zich door de bodem verplaatst zoals het netwerk van stroomlijnen en equipotentiaallijnen aangeeft. Het afvalwater dat midden tussen de drains wordt opgebracht blijft voor het grootste gedeelte langer dan één jaar in de bodem. Het afvalwater dat boven de drains wordt opgebracht, heeft na enkele dagen het open water bereikt.

In het algemeen kan hieruit geconcludeerd worden, dat het in eerste instantie niet gunstig lijkt boven en vlak naast de drains afvalwater te infiltreren. Dit overigens in afwachting van een onderzoek dat zal aantonen waar precies, hoe snel en onder welke omstandigheden het afvalwater microbiologisch wordt gezuiverd. De verwachting bestaat dat dit proces onder aërobe omstandigheden snel plaats vindt, sneller dan onder anaërobe omstandigheden. Doordat dit proces een goede zuurstofhuishouding behoeft, moet deze afbraak zich dan voornamelijk in de bovenste bodemlagen afspelen.

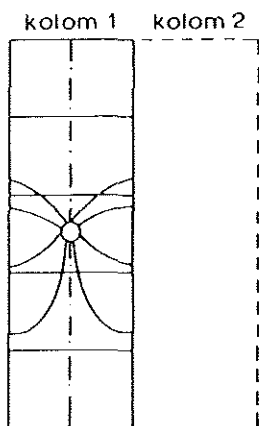
Er staan twee methoden ter beschikking om het veenkoloniale afvalwater op het land te brengen: bevoeiing en beregening. De bevoeiing zou kunnen gebeuren door evenwijdig naast de drainbuizen dijkjes te ploegen, welke de infiltratie boven de drains onmogelijk maken. Echter een goede zuurstofvoorziening voor de aërobe afbraak is dan onmogelijk. Beregening biedt dan, ook technisch gezien, een veel betere oplossing. De bodem is verzekerd van een betere zuurstofvoorziening. Bij beregening kan, mits de drainafstanden zijn aangepast aan de reikwijdte van de beregeningsinstallatie of andersom, het afvalwater tussen de drains infiltreren.

#### 5. NABESCHOUWING

Zoals in de inleiding gezegd is, dient dit onderzoek als voorlopig beschouwd te worden, daar niet te overzien was, welke moeilijkheden zich zouden voordoen bij de bouw van het 2-dimensionale model en welke de problemen zouden zijn bij de zoutstroming.

De moeilijkheden bleken zich achteraf bij de volgende punten voor te doen:

1. In het voorgaande (2.2.4.3.) werd gesproken over de fout in de waterbalans, welke bij dit model niet te verbeteren is (gegevens zie bijlage 1)
2. Eveneens werd het probleem van de stroming van het water over het maaiveld genoemd (2.2.3.3.4.)
3. Bij dit model is geen aandacht geschonken aan de discretisatie van de afstanden
4. De slangetjes in deze modellen hebben het bezwaar door luchtingsluitingen verstopt te raken. Dit is in dit model zo veel mogelijk voorkomen door te zorgen voor zo kort en zo horizontaal mogelijke slangetjes.
5. Een foutieve constructie van kolom 1 heeft de waarnemingen "vertroebeld", in zoverre dat de inhoud van alle buizen hier tweemaal zo klein had moeten zijn. De drain ligt in de helft van het grondblok dat kolom 1 voorstelt. (zie figuur 5.1.)



Figuur 5.1. Verkeerde constructie van kolom 1

De helft links van het verticale vlak door de drain is te veel en werkt derhalve storend op de uitkomsten.

6. Rond de drain is in het model geen verdichting van het netwerk van buizen gemaakt, waardoor een nauwkeurig beeld van de stroming bij de drain teloor is gegaan.
7. Een reeds genoemde fout die niet zo zeer aan het model ligt, is de verdeling van de neerslag uit het verdeelvat naar de zes kolommen (de fout is hier 10%, 2.2.4.3.)
8. Een grove fout is er in de zoutbalans (bijlage 1), die enerzijds verklaard kan worden op grond van systematische fouten, anderzijds door een slechte menging van het zout in het model, getuige de resultaten van proef 6.

Ondanks al deze tekortkomingen heeft het model getoond aan de verwachtingen te voldoen, gezien de hydraulische eigenschappen en de overeenstemming van de zoutstroming met het verloop van de equipotentiaallijnen en stroomlijnen voor dit model. Het is dan ook verantwoord met een dergelijk verbeterd model de proeven voort te zetten. Allereerst zouden dan de reacties op de verblijftijden onderzocht moeten worden door variaties in bodemparameters, door andere drainafstanden en draindiepten. Deze proeven zijn wellicht van belang, voor de anaërobe nazuivering dieper in de bodem. Tenslotte zou het de moeite waard zijn een dimensieloos computerprogramma te maken voor deze modellen, waarin alle bodemparameters, drainafstanden, etc. gevarieerd kunnen worden, om de consequenties van afvallozingen in de bodem beter te kunnen overzien.

## LITERATUUR

1. YNGVE GUSTAFSSON. "Untersuchungen über die Strömungsverhältnisse in gedräntem Boden".  
Acta Agriculturae Suecana (Vol II.1, 1946, p. 138 - 141).
2. K.N.M.I. "Frequentiesommen van Hoofddorp".
3. G.J. STARING. "Bouw en toetsing van het hydraulisch model "Taminga-  
heerd", na bepaling van enkele fysische gegevens."  
Praktijkverslag 1972.
4. G.P. WIND. "A hydraulic model for the simulation of non-hysteretic  
vertical unsaturated flow of moisture in soils"  
Journal of hydrology, 15 (1972), p. 227 - 246.

## BIJLAGE 1:

### DE KWALITEIT VAN DE WAARNEMINGEN:

#### 1. De waterbalans:

De oorzaak van de fout in de waterbalans is het gevolg van de geringe hoogte van het drukvat ten opzichte van de elektro-magnetische verdeler (2.2.4.3.). De volgende tabel geeft een overzicht van de fouten in procenten.

Proef	1	2	3	4	5	6
Grootste fout	13	7	22	12	16	24
Gemiddelde fout	11	7	18	8	10	8,4

De gemiddelde fout is hier 9,5 %.

#### 2. De zoutbalans:

a). De grootste fouten zijn hier gemaakt bij de geleidbaarheidsmetingen.

De grootste fout bedraagt 1,61 %

De kleinste fout bedraagt 0,167%

b). De ijkgrafiek gaf aanleiding tot fouten.

1. de fout bij het aflezen van de standaard-zoutoplossingen op de geleidingsmeter.

2. de fout bij het bepalen van de waterhoeveelheden voor de standaard oplossingen 0,08 %.

3. de fout bij de bepaling van het zoutgewicht vooral de lagere concentraties (0,0001 N gaf een fout van 10%). Deze fout bedraagt voor veelvuldig voorkomende waarden 0,01% tot 0,7%.

Hier worden voor de grotere zoutconcentraties kleinere fouten gemaakt. Al met al is de grootste voorkomende fout hier 2,39%.

c). De derde fout wordt gemaakt bij het aflezen van de ijkgrafiek.

De hier gemaakte fout bedraagt ongeveer 2%.

In het ongunstigste geval wordt bij het bepalen van de zoutconcentraties een fout gemaakt van 6%, gesteld dat de menging ideaal zou zijn.

Een overzicht van de fouten in procenten van de uitgangshoeveelheid zout in het model per jaar wordt gegeven door:

Proef	1	2	3	4	5	6
Grootste fout	8,7	22,8	23	15	24	24,7
Gemiddelde fout	5,8	16,5	11,5	6,8	12,4	9,8

## GEBRUIKTE SYMBOLEN

b	breedte grondmoot	45 π	cm
d	dikte van het doorstroomde pakket		cm
D	diepte grondmoot	200	cm
g	versnelling van de vrije val	10 <sup>3</sup>	cm.sec <sup>-2</sup>
h	hoogte grondblok	40	cm
k <sub>o</sub>	verzadigde doorlatendheid	17,5	cm.dag <sup>-1</sup>
k	onverzadigde doorlatendheid		cm.dag <sup>-1</sup>
l	lengte grondblok	100	cm
L	drainafstand	11	m
L <sub>s</sub>	lengte verbindingsslangetjes		cm
m <sub>o</sub>	opbolling tussen-de-drains		cm
p	totaal poriënvolume	40%	l
P	drukverschil tussen de uiteinden van de verbindingsslangetjes		dyne.cm <sup>-2</sup>
q	debiet in model		cm.min <sup>-1</sup>
r	straal verbindingsslangetjes		cm
S	neerslag (Hooghoudt)		mm
S <sub>v</sub>	schaalfactor voor de verticale lengtematen	0,1	l
S <sub>t</sub>	schaalfactor voor de tijd	$\frac{5}{1440}$	l
S <sub>h</sub>	schaalfactor voor de hoeveelheden	0,01	l
v	stroomsnelheid van het grondwater		cm.dag <sup>-1</sup>
z	willekeurige afstand in verticale richting		cm
α	coëfficiënt formule Rijtema	0,04	cm <sup>-1</sup>
η	dynamische viscositeit	0,01	g.cm <sup>-1</sup> .sec <sup>-1</sup>
ρ	soortelijke dichtheid vloeistof	1	g.cm <sup>-3</sup>
φ	hydraulische potentiaal bodemvocht.		cm
ψ <sub>w</sub>	lokale zuigspanning bodemvocht		cm
ψ	lokale stijghoogte bodemvocht		cm
θ	vochtgehalte van grond		cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>