

ICW nota 1807

september 1987

**ALTERRA**

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



nota

AANPASSINGEN AAN HET MODEL SWATRE t.b.v. DE SIMULATIE  
VAN HET GEDRAG VAN ZWELLEDE EN KRIMPENDE KLEIGRONDEN

J.M.P.M. Peerboom

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

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 onderzoek  
nog niet is afgesloten.  
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut  
in aanmerking

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

## VOORWOORD

Dit rapport is het verslag van een driemaands onderzoek verricht aan het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen, in het kader van een 9-maands doctoraalvak Cultuurtechniek aan de Landbouwniversiteit Wageningen. Het onderzoek omvatte het aanpassen en toetsen van het computermodel SWATRE voor de simulatie van het gedrag van zwellende en krimpende kleigronden.

De begeleiding van het onderzoek was in handen van Ir. Hans Bronswijk (I.C.W.)

Het onderzoek was nooit tot een goed einde gekomen zonder de ondersteuning van vele medewerkers van het I.C.W./Staringgebouw, waarvoor mijn hartelijke dank. In het bijzonder wil ik danken:

- Ir. Hans Bronswijk, voor de steeds weer enthousiaste begeleiding en kritische noten.
- Ir. Pavel Kabat, voor het nauwgezet kritisch doorlezen en bediscussieren van het conceptverslag.
- Bennie Minnema, voor het produceren van de formules in het verslag.
- Het kantinepersoneel, voor de stipte toediening van de meer dan uitstekende koffie.

INHOUDSOPGAVE

HFDSTK. 1	INLEIDING	
HFDSTK. 2	ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN	
2.1	HET ZWEL- EN KRIMPPROCES . . . . .	3
2.2	VOLUMEBEREKENINGEN IN ZWELLEDE EN KRIMPENDE KLEIGRONDEN . . . . .	5
2.3	INFILTRATIE EN VERDAMPING IN ZWELLEDE EN KRIMPENDE KLEIGRONDEN . . . . .	7
2.3.1	Verdamping . . . . .	7
2.3.2	Infiltratie . . . . .	7
2.3.2.1	Matrix-infiltratie . . . . .	8
2.3.2.1.1	Constante Potentiaal Infiltratie . . . . .	9
2.3.2.1.2	Constante Flux Infiltratie . . . . .	12
2.3.2.2	Bypass-infiltratie . . . . .	15
HFDSTK. 3	HET MODEL SWATRE	
3.1	INLEIDING . . . . .	17
3.2	BASISALGORITME . . . . .	17
3.3	RANDVOORWAARDEN . . . . .	19
3.3.1	Bovenrandvoorwaarden . . . . .	20
3.3.1.1	Neerslag . . . . .	20
3.3.1.2	Evapotranspiratie . . . . .	21
3.3.1.2.1	Actuele Interceptieverdamping . . . . .	24
3.3.1.2.2	Actuele Transpiratie . . . . .	24
3.3.1.2.3	Actuele Bodemevaporatie . . . . .	27
3.3.2	Onderrandvoorwaarden . . . . .	28
3.3.3	Beginvoorwaarden . . . . .	29
3.4	HET PROGRAMMAVERLOOP . . . . .	29
3.5	TEKORTKOMINGEN VAN SWATRE BIJ GEBRUIK OP KLEIGRONDEN . . . . .	31
HFDSTK. 4	AANPASSINGEN AAN SWATRE (SWACR)	
4.1	BASISVERGELIJKING . . . . .	33
4.2	BEPALEN VAN DE BYPASS-TERMEN . . . . .	34
4.3	BEREKENING VAN DE GRONDWATERSTAND . . . . .	35
4.4	BEPALING TIJDSTAP . . . . .	35
4.5	HET GEBRUIK VAN VOCHTGEHALTEN . . . . .	36
HFDSTK. 5	SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986	
5.1	HET PROEFGEBIED . . . . .	37

5.2	VASTE INVOERGEGEVENS VAN HET MODEL . . . . .	38
5.2.1	Bovenrandvoorwaarden . . . . .	38
5.2.1.1	Neerslaggegevens . . . . .	38
5.2.1.2	Verdampingstermen . . . . .	38
5.2.2	Onderrandvoorwaarden . . . . .	40
5.2.3	Bodemfysische Parameters . . . . .	41
5.2.3.1	Het Bodemprofiel . . . . .	41
5.2.3.2	Waterretentiecurves . . . . .	41
5.2.3.3	Doorlatendheidskarakteristieken . . . . .	43
5.2.3.4	Krimp-karakteristieken . . . . .	44
5.2.3.5	Infiltratiecapaciteit . . . . .	44
5.3	RESULTATEN VAN DE SIMULATIE. . . . .	45
5.3.1	Simulatie Van De Grondwaterstand . . . . .	45
5.3.2	Simulatie Van De Waterbalans . . . . .	47
5.3.3	Simulatie Van De Vochtdistributie . . . . .	49
5.3.4	Simulatie Van Het Zwellen En Krimpen Van De Bodemmatrix . . . . .	52
5.4	GEVOELIGHEID BIJ DE SIMULATIE . . . . .	52
5.4.1	Invloed Van De PF-curve Op De Grondwaterstand .	52
5.4.2	Invloed Van Bypass-flow En Oppervlakteberging Op De Grondwaterstand . . . . .	54
5.4.3	Invloed Van Bypass-flow En Oppervlakteberging Op De Waterbalans . . . . .	55
5.4.4	Invloed Van De Onttrekkingsfunctie Op De Vochtverdeling . . . . .	56
5.4.5	De Invloed Van De Onttrekkingsfunctie Op De Actuele Transpiratie . . . . .	59
5.5	DISCUSSIE . . . . .	60
5.5.1	Afwijkingen Q-h-relatie . . . . .	60
5.5.2	Afwijkingen Grondwaterstand . . . . .	61
5.5.3	Afwijkingen Waterbalans . . . . .	62

HFDSTK. 6 CONCLUSIES EN VERDER ONDERZOEK

LITERATUUR

BIJLAGEN

LIJST VAN FIGUREN

Fig. 1.	Krimpkaracteristiek van een kleigrond.....	4
Fig. 2.	Het infiltratieproces in een gescheurde kleigrond.....	8
Fig. 3.	Het verloop van de sorptiviteit en factor b.....	11
Fig. 4.	Infiltratiekaracteristieken bij verschillende begin- vochtgehalten.....	13
Fig. 5.	Voortschrijding van het vochtfront in de bodem.....	14
Fig. 6.	Infiltratiesnelheid van water in krimpscheuren.....	16
Fig. 7.	Onttrekkingspatroon van plantenwortels volgens 3 concepten.....	25
Fig. 8.	Het verloop van de "sink-term".....	26
Fig. 9.	Mogelijke onderrandvoorwaarden in het programma SWATRE.....	28
Fig. 10.	Grondwaterstand-afvoer-relaties gedraineerde perceel.....	40
Fig. 11.	In het veld gemeten verband tussen vochtonttrekking en krimp..	42
Fig. 12.	pF-curven van de 4 bodemlagen.....	42
Fig. 13.	Doorlatendheidskaracteristieken van de 4 bodemlagen.....	43
Fig. 14.	Krimpkaracteristieken van de 4 bodemlagen.....	44
Fig. 15.	Verdeling bypass- en matrixinfiltratie 1986.....	46
Fig. 16.	Grondwaterstand met en zonder scheuren 1986.....	47
Fig. 17.	Opbouw van de berekende waterbalanstermen 1986.....	48
Fig. 18.	Drukhoogte- en gravimetrische vochtgehalteprofielen 1986.....	50-51
Fig. 19.	Maaiveldzakking 1986.....	52
Fig. 20.	Verloop drukhoogte en vochtgehalte dag 267 en 325 1986.....	53
Fig. 21.	Instabiele verloop van de berekende grondwaterstand.....	54
Fig. 22.	Grondwaterstand bij verschillende bergingscapaciteit 1986.....	55
Fig. 23.	Verloop drukhoogte bij verschillende con- cepten voor de wortelonttrekkingsfunctie 1986.....	57
Fig. 24.	Cumulatieve wortelonttrekking per compartiment bij verschil-	

schillende concepten voor de wortelonttrekkingsfunctie 1986...58

Fig. 25. Cumulatieve transpiratie bij verschillende wortelonttrekkings-  
functie 1986.....60

Fig. 26. Werkelijk optredend en door SWACR verondersteld horizontaal  
vochtfront.....61

#### LIJST VAN TABELLEN

Tab. 1. Berekende cumulatieve waterbalanstermen 1986.....48

Tab. 2. Belangrijkste berekende waterbalanstermen bij verschillende  
oppervlaktebergingscapaciteit 1986.....56

Tab. 3. Transpiratie bij verschillende aannamen m.b.t. de wortelont-  
trekkingsfunctie 1986.....59

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

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

Kleigronden zijn gronden die voor een aanzienlijk deel bestaan uit fijne delen. De lutumfractie (percentage kleiner dan  $2\mu\text{m}$ ) varieert van minimaal 25% tot meer dan 70%. De lutumfractie bestaat voor een groot deel uit kleimineralen. Ten gevolge van deze textuur worden kleigronden gekenmerkt door lage doorlatendheden en relatief "steile" pF-curven in het gehele vochttraject, dat wil zeggen dat een kleine vochtontrekking aan de bodem een relatief grote drukhoogteverandering veroorzaakt.

Een groot deel van het Nederlandse landbouwareaal (ong. 35%) bestaat uit kleigronden, deze gronden zijn in het midden en oosten van het land afgezet door de grote rivieren (rivierklei), en langs de kuststreek door de zee (zeeklei).

Alhoewel kleigronden vaak gunstige chemische eigenschappen bezitten, geven de fysische eigenschappen vaak aanleiding tot problemen. Met name de lage doorlatendheden en daardoor de lage infiltratiecapaciteit vooral in natte perioden zorgen ervoor dat de gronden vaak moeilijk en laat bewerkbaar zijn, dat er veelvuldig plasvorming optreedt en dat vaak versmering van de zode plaatsvindt. In hellende gebieden treedt gemakkelijk bodemerosie op, hetgeen echter in Nederland niet of nauwelijks voorkomt.

Teneinde inzicht te krijgen in de bodemfysische en hydrologische processen met als doel oplossingen te creëren voor de genoemde problemen, is het noodzakelijk om naast de uitvoering van veldonderzoek tevens het gedrag van de bodem te simuleren met behulp van modellen. Door middel van simulaties kan niet alleen het gedrag van de grond beter verklaard worden, het gedrag kan binnen zekere grenzen ook voorspeld worden.

Omdat zware kleigronden een hoog gehalte aan kleimineralen bezitten, vertonen ze zwel- en krimpverschijnselen. Deze verschijnselen manifesteren zich door verticale en horizontale scheurvorming en maaiveldzakking. Het onderzoek naar deze gronden wordt daardoor sterk bemoeilijkt; zo is de hoogte van het maaiveld niet constant en is het matrixvolume van de grond (het referentievolume voor vochtgehalten) voortdurend aan verandering onderhevig. Verder verloopt het infiltratieproces anders dan bij rigide gronden. Naast een infiltratie van boven af in de matrix treedt tevens infiltratie op in de krimp-scheuren, de zogenaamde "bypass-flow". Zowel bij de uitvoering van veldonderzoek als bij de uitvoering van modelsimulaties moet rekening gehouden worden met het optreden van deze verschijnselen.

Het model SWATRE (FEDDES e.a., 1978, BELMANS e.a., 1983), is een computermodel om de waterbeweging in de onverzadigde zone van een begroeide grond te simuleren, voor die gevallen waarbij de stroming als een-dimensionaal verticaal voorgesteld kan worden. Behalve voorspelling van

## INLEIDING

de vocht- en drukverdeling in het bodemprofiel, de potentiële en actuele evapotranspiratie en de grondwaterstand, is het mogelijk dit model te koppelen aan gewasopbrengstmodellen, zoals het model CROPR. SWATRE is reeds veelvuldig beproefd op uiteenlopende bodemprofielen (onder andere FEDDES en DE GRAAF, 1982, DE GRAAF, 1982, OVERMARS, 1982). Toepassing van het model op zwellende en krimpende zware kleigronden is echter tot nu toe niet goed mogelijk gebleken, ten gevolge van de hierboven beschreven moeilijkheden.

In het onderzoek waar dit rapport een weergave van is, is getracht om het model SWATRE op enige punten aan te passen, opdat dit model ook bruikbaar is voor simulaties van het gedrag van kleigronden. Het resultaat met het oorspronkelijke model SWATRE en het aangepaste model SWACR is getoetst aan veldmetingen uitgevoerd gedurende 1986 op een knipkleiperceel in Oosterend (Friesland).

In het navolgende worden eerst de eigenschappen van zwellende en krimpende gronden behandeld. Daarna worden in hoofdstuk 3 enige achtergronden gegeven bij het model SWATRE in zijn oorspronkelijke vorm. Hoofdstuk 4 beschrijft de aanpassingen die aan het model verricht zijn. Hoofdstuk 5 tenslotte doet verslag van de uitvoering en de resultaten van de simulaties, uitgevoerd op het knipkleiperceel over het jaar 1986.



## HOOFDSTUK 2

### ZWELLEND EN KRIMPENDE GRONDEN

#### 2.1 HET ZWEL- EN KRIMP-PROCES

Onder invloed van vochtverlies, door bijvoorbeeld verdamping of wegzijging, neemt het volume van een kleigrond af. Dit komt omdat een kleigrond voor een groot deel bestaat uit kleiplaatjes omgeven door watermantels. Bij vochtverlies wordt er water aan deze mantels onttrokken, waardoor de kleiplaatjes met watermantels naar elkaar toe bewegen, en het totale bodemmatrixvolume afneemt. Deze volumeafname kan in alle richtingen gelijk (isotrope krimp) of in verschillende richtingen verschillend (anisotrope krimp) van grootte zijn, afhankelijk van de fysische eigenschappen van de bodem, de belasting van het oppervlak etc. De volumeafname heeft tot gevolg dat in deze gronden krimpscheuren optreden, met name in verticale echter soms ook in horizontale richting.

De volumeveranderingen dragen er zorg voor dat de kleine poriën tussen de bodemdeeltjes die eerst gevuld waren met water, gevuld worden met bodemmateriaal. De grotere poriën in de bodem nemen niet of nauwelijks deel aan het proces. Bij deze grotere poriën handelt het vooral om poriën van biogene oorsprong bijvoorbeeld wormgaten. Deze biogene poriën zijn vooral te vinden in de bovenste decimeters van het bodemprofiel. Dieper in het bodemprofiel kunnen echter ook grotere poriën ontstaan met name onder invloed van het rijpingsproces van de bodem. Ook is het mogelijk dat zich grotere poriën ontwikkelen in de bodem door de plaatselijke pakking van de bodemdeeltjes.

Een goede weergave van het zwel- en krimpproces is de zogenaamde krimp-karakteristiek. De krimp-karakteristiek geeft de relatie weer tussen vochtgehalte en poriëngehalte van een bodem. Gezien het voortdurend wisselende volume van de bodemmatrix (vaste fase van de bodem inclusief poriën, exclusief krimpscheuren), is het raadzaam om bij dergelijke karakteristieken niet het volumevochtgehalte te beschouwen, dat gerelateerd is aan het matrixvolume, maar het bodemvochtgetal gedefinieerd als volume vocht/volume vaste fase. Om dezelfde reden is het raadzaam om in plaats van het poriëngehalte, het poriëngetal te gebruiken, gedefinieerd als volume poriën/volume vaste fase.

Met behulp van een krimp-karakteristiek kan een vochtonttrekking gerelateerd worden aan een volumeverandering van de bodemmatrix. Of deze volumeverandering zichtbaar wordt als maaiveldzakking en/of krimpscheuren, hangt af van de geometrie van het zwel- en krimpproces. Een gerijpte kleigrond zal meestal isotrope, dus in alle richtingen gelijke, krimp vertonen.

ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN

Indien de aard en geometrie van het krimpproces bekend zijn kan uit de 3-dimensionale volumeverandering volgend uit de krimpkarakteristiek, de maaiveldzakking berekend worden uit (BRONSWIJK, 1986b):

$$\left(1 - \frac{\Delta z}{z}\right)^{r_s} = \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) \quad (1)$$

- V : originele volume bodemonsters [m<sup>3</sup>]
- ΔV : volumeverandering bodemonsters [m<sup>3</sup>]
- z : originele hoogte van het bodemonster [m]
- Δz : zakking [m]
- r<sub>s</sub> : dimensiloze geometriefactor [-]

De geometriefactor r<sub>s</sub> heeft in geval van isotrope krimp de waarde 3.

In figuur 1. is een krimpkarakteristiek gegeven van de knipkleigrond die bij het onderzoek betrokken is geweest.

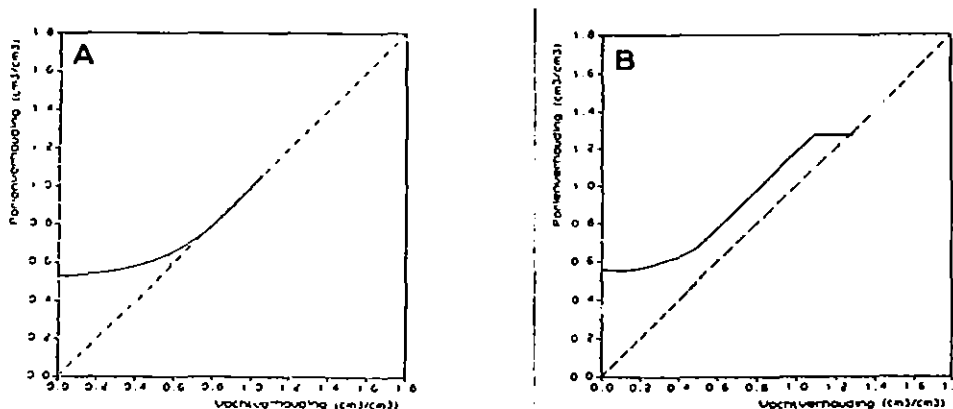


Fig. 1. krimpkarakteristiek van een knipkleigrond.  
 a. karakteristiek van de bodemmatrix.  
 b. karakteristiek van de veldbodem inclusief grote poriën.

Figuur 1a laat de karakteristiek zien van de bodemmatrix, dus de bodem zonder grote poriën die niet aan het krimpproces deelnemen. Figuur 1b toont de karakteristiek van de veldbodem, dat wil zeggen de bodemmatrix inclusief de grotere poriën die niet deelnemen aan het krimpproces.

Uit figuur 1a volgen de 3 fasen waarin het krimpproces zich kan bevinden (BRONSWIJK 1985, 1986b):

1. Normale krimp (de/dV = 1)  
 Iedere volume vochtonttrekking heeft een even groot volume krimp tot gevolg, dat wil zeggen dat de plaats van ieder deeltje onttrokken vocht ingenomen wordt door bodemmateriaal.
2. Rest krimp (de/dV < 1)  
 De vochtonttrekking is groter dan de afname van het bodemvolume, dat wil zeggen dat de plaats van het onttrokken vocht voor een deel

## ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN

ingenomen wordt door bodemmateriaal en voor een ander deel door intredende lucht.

### 3. Nul krimp ( $de/d\psi = 0$ )

Er treedt geen volumeverandering meer op ten gevolge van vochtonttrekking, dat wil zeggen dat de plaats van alle uittredende water ingenomen wordt door intredende lucht.

De karakteristiek zoals die in figuur 1a gegeven is geldt voor een kluit grond die alleen bestaat uit bodemmateriaal (voornamelijk kleiplaatjes) en water dat zich in de poriën tussen het bodemmateriaal bevindt. In het veld worden echter vaak afwijkende karakteristieken gevonden. Dit wordt veroorzaakt door het voorkomen van grotere poriën die niet aan het krimpproces deelnemen, zoals bioporiën, rijpingsscheuren etc. Indien er water aan de veldbodem onttrokken wordt, gebeurt dat meestal eerst uit deze grotere poriën. Deze vochtonttrekking heeft geen effect op het volume van de bodem. Deze vierde fase in het krimpproces wordt "structuurkrimp" genoemd, en treedt op voor de "normale krimp" bij uitdroging van de grond. Een voorbeeld van de krimp karakteristiek in zo'n geval is in figuur 1b. gegeven.

## 2.2 VOLUMEBEREKENINGEN IN ZWELLEDE EN KRIMPENDE KLEIGRONDEN

Vanwege de volumeveranderingen van de bodemmatrix bij zwellende en krimpende gronden, worden niet de gebruikelijke uitdrukkingen gebruikt voor vocht- en poriegehalte.

In niet krimpende (rigide) bodems worden de volgende uitdrukkingen meestal gebruikt:

$$\text{volume vochtgehalte} : \theta_v = \theta = \frac{V(\text{water})}{V(\text{matrix})} \quad (2)$$

$$\text{porositeit} : \epsilon = n = \frac{V(\text{matrix}) - V(\text{vaste fase})}{V(\text{matrix})} \quad (3)$$

Voor zwellende en krimpende gronden verdienen de volgende uitdrukkingen vanwege de variatie in het uitgangsvolume de voorkeur (BRONSWIJK, 1986b):

$$\text{bodemvochtgetal} : \gamma = \frac{V(\text{water})}{V(\text{vaste fase})} \quad (4)$$

of

$$\text{gewicht vochtgehalte} : \theta_g = w = \frac{V(\text{water})}{V(\text{vaste fase}) * \rho} \quad (5)$$

ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

$$\text{poriëngetal} \quad : e = \frac{V(\text{matrix}) - V(\text{vaste fase})}{V(\text{vaste fase})} \quad (6)$$

Bij het bepalen van vocht karakteristieken in het laboratorium (met behulp van de verdampingsmethode bijvoorbeeld (zie onder ander BEUVING, 1984), wordt vaak geen rekening gehouden met het zwel- en krimpgedrag van kleigronden. De aldus verkregen pF-curven en doorlatendheidskarakteristieken, zijn dan niet gebaseerd op het vochtgetal in het monster noch op het wisselende matrixvolume. De vochtgehalten in deze karakteristieken zijn gerelateerd aan het volume van de in verzadigde toestand volkomen gevulde ring. Indien het monster bij uitdroging krimpt, wordt het vochtgehalte bepaald met het volume van ring als referentie. Dit is in geval van een gekrompen monster het volume van de bodenmatrix inclusief scheuren m.a.w.

$$\text{laboratorium vochtgehalte } \theta_L = \frac{V(\text{water})}{V(\text{matrix}) + V(\text{scheuren})} \quad (7)$$

Deze vochtgehalten zijn om te rekenen naar volume vochtgehalten met behulp van een krimpkarakteristiek. Eenvoudiger is het om deze vochtgehalten om te rekenen naar uitdrukkingen zoals (4) en (5), waarbij het relatieve volume van de vaste fase berekend kan worden aan de hand van de verzadigde vochtgehalten van de grond:

$$V(\text{vaste fase}) = 1 - \theta_v(\text{sat}) \quad (8)$$

$$\theta_v(\text{sat}) : \text{verzadigde vochtgehalte [m}^3/\text{m}^3]$$

De doorlatendheidskarakteristieken worden tegelijkertijd met de pF-curven in het laboratorium bepaald. Dezelfde omrekeningsmethoden voor het vochtgehalten moeten dan gehanteerd worden. Bij deze bepalingen wordt echter aan de hand van de gemeten drukverdeling in de grond en de hoeveelheid onttrokken water, een doorlatendheid bepaald. Hier wordt echter ook geen rekening gehouden met volumeveranderingen. Aangezien de doorlatendheid een uitdrukking is voor de hoeveelheid water die door een eenheidsoppervlak met een eenheidsdrukgradient stroomt, moet hier echter wel rekening mee gehouden worden omdat het eenheidsoppervlak en wellicht ook de eenheidslengte waarover de gradient heerst, ook onderhevig zijn aan het krimpproces. Gezien de nauwkeurigheid van de beschreven methode zullen de fouten die hiermee optreden echter klein zijn.

## ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

### 2.3 INFILTRATIE EN VERDAMPING IN ZWELLENDEN EN KRIMPENDE KLEIGRONDEN

#### 2.3.1 Verdamping

Het zwellen en krimpen van de bodemmatrix heeft invloed op zowel de bodemevaporatie (bodemverdamping) als de transpiratie (plantverdamping).

De transpiratie kan door scheurvorming sterk beperkt worden omdat een deel van de neerslag die normaal in de wortelzone infiltreert in de scheuren terecht komt en versneld gedraineerd wordt, en zodoende niet meer beschikbaar is voor de plant. Meer over dit proces is te vinden in de volgende paragraaf.

Ook wordt door de scheurvorming het wortelstelsel beïnvloed; plantenwortels staan onder invloed van de omringende krimpende grond, dit zal ongetwijfeld invloed hebben op de opnamecapaciteit en daarmee op de actuele transpiratie van het gewas. Ook zullen delen van het wortelstelsel in contact komen met de buitenlucht in de scheuren hetgeen ook gevolgen heeft voor de opnamecapaciteit. Of deze verschijnselen negatieve of positieve effecten op de opnamecapaciteit hebben valt moeilijk te zeggen. HASEGAWA en SATO (1987) vinden een positief effect van het voorkomen van krimpscheuren op de opnamecapaciteit van plantenwortels doordat sommige wortels in de scheuren extreem diep kunnen groeien, en daardoor water uit diepere minder droge lagen kunnen onttrekken.

De drukhoogten lopen in zware gronden snel op bij relatief kleine wateronttrekkingen in het gehele traject van de pF-curve, hierdoor wordt de opnamecapaciteit van de wortels in het hele traject van vochtgehalten snel gereduceerd bij relatief kleine vochtonttrekkingen, dit is echter geen direct gevolg van het zwellen en krimpen van de grond.

Vooraf de eerste twee effecten zijn moeilijk fysisch te beschrijven, aangezien deze sterk afhankelijk zijn van de soort begroeiing, de richting en hevigheid van het krimpproces etc. Simulatie van deze processen kan dan ook alleen geschieden door verregaande simplificaties en aannamen.

De invloed van scheurvorming op de bodemevaporatie kan ook aanzienlijk zijn. Door de vorming van krimpscheuren wordt het contactoppervlak tussen bodem en buitenlucht sterk uitgebreid, afhankelijk van de vorm en diepte van de verticale scheuren. Daarnaast geldt voor het contactoppervlak dieper in de scheuren een hogere (bijna verzadigde) doorlatendheid van de bodem in vergelijking met de doorlatendheid aan het maaiveld, omdat de scheuren veelal reiken tot aan het grondwaterniveau. Hierdoor wordt de potentiële bodemevaporatie minder gereduceerd dan aan het maaiveld. Ook heerst in de krimpscheuren een hogere turbulentie van de lucht dan aan het maaiveld, die de potentiële bodemevaporatie kan doen laten toenemen tot hogere waarden die dan die aan het maaiveld. RITCHIE en ADAMS (1974) vinden een aandeel van 80% van de krimpscheuren in de totale actuele bodemevaporatie, in geval van een onbegroeide en sterk uitdrogende grond. Bij een begroeide grond onder Nederlandse omstandigheden zal dit aandeel echter aanzienlijk minder worden, en bij hoge bedekkinggraden zelfs verwaarloosbaar klein.

#### 2.3.2 Infiltratie

Als gevolg van de aanwezigheid van krimpscheuren in de bodem verloopt het infiltratieproces in zwellende en krimpende gronden anders dan in rigide gronden. In figuur 2 is dit infiltratieproces schematisch weergegeven.

## ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

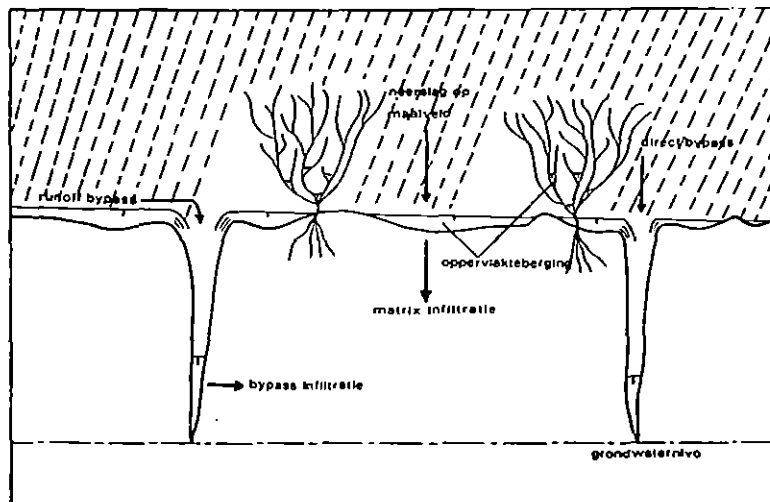


Fig. 2. Het infiltratieproces in een gescheurde kleigrond.

De infiltratie bestaat uit 3 componenten, te weten:

- infiltratie van neerslag aan het maaiveld in de bodemmatrix, zoals in rigide gronden voornamelijk plaatsvindt, de zogenaamde matrix-infiltratie.
- infiltratie van neerslag rechtstreeks in de krimp-scheuren, de zogenaamde direct-by-pass-flow.
- infiltratie van neerslag die op het maaiveld terecht komt maar niet in de matrix kan infiltreren ten gevolge van een te kleine infiltratiecapaciteit. Na het overtreffen van de oppervlaktebergingscapaciteit stroomt ook deze neerslag in de krimp-scheuren, de zogenaamde runoff-by-pass-flow.

De hoeveelheid matrix- en runoff-by-pass-flow is complementair, en wordt bepaald door de infiltratiecapaciteit van de bodemmatrix en de bergingscapaciteit van het maaiveld. De hoeveelheid direct-by-pass-flow is afhankelijk van de grootte van het scheuroppervlak en wordt volledig bepaald door de vochttoestand van de bovenste centimeters in het bodemprofiel.

### 2.3.2.1 Matrix-infiltratie

De verticale infiltratie in de bodemmatrix wordt bepaald door twee krachten, namelijk de zwaartekracht en de capillaire kracht die de bodem op het water uitoefent (drukhoogte). In droge bodems overheersen de capillaire krachten, in natte bodems overheerst de zwaartekracht.

De verticale infiltratie in de bodemmatrix is maximaal indien er zich een laag water op het maaiveld bevindt. Deze maximale matrixinfiltratie  $I_{max}$  wordt bepaald door de zwaartekracht die steeds constant is, en de drukhoogtegradient tussen het bodemoppervlak en het vochtfront. In natte gronden is deze drukhoogtegradient kleiner dan in droge gronden, zodat in droge gronden de maximale matrixinfiltratie groter is dan in natte gronden,

## ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN

in een volkomen verzadigde grond is de drukhoogte zelfs gelijk aan 0,  $I_{max}$  wordt dan gelijk aan de verzadigde doorlatendheid  $K_s$ .

Tijdens het verloop van de infiltratie wordt de afstand tussen bodemoppervlak en het begin van het vochtfront steeds groter, dit betekent dat bij gelijkblijvende drukhoogten (geen waterbeweging behalve die in het vochtfront) de gradient afneemt. Dit betekent dat de  $I_{max}$  in de tijd afneemt, in het extreme geval als het hele bodemprofiel verzadigd is, tot de verzadigde doorlatendheid  $K_s$ .

Bovenstaande geldt voor de infiltratie van water in de bodemmatrix indien er zich een hoeveelheid vrij water aan het maaiveld bevindt, de zogenaamde constante potentiaal infiltratie. In werkelijkheid treedt deze situatie echter niet meteen op nadat er neerslag op het maaiveld terecht komt. Eerst zal de neerslag met de intensiteit waarmee deze op het bodemoppervlak terecht komt in de bodemmatrix infiltreren zonder de vorming van plassen, de zogenaamde constante flux infiltratie. Of de neerslag plasvorming zal veroorzaken hangt af van de neerslagintensiteit:

- indien de neerslagintensiteit  $P$  kleiner is dan de verzadigde doorlatendheid  $K_s$  van de bodem zal nooit plasvorming optreden, aangezien  $K_s$  de minimale infiltratie beschrijft in de situatie dat de capillaire krachten geen invloed meer hebben.
- indien  $P$  groter is dan de maximale infiltratie  $I_{max}$  van de grond bij een bepaald vochtgehalte, treedt onmiddellijk plasvorming op.
- indien  $P$  groter is dan  $K_s$  maar kleiner dan  $I_{max}$ , treedt na verloop van tijd plasvorming op, aangezien het met een constante flux infiltrerende water het bodemprofiel steeds natter maakt en dus de infiltratiesnelheid kleiner.

In het navolgende zal eerst de theorie van de constante potentiaal infiltratie beschreven worden, daarna zal ingegaan worden op het proces dat zich hiervoor afspeelt, deze constante flux infiltratie. In de beschrijving wordt steeds uitgegaan van een bodemprofiel dat in beginsel een uniforme vochtverdeling heeft.

### 2.3.2.1.1 Constante Potentiaal Infiltratie

Voor de beschrijving van maximale infiltratie in verschillende bodems onder een constante potentiaal, zijn veel verschillende uitdrukkingen in omloop, met name met betrekking tot infiltratie in isotrope grond met een uniforme vochtverdeling. De meeste uitdrukkingen vertonen veel gelijkenis met de empirisch bepaalde formule van Kostiaikov uit 1932:

$$I(t) = C * t^{\alpha} \quad (9)$$

$I(t)$  = cumulatieve infiltratie op tijdstip  $t$  [m]

$t$  = tijd [dag]

$C, \alpha$  = nader te bepalen empirische constanten

ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN

De constanten in de formule hebben echter geen vaste fysische betekenis, bovendien wordt er geen onderscheid gemaakt tussen de stroming onder invloed van de capillaire krachten en die onder invloed van de zwaartekracht.

De formule van Philip uit 1957, maakt duidelijk onderscheid in deze twee stromingen, door het introduceren van een lineaire term in de vergelijking, die de invloed van de zwaartekracht representeert (samen met hogere orde termen die echter verwaarloosbaar klein zijn):

$$I(t) = S(\theta) * \sqrt{t} + A * t \quad (10)$$

$$S(\theta) = \text{sorptiviteit van de bodem [m/d}^{\frac{1}{2}}\text{]}$$

$$\theta = \text{vochtgehalte [m}^3\text{/m}^3\text{]}$$

$$A = \text{nader te bepalen constante [m/d]}$$

Uit de formule volgt duidelijk dat de invloed van de capillaire kracht afneemt in de loop van het infiltratieproces, en dat de invloed van de zwaartekrachtcomponent steeds groter wordt.

HESTERS (1985) leidt af dat voor  $t$  naderend naar 0, de formule van Philip overgaat in die van Kostiaikov waarbij  $\alpha$  en  $C$  op respct. 0.5 en  $S(\theta)$  gesteld worden, en dat voor  $t$  naderend naar oneindig beide formules in elkaar overgaan door voor  $\alpha$  en  $C$  respct. 1 en  $K_s$  (verzadigde doorlatendheid) te nemen.

De sorptiviteit die in de formule gebruikt wordt, is afhankelijk van het initieel vochtgehalte van de grond aan het begin van de infiltratie ( $\theta_1$ ), het verzadigd vochtgehalte van de grond ( $\theta_s$ ) en de diffusiviteit van de grond  $D(\theta) = (k(\theta)/(d\theta/dh))$ . De sorptiviteit neemt af naarmate het bergingsvermogen van de grond kleiner wordt, dus indien het initieel vochtgehalte groter wordt.

STROOSNIJDER (1975) geeft een uitdrukking voor de infiltratiecapaciteit van de grond, waarin alle constanten een vast omschreven fysische betekenis hebben:

$$I(t) = S(\theta)/b(\theta) * (1 - e^{-b(\theta)*\sqrt{t}}) + K_s * t \quad (11a)$$

$$i(t) = \frac{dI}{dt} = 0.5 * S(\theta) * 1/\sqrt{t} * e^{-b(\theta)*\sqrt{t}} + K_s \quad (11b)$$

$$b(\theta) = \text{constante gelijk aan } 4 * K_s / 3S(\theta) \text{ [1/dag}^{\frac{1}{2}}\text{]}$$

$$K_s = \text{verzadigde doorlatendheid [m/d]}$$

Evenals in de vorige formule bepaalt het eerste lid de invloed van de capillaire krachten op de infiltratiesnelheid. In de formule bepaald de waarde van de parameter  $b(\theta)$  de snelheid van afzwakken van deze capillaire kracht op de infiltratie. De tweede term bepaald de invloed van de zwaartekracht. In figuur 3. is het verloop van de sorptiviteit met het vochtgehalte gegeven, zoals die voor de grond die bij het onderzoek



ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

betrokken is geweest bepaald is uit de bodemkarakteristieken.

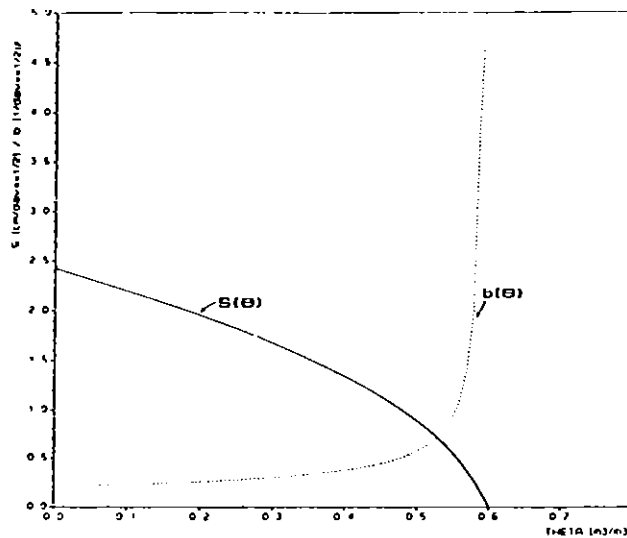


Fig. 3. Het verloop van de uit de bodemkarakteristieken bepaalde sorptiviteit en de parameter b voor het onderzoeksperceel.

Ook de formule van Stroosnijder nadert onder bepaalde omstandigheden naar die van Philip en van Kostjakov; voor kleine t nadert de e-macht in de formule naar  $1 - b\sqrt{t} + \frac{1}{2}b^2 t$ . De parameter A in de formule van Philip kan dan uitgedrukt worden door  $(1 - Sb/2K_{sw})K_{sw} t$ . Figuur 4. (volgende paragraaf) toont het verloop van de infiltratiecapaciteit en de cumulatieve infiltratie voor een kleigrond volgend de uitdrukking van Stroosnijder.

Alhoewel de formule uit STROOSNIJDER (1975) duidelijk omschreven parameters bevat, is een exacte bepaling hiervan niet eenvoudig. Het bepalen van de sorptiviteit is een moeilijke zaak. In principe is deze factor te bepalen uit de pF-curve en de doorlatendheidskarakteristiek van de grond, STROOSNIJDER (1975) geeft hiervoor enkele mogelijkheden, waaronder:

$$S = 2 * (\theta_s - \theta_i) * \sqrt{D(\theta)/\pi} \quad \text{in het geval } D = \text{constant} \quad (12)$$

$$S(\theta) = \left( 2 * \int_{\theta_i}^{\theta} S(\theta - \theta_i) * D(\theta) d\theta \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{in het geval } D = f(\theta) \quad (13a)$$

of in discrete vorm:

$$S(\theta) = \left( 2 * \sum_{\theta-\theta_i}^{\theta} \{ (\theta - \theta_i) * D(\theta) * \Delta\theta \}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (13b)$$

Aangezien de diffusiviteit meestal niet als constant beschouwd kan

ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

worden, biedt formule (13) meer toepassingsmogelijkheden. Echter de helling van de pF-curve en de waarde van de doorlatendheid in het nattere traject is hier van overheersende invloed, en moeilijk te bepalen. STROOSNIJDER (1975) komt m.b.v. deze berekeningen uit de pF-curve en doorlatendheidskarakteristiek, voor zware, zeelei tot een sorptiviteit van 1.94 cm/dag<sup>1/2</sup> en een factor b van 0.15 1/dag<sup>1/2</sup>, bij een volkomen uitgedroogde bodemmatrix.

Een directe bepaling van de sorptiviteit in het veld voor verschillende vochtgehalten, verdient echter sterk de voorkeur. STROOSNIJDER (1976) en CLOTHIER et al (1981) geven hiervoor enkele methoden.

2.3.2.1.2 Constante Flux Infiltratie

Indien neerslag op het bodemoppervlak terecht komt zal in het begin alle neerslag direct infiltreren in de bodemmatrix, de zogenaamde constante flux infiltratie. De infiltratiesnelheid is dan gelijk aan de neerslagintensiteit. Deze infiltratiesnelheid is altijd kleiner dan de infiltratiesnelheid die optreedt onder een constante potentiaal aan het oppervlak, die immers de maximale infiltratiesnelheid representeert.

Tijdens de constante flux infiltratie treedt er geen aaneengesloten vochtfront in de bodem op, zoals dat wel gebeurt tijdens de constante potentiaal infiltratie. Toepassing van de formules van Kostikov, Philip of Stroosnijder is dan niet meer mogelijk, aangezien er geen constante potentiaal aan het maaiveld en geen aaneengesloten vochtfront optreedt. Pas na verloop van tijd, als er plasvorming optreedt, gaat de constante flux infiltratie over in een constante potentiaal infiltratie. Eerst moet dus het tijdstip waarop plasvorming optreedt berekend worden.

PERROUX (1981) en CLOTHIER (1981), geven een benaderde formule voor het tijdstip waarop plasvorming optreedt in een constante flux situatie:

$$t_p = S(\theta)^2 / 2 * i * (i - k_s) \quad (14)$$

- t<sub>p</sub> : tijd tot aan plasvorming [d]
- i : constante flux [cm/d]
- S(θ) : sorptiviteit [cm/√d]
- k<sub>s</sub> : verzadigde doorlatendheid [cm/d]

Indien de formules voor de constante potentiaal infiltratie toegepast zouden worden voor de constante flux situatie, waarbij het tijdstip van plasvorming gesteld zou worden op het tijdstip waarop de maximale infiltratie bij constante potentiaal gelijk geworden is aan de neerslagintensiteit, zou dit leiden tot kleinere waarden voor t<sub>p</sub>. Dit komt omdat in een constante potentiaal infiltratie steeds de maximale infiltratie I<sub>max</sub> optreedt, in dezelfde tijd kan dus meer water infiltreren in de bodemmatrix, waardoor de infiltratiecapaciteit met name in het begin van de infiltratie sneller afneemt in vergelijking met de constante flux situatie. Indien de flux groot is t.o.v. van de verzadigde doorlatendheid, blijkt dat t<sub>p</sub> twee keer zo groot is als b.v. bij de eerder beschreven (foutieve) toepassing van de formule van Kostikov met a = 0.5 en C = S(θ).

ZWELLEND EN KRIMPENDE GRONDEN

In figuur 4a is het theoretische verloop van de maximale infiltratie bij een constante potentiaal gegeven, met daarin horizontale lijnen die de constante flux beschrijven. In figuur 4b is het verloop van de cumulatieve infiltratie gegeven in beide gevallen, waarbij de rechte lijnen de cumulatieve infiltratie bij constante flux beschrijven.

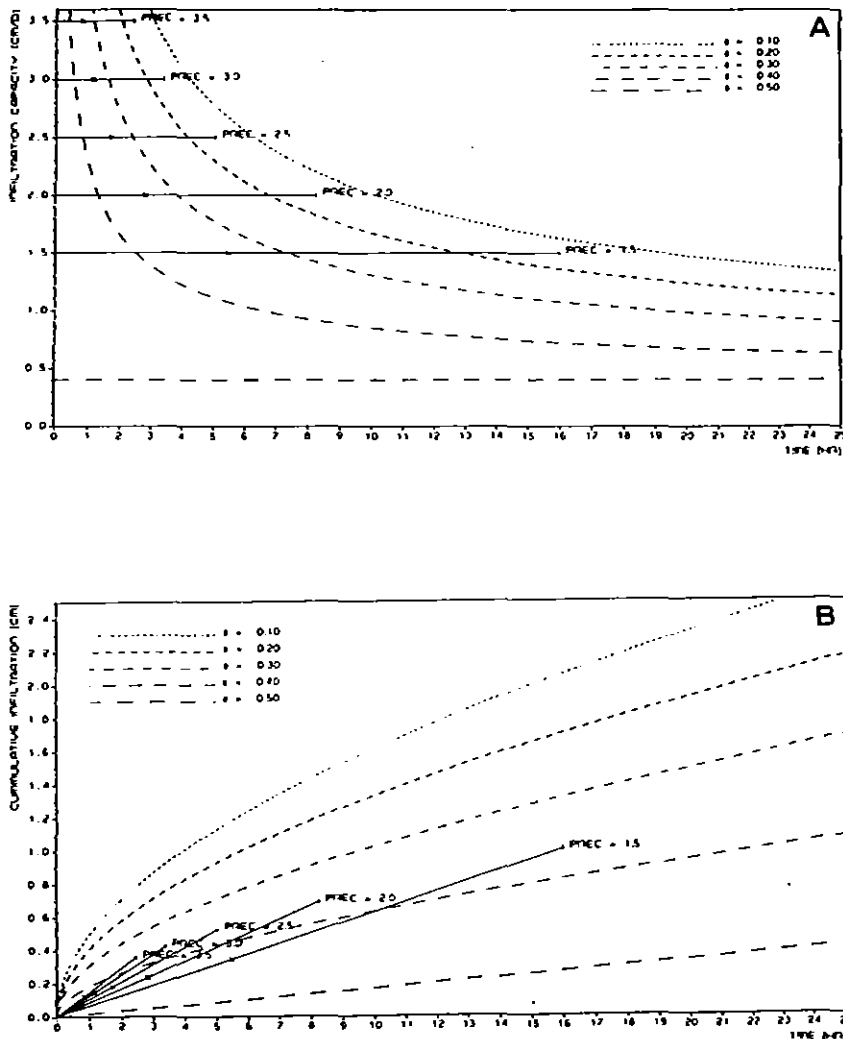


Fig. 4. Het infiltratieproces bij verschillende beginsituaties berekend met behulp van de formules van Stroosnijder.  
 a. verloop van de maximale infiltratie bij constante potentiaal en verschillende vochtgehalten bij de start van infiltratie.  
 b. idem. maar voor de cumulatieve infiltratie.

x = tijdstip van plasvorming voor  $\theta = 0.4$   
 + = tijdstip van plasvorming voor  $\theta = 0.3$

De snijpunten van de horizontale constante flux lijnen en de kromme maximale infiltratielijnen bij constante potentiaal in figuur 4a. geven de tijdstippen waarop plasvorming zou optreden indien (ten onrechte) de formules voor de constante potentiaal infiltratie gebruikt zouden worden bij de bepaling van het tijdstip waarop plasvorming optreedt. De punten gemerkt met "x" en "+" geven de tijdstippen waarop plasvorming zou optreden in geval

ZWELLEDE EN KRIMPENDE GRONDEN

van een initieel vochtgehalte van 0.3 respectievelijk 0.4 bij verschillende fluxen, bij toepassing van formule (14) die het proces beter beschrijft.

Uit de figuur blijkt duidelijk dat de fout die gemaakt wordt bij toepassen van de constante potentiaal theorie voor wat betreft de hoeveelheid water die geborgen of afgevoerd wordt, relatief het grootst is bij lage fluxen en lage vochtgehalten.

Indien  $t_p$  bepaald wordt met formule (14), is het tijdstip van plasvorming bekend, de afname van de infiltratiecapaciteit die in de tijd tussen het begin van de neerslag en  $t_p$  heeft plaatsgevonden is dan echter nog niet bekend, aangezien deze afhankelijk is van het vochtgehalte in het profiel op het tijdstip  $t_p$ , of algemener de "geschiedenis" van het optredende vochtfront.

Deze infiltratiecapaciteit is waarschijnlijk voor slechtdoorlatende gronden te benaderen door te stellen dat het vocht zich weliswaar verdeeld gedurende de constante flux infiltratie, maar dat op het moment van plasvorming het tot dan toe diffuse vochtfront in een keer volledig verzadigd raakt, zoals in figuur 5. schematisch weergegeven is.

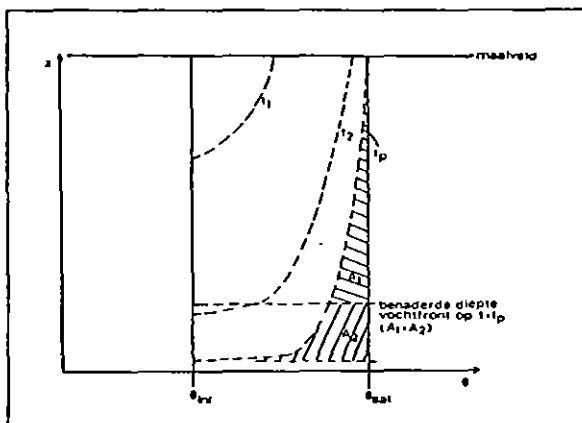


Fig. 5. Voortschrijding van een vochtfront in de bodem op verschillende tijdstippen, en de toegepaste benadering van het vochtfront op tijdstip van plasvorming.

De situatie is dan identiek aan een constante potentiaal infiltratie waarbij het tijdstip waarop de infiltratie zich zou bevinden, berekend kan worden aan de hand de hoeveelheid water die reeds geïnfiltreerd is tijdens de constante flux, b.v. door toepassing van de (analytisch eenvoudigste) formule van Kostiakov:

$$T_{infil} = (I_s / S)^2 \quad (15)$$

$T_{infil}$  : virtuele tijd waarop constante infiltratie zich bevindt [d]

$I_s$  : tijdens constante flux geïnfiltreerde hoeveelheid water [m]

$S(\theta)$  : sorptiviteit tijdens het begin van de constante flux infiltratie [cm/ $\sqrt{d}$ ]

## ZWELLEND EN KRIMPENDE GRONDEN

De maximale infiltratie op tijdstip  $t_p$  is dan gelijk aan de maximale infiltratie die zou optreden op tijdstip  $T_{infil}$  bij een constante potentiaal infiltratie vanaf het begin. Deze kan bijvoorbeeld berekend worden aan de hand van formule (13b). De tijd die in de formule ingevuld moet worden na  $t_p$  is dan de tijd vanaf  $t_p$  vermeerderd met de tijd  $T_{infil}$ .

### 2.3.2.2 Bypass-infiltratie

Indien neerslag op het maaiveld terecht komt, zal een gedeelte hiervan in de scheuren terecht komen. Deze zogenaamde direct-bypass-flow is rechtevenredig met het oppervlak dat de scheuren aan de bovenkant van het profiel innemen. Ook als de bodem begroeid is zal deze onderschepping plaatsvinden, echter dan indirect. Eerst zal de neerslag op het gewas terechtkomen, waarna een gedeelte als zogenaamde interceptieverdamping zal verdwijnen. Afhankelijk van het patroon van de scheuren en de vorm van het gewas zal een gedeelte vervolgens in de scheuren en een gedeelte op het bodemoppervlak terecht komen, in de vorm van vallende druppels en/of stroming langs de stengels van de planten.

Indien de infiltratiecapaciteit van de bodemmatrix tussen de scheuren niet groot genoeg is om al het aangeboden water in de matrix te bergen treedt zogenaamde runoff-bypass-flow op van het overschot aan water. Voordat dit zal plaatsvinden zal eerst de berging aan het oppervlak in de vorm van plassen en in de vorm van druppels op het gewas gevuld worden. Vooral de berging op het bodemoppervlak zal naarmate er meer scheuring optreedt, snel minder worden, aangezien er geen stabiele waterlens gevormd kan worden ten gevolge van de onderbrekingen van het maaiveld door scheuren.

Het water dat uiteindelijk in de scheuren terecht komt, stroomt in beginsel zo diep mogelijk naar beneden onder invloed van de zwaartekracht, een gering gedeelte zal tijdens dit proces horizontaal infiltreren in de passerende bodemlagen, door de wanden van de scheuren (HOOGMOED en BOUMA, 1980).

Aangezien zware kleigronden reeds bij een geringe vochtonttrekking krimpen, lopen de scheuren in het algemeen door tot aan het grondwaternivo. Het water dat in de scheuren stroomt zal op de bodem van de scheuren terecht komen. Indien het debiet van het water dat in de scheuren stroomt groter is dan de infiltratiecapaciteit van de de scheurwanden die aan de infiltratie deelnemen, zal het waternivo in de scheuren toenemen, en zullen ook hogere lagen in het profiel meedoen met de infiltratie. Het stijgen van het water in de scheuren heeft echter tot gevolg dat de drijvende kracht voor de infiltratie, het drukverschil tussen bodem en oppervlaktewater in de scheuren, verandert en dat de infiltratiecapaciteit dieper in de scheuren, groter wordt. Meestal bereikt het proces na verloop van tijd een stationaire toestand. Na beëindiging van de neerslag zakt het nivo van het water in de scheuren weer. Dit proces is weergegeven in figuur 6.

ZWELLENDEN EN KRIMPENDE GRONDEN

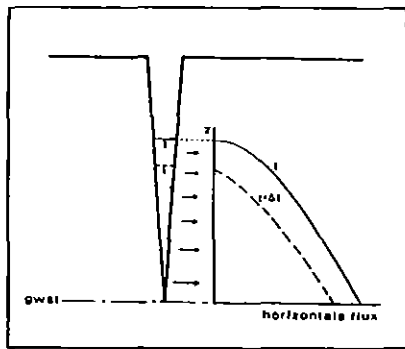


Fig. 6. Infiltratiesnelheid van water in krimpscheuren op twee tijdstippen met een verschillend waternivo in de scheuren. (vorm van de curves is arbitrair).

In het geval van voorkomen van horizontale scheuren in het bodemprofiel zal de infiltratie via de verticale scheuren, ook in de horizontale scheuren plaatsvinden.

Voor het doen van een uitspraak over de precieze verdeling van de bypass-infiltratie in de scheuren is een grote hoeveelheid informatie noodzakelijk over de richting en geometrie van het krimproces, omdat het totale oppervlak van de scheurwanden waardoor infiltratie plaatsvindt van groot belang is. Bovendien is een oplossing voor het systeem slechts mogelijk op iteratieve wijze, aangezien de infiltratiecapaciteit van de scheuren bepaald wordt door het scheurwandoppervlak van dat gedeelte van de scheuren dat in contact staat met het open water, de hoogte van het water in de scheuren en de vochttoestand van de grond die de doorlatendheid en de drukhoogte bepaalt. Aangezien de vochttoestand van de grond in dit geval een gegeven is, moet er een waterhoogte in de scheuren bepaald worden die een combinatie van drukhoogte en nat oppervlak in de scheuren veroorzaakt, die voldoende is om de hoeveelheid aangeboden water horizontaal te infiltreren (stationaire toestand). Dit betekent dat het gedeelte van het bodemprofiel dat deelneemt aan de horizontale infiltratie afhankelijk is van zowel de vochttoestand in het bodemprofiel, als van de inkomende flux.

Gezien de grote doorlatendheid in het verzadigde traject, zal echter infiltratie ver boven het grondwaternivo slechts tot de uitzonderingen behoren. Dit probleem zal verder niet uitgewerkt worden.

## HOOFDSTUK 3

### HET MODEL SWATRE

#### 3.1 INLEIDING

Het computermodel SWATRE (Soil Water Actual TRanspiration Extended) simuleert de stroming van water in de onverzadigde zone van de grond, waarbij alleen rekening wordt gehouden met een een-dimensionale verticale stroming onder invloed van de drukhoogte van de bodem en de zwaartekracht en een zijwaartse onttrekking door plantenwortels.

Het model vraagt invoer met betrekking tot meteorologische data, bodemfysische parameters en parameters betreffende de wortelonttrekking. De uitvoer bestaat uit een rapportage van optredende fluxen en drukhoogten op opgegeven tijdstippen en uit berekende termen van de waterbalans. Het model is in 1978 ontwikkeld (versie SWATR) en in 1983 ingrijpend gewijzigd (versie SWATRExtendend). Het wordt veel gebruikt bij het berekenen van de waterhuishouding in de onverzadigde bodem. Ook kunnen situaties met irrigatie gesimuleerd worden met het model. Daarnaast wordt het model ook veel gebruikt in samenhang met gewasproductiemodellen zoals CROPR.

Een uitgebreide beschrijving van het model is onder andere te vinden in BELMANS et.al. (1983), FEDDES et.al. (1978) en DE GRAAF (1982). In het

In het navolgende zal SWATRE beschreven worden met de nadruk op de in het onderzoek gebruikte opties van het programma, om het stromingsproces in zwellende en krimpende gronden te modelleren. Deze opties zijn voor het onderzoek ingevoerd in een aangepaste versie van SWATRE, genaamd SWACR, die in het volgende hoofdstuk ter sprake zal komen.

#### 3.2 BASISALGORITME

De stroming in de onverzadigde zone vindt plaats onder invloed van de drukhoogte in de bodem, die zowel naar beneden als boven gericht kan zijn, en de zwaartekracht die alleen naar beneden gericht is. De grootte van de drukhoogte is afhankelijk van de vochttoestand van de grond.

Voor het beschrijven van de stroming in de onverzadigde zone worden twee vergelijkingen gebruikt, een flux- en een massavergelijking, i.c. de wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking een-dimensionale geval:

HET MODEL SWATRE

$$\text{Wet van Darcy} \quad : \quad q = -K(h) * \left( \frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) \quad (16)$$

$$\text{Cont. vergelijking:} \quad \frac{\delta \theta}{\delta t} = - \frac{\delta q}{\delta z} - S(h) \quad (17)$$

q : flux [m/d]

h : drukhoogte [m]

z : diepte [m]

t : tijd [d]

$\theta$  : volume vochtgehalte [ $m^3/m^3$ ]

K(h): onverzadigde doorlatendheid [m/d]

S(h): onttrekking door plantenwortels [m/m.d]

Combinatie van beide vergelijkingen, leidt tot de tweede orde partiele differentiaalvergelijking:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{C(h)} * \frac{\delta}{\delta z} \{ K(h) * \left( \frac{\delta h}{\delta t} + 1 \right) \} - \frac{S(h)}{C(h)} \quad (18)$$

met C(h) : differentiële vochtcapaciteit ( =  $\frac{\delta \theta}{\delta h}$  )

Deze vergelijking is slechts voor zeer bijzondere gevallen analytisch op te lossen, in SWATRE wordt de vergelijking daarom numeriek opgelost door het stromingsproces te discretiseren. Hiertoe wordt de beschouwde grondkolom onderverdeeld in compartimenten die in het midden allen een knooppunt bevatten waarop de berekeningen toegepast worden. In het eindig differentieschema dat toegepast wordt, worden de gradienten van de drukhoogten in plaats en tijd lineair verondersteld tussen de knooppunten in, m.a.w.:

$$\frac{\delta h}{\delta t} \approx \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_1 - h_2}{t_1 - t_2} \quad \text{en} \quad \frac{\delta h}{\delta z} \approx \frac{dh}{dz} = \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \quad (19)$$

Als doorlatendheid die tussen twee knooppunten geldt, wordt het geometrische gemiddelde van de doorlatendheid van de beide compartimenten berekend, m.a.w.

$$K_{i+1/2} = \sqrt{K_i * K_{i+1}} \quad \text{of} \quad K_{i-1/2} = \sqrt{K_i * K_{i-1}} \quad (20)$$

Invoering van de vergelijkingen van (19) en (20) in (18), en enige reorganisatie, leiden uiteindelijk tot het algoritme dat in het programma gebruikt wordt:



HET MODEL SWATRE

$$h_i^{j+1} = A_i * h_{i+1}^{j+1} + B_i * h_i^{j+1} + C_i * h_{i-1}^{j+1} + D_i \quad (21)$$

met  $i, j$  : plaats en tijdindex

en  $A_i, B_i, C_i$ , en  $D_i$  : coëfficiënten bepaald door drukgradienten, doorlatenheden en wortelontrekking.

Voor de  $n$  knooppunten kunnen m.b.v. (21)  $(n-1)$  vergelijkingen opgesteld worden met  $n$  onbekenden (de drukhoogten in de knooppunten), gegeven een bovenrandvoorwaarde. Indien de onderrandvoorwaarde in de vorm van drukhoogten gegeven is, zijn er  $(n-1)$  vergelijkingen met  $(n-1)$  onbekenden, indien de flux gegeven is, is er een extra vergelijking, er zijn dan  $n$  vergelijkingen met  $n$  onbekenden. De aldus gevormde stelsels impliciet oplosbare vergelijkingen worden voor iedere tijdstap berekend met behulp van het zogenaamde Thomas-algoritme.

Een en ander betekent dat aan de hand van de in de vorige tijdstap berekende stijghoogten, fluxen berekend worden die de stijghoogte in de volgende tijdstap bepalen enz.

De tijdstap die in het programma gehanteerd wordt is variabel en wordt berekend aan de hand van de verandering van het vochtgehalte in het bodemprofiel op de volgende wijze:

$$\Delta t^{j+1} = \frac{\Delta\theta(\max)}{(\Delta\theta/\Delta t)^j(\max)} \quad (22)$$

$$\text{met } (\Delta\theta/\Delta t)^j(\max) = \text{Max}_{j=1, \dots, n} \{S_i^j + |\Delta q/\Delta z)_i^j|\}$$

$S_j^i$  : ontrekking door plantenwortels [m/m.d]

$\Delta q$  : flux der compartimentgrenzen [m/d]

Rekening houdend met zekere maximale en minimale waarden, blijkt deze empirische relatie stabiliteit van de oplossing te waarborgen.

### 3.3 RANDVOORWAARDEN

Zoals gezegd is het noodzakelijk om randvoorwaarden te formuleren voor de onder- en bovenzijde van het systeem, om vergelijking (21) te kunnen oplossen. Voor de bovenkant van het systeem bestaat de randvoorwaarde altijd uit een flux, samengesteld uit evapotranspiratie en neerslag, de z.g.n. Neumann-voorwaarde. Aan de onderkant van het systeem kan de randvoorwaarde van verschillende aard zijn, zowel in de vorm van een flux b.v. kwel en/of wegzijging, als in de vorm van een potentiaal b.v. de grondwaterstand, de zogenaamde Dirichlet-voorwaarde.

In het navolgende zullen de randvoorwaarden besproken worden, met name die randvoorwaarden die bij de simulaties gebruikt zijn.

## HET MODEL SWATRE

### 3.3.1 Bovenrandvoorwaarden

De bovenrandvoorwaarde van het systeem bestaat uit twee componenten, die alletwee van meteorologische aard zijn:

- de dagelijkse neerslaghoeveelheid, die in de gebruikte versie van SWATRE dag voor dag opgegeven moet worden, of voor de hele periode constant verondersteld wordt.
- de evapotranspiratie, zijnde de totale hoeveelheid water die aan de bovenkant van het bodemprofiel verdwijnt onder invloed van de energieflex van de zon. Deze wordt onderverdeeld in:
  - de bodemevaporatie, zijnde de hoeveelheid water die door de zonnearmte direct uit de grond verdampt. Deze kan expliciet opgegeven worden, maar kan ook berekend worden uit de bedekkingsgraad en de totale evapotranspiratie.
  - de interceptieverdamping, zijnde de verdamping van water dat rechtstreeks op de plant terecht komt en dat het bodemoppervlak niet zal bereiken. Deze wordt in het programma berekend aan de hand van de neerslaghoeveelheid en het soort gewas indien de methode van Montheith-Reitema gebruikt wordt, of zit impliciet in de verdampingsformules indien andere methoden gebruikt worden.
  - de transpiratie, zijnde de hoeveelheid water die door het gewas uit de bodem opgenomen wordt en die deels door de huidmondjes van de plant verdampt en deels opgenomen wordt door het gewas. Deze kan eveneens expliciet opgegeven worden danwel berekend worden uit de totale evapotranspiratie en de bodemevaporatie.

In het navolgende zullen de verschillende termen van bovenrandvoorwaarden belicht worden.

#### 3.3.1.1 Neerslag

De dagelijkse hoeveelheid neerslag die in de gebruikte versie van SWATRE ingevoerd wordt, wordt voor de berekeningen over de gehele dag verdeeld. Voordat de neerslag het bodemoppervlak bereikt vindt er interceptie plaats door het gewas. De onderschepte hoeveelheid water wordt deels verdampt en komt voor een ander deel op het bodemoppervlak terecht, in sommige gevallen wordt het onderschepte water direct door de huidmondjes opgenomen. Van deze hoeveelheid water die op het oppervlak terecht komt wordt een deel als bodemevaporatie snel weer aan de bodem onttrokken. De hoeveelheid water die na aftrek van de interceptieverdamping en bodemevaporatie overblijft, wordt aangemerkt als potentiële infiltratie.

Deze potentiële infiltratie kan gereduceerd worden ten gevolge van een te geringe infiltratiecapaciteit van de bodemmatrix. In hoofdstuk 2 is afgeleid op welke manier de infiltratiecapaciteit berekend kan worden. Omdat SWATRE met gecumuleerde waarden van de neerslag per dag rekent, is het

## HET MODEL SWATRE

gebruik van deze methoden niet zinnig. Daarom wordt in het programma een eenvoudiger benadering gebruikt.

De infiltratie wordt daartoe in SWATRE beschouwd als een proces dat alleen bepaald wordt door het actuele vochtgehalte van de toplaag (i.c. het eerste compartiment) van het bodemprofiel. Er wordt verondersteld dat tijdens de neerslag het ingetreden water zich onmiddellijk over het 1<sup>e</sup> compartiment verspreid, waarbij ieder keer bovenin het compartiment een verzadigd laagje ontstaat. De infiltratiecapaciteit wordt nu bepaald met behulp van de wet van Darcy. Voor de doorlatendheid wordt dan het geometrisch gemiddelde berekend tussen de verzadigde doorlatendheid (die aan het oppervlak geldt) en die van het eerste compartiment. Voor de drukgradient wordt het verschil in drukhoogte tussen het verzadigde deel ( $h=0$ ) en het onverzadigde deel van de laag ( $h=h_1$ ) genomen, dus:

$$i = -K_{\frac{1}{2}}(h) * \left( \frac{h_0 - h_1}{\Delta z} - 1 \right) \quad (23)$$

- $i$  : infiltratiecapaciteit [m/d]  
 $h_0$  : ~~drukhoogte~~ aan de bovenkant van de toplaag [m]  
 $h_1$  : gemiddelde drukhoogte in het 1<sup>e</sup> compartiment [m]  
 $K_{\frac{1}{2}}(h)$ : geometrische gemiddelde doorlatendheid [m/d]

Indien de hoeveelheid potentiële infiltratie groter is dan de infiltratiecapaciteit, wordt het gedeelte dat niet kan infiltreren afgevoerd als "runoff".

### 3.3.1.2 Evapotranspiratie

Om de verschillende componenten van de evaporatie te kunnen berekenen, wordt eerst de totale potentiële evapotranspiratie uitgerekend. Hierna worden de verschillende termen gescheiden, en kan uit deze potentiële waarde een actuele waarde van de verdampingstermen berekend worden.

Om de potentiële evapotranspiratie te bepalen bestaan een groot aantal formules. De formules rekenen aan de hand van meteorologische kengetallen en aan de hand van parameters afhankelijk van het gewas, de totale potentiële evapotranspiratie uit.

SWATRE geeft de mogelijkheid om de evapotranspiratie op 3 verschillende manieren te berekenen, bovendien kunnen desgewenst de verschillende componenten dag voor dag ingevoerd worden.

Het berekenen van de potentiële evapotranspiratie met behulp van de open water verdamping volgens Penman is de meest beproefde van de drie methoden. Ze gaat uit van een berekende verdamping van open water. Deze open water verdamping wordt vervolgens getransformeerd naar een gewasverdamping door vermenigvuldiging met een in oorsprong volledig empirisch bepaalde parameter, afhankelijk van het gewas:

HET MODEL SWATRE

$$E_o = \frac{\Delta * R_n + \gamma * LE_a}{(\Delta + \gamma) * \rho * L} \quad (24)$$

$$ET^* = f * LE_o \quad (25)$$

- $E_o$  : open water verdamping [cm/d]  
 $R_n$  : netto straling boven wateroppervlak [ $W/m^2$ ]  
 $LE_a$  : isotherme verdamping [ $W/m^2$ ]  
 $\Delta$  : helling van de verzadigde dampspanningscurve [mbar/K]  
 $\gamma$  : psychrometerconstante [mbar/K]  
 $\rho$  : dichtheid van water [ $kg/m^3$ ]  
 $L$  : verdampingswarmte van water [J/kg]  
 $ET^*$  : potentiële evapotranspiratie [cm/d]  
 $f$  : gewasfactor [-]

Een nadeel van deze berekeningswijze is, dat de eigenschappen van de plant slechts ingevoerd worden met de parameter  $f$  die een uitdrukking is voor verschillende effecten van het soort en de staat van het gewas op de evapotranspiratie. Deze factor is gedurende het jaar niet constant en vertoont bovendien nog al wat variaties tussen verschillende jaren, voor gras blijkt deze parameter te variëren tussen 0.6 en 0.9, met een vaak gebruikt gemiddelde van 0.8.

Het programma kent nog twee opties voor de berekening van de potentiële evapotranspiratie, namelijk de methode van Priestley en Taylor en de methode van Montheith-Rijtema. De laatste heeft als voordeel dat ze fysisch goed onderbouwd is, en dus parameters gebruikt die een duidelijke fysische betekenis hebben. In de formule moet een vast omschreven gewasafhankelijke parameter ingevoerd worden n.l. de gewasweerstand. De potentiële evapotranspiratie wordt direct berekend met:

$$ET^* = \frac{\delta + \gamma}{(\delta + \gamma) * (1 + \frac{r_c}{r_a})} * (E_{wet}^* - E_i) + E_i \quad (26)$$

- $r_c$  : gewasweerstand [s/m]  
 $r_a$  : aerodynamische diffusieweerstand [s/m]  
 $\Delta$  : helling van de verzadigde dampspanningscurve [mbar/K]  
 $\gamma$  : psychrometer constante [mbar/K]  
 $E_i$  : interceptieverdamping [cm/d]  
 $E_{wet}^*$  : potentiële verdamping van een nat bladoppervlak [cm/d]

De potentiële verdamping van het natte bladoppervlak wordt berekend uit:

HET MODEL SWATRE

$$E_{\text{wet}}^* = \frac{\delta \cdot R_n + \frac{C_p \cdot P_a \cdot (e_a - e_d)}{r_a}}{(\delta + \gamma) \cdot \lambda} \quad (27)$$

- $R_n$  : netto straling [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $C_p$  : specifieke warmte van lucht bij bepaalde druk [ $\text{J/kgK}$ ]  
 $P_a$  : luchtdruk [mbar]  
 $e_a$  : dampspanning [mbar]  
 $e_d$  : verzadigde dampspanning [mbar]

Aangezien de gewasfactor  $f$  uit de formule van Penman voor een bepaald jaar en een bepaald gewas vaak berekend wordt met behulp van de formule van Montheith-Reitema, verdient het de voorkeur om deze formule direct te gebruiken in de plaats van de formule van Penman met de uit de formule van Montheith-Reitema afgeleide gewasfactor, indien er voldoende gegevens beschikbaar zijn.

In het programma wordt overigens de interceptieterm uit de formule van Montheith-Reitema niet bij de evapotranspiratie gerekend, maar behandeld als reductie van de neerslag. De potentiële interceptie is in principe constant verondersteld in het programma, afhankelijk van het type gewas dat er groeit, een bosvegetatie zal bijvoorbeeld meer water kunnen onderscheppen dan een graslandperceel.

Om de twee termen, potentiële bodemevaporatie en transpiratie van elkaar te scheiden, wordt in het programma de bodemevaporatie  $E^*$  berekend, waarna het overblijvende deel toegerekend wordt aan de transpiratie  $T^*$ , met andere woorden:

$$T^* = ET^* - E^* \quad (28)$$

De bodemtranspiratie wordt berekend met behulp van de zogenaamde "leaf area index" die een afgeleide is van de bedekking van de grond door het gewas.

$$E^* = 0.9 \cdot e^{-0.6 \cdot \text{LAI}} \cdot ET^* \quad (29)$$

LAI : Leaf Area Index [-]

Voor aardappels wordt vaak een derdegraads polynoom verondersteld voor de functie die het verband aangeeft tussen bedekkingsgraad en LAI (DE GRAAF, 1982):

$$\text{LAI} = a \cdot \text{SC} + b \cdot \text{SC}^2 + c \cdot \text{SC}^3 \quad (30)$$

SC : bedekkingsgraad van de bodem [-]

a, b, c : gewasafhankelijke parameters [-]

Voor andere gewassen gelden echter vaak andere relaties.

HET MODEL SWATRE

De verdampingstermen worden verschillend gereduceerd in de actuele situatie. In de volgende paragrafen zal de reductie voor de termen nader toegelicht worden.

3.3.1.2.1 Actuele Interceptieverdamping

De actuele interceptieverdamping van een gewas is afhankelijk van de neerslagintensiteit. Aangezien de neerslagintensiteit in het programma niet bekend is door het ontbreken van regenduurcijfers, wordt de actuele interceptie bepaald aan de hand van een empirische relatie die het verband aangeeft tussen de dagelijkse neerslaghoeveelheid en de actuele dagelijkse interceptie-term. De door Rijtema en Feddes afgeleide relatie voor gras en rode kool ziet er als volgt uit:

$$FIN = a * p^{(b-c*(P-d))} \quad \text{indien } FIN < FIN_p \quad (31)$$

$$FIN = FIN_p \quad \text{indien } FIN > FIN_p$$

- FIN : dagelijkse interceptieverdamping [cm/d]
- FIN<sub>p</sub> : potentiële interceptieverdamping [cm/d]
- P : dagelijkse neerslaghoeveelheid [cm/d]
- a,b,c,d : gewasafhankelijke parameters [-]

3.3.1.2.2 Actuele Transpiratie

De actuele verdamping hangt af van de potentiële verdamping en de drukhoogte in de wortelzone van de bodem. In SWATRE wordt daartoe eerst bepaald hoeveel water de plantenwortels potentieel op kunnen nemen op verschillende diepte in het bodemprofiel ten gevolge van de potentiële verdampingsvraag. Daarna wordt bepaald welke reducties van deze potentiële opname plaatsvinden ten gevolge van in de wortelzone optredende beperkende drukhoogten.

De bepaling van de maximaal opneembare hoeveelheid water kan in het programma op drie manieren plaatsvinden. Deze zijn schematisch getekend in figuur 7.

Uit de figuur volgen drie patronen, waarvan de laatste in principe niet in het programma verwerkt, echter wel later toegevoegd is:

HET MODEL SWATRE

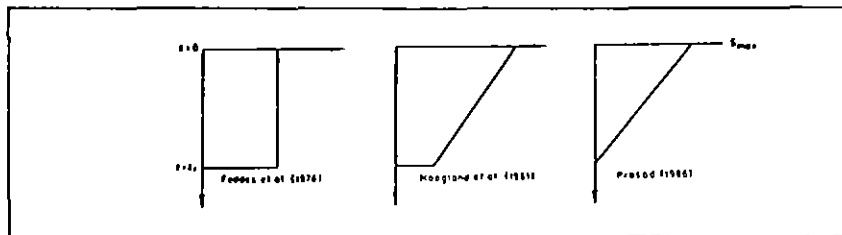


Fig. 7. Onttrekkingspatroon van plantenwortels volgens drie concepten.

- Onttrekkingspatroon volgend Feddes.  
 Dit gaat uit van een verdeling van de totale potentiële transpiratie over de gehele opgegeven wortelzone, zonder beperkingen door de diepte van de wortels, m.a.w.

$$S_{\max}(z) = \frac{T^*}{z_{\max}} \quad (32)$$

$S_{\max}$  : maximale onttrekking door plantenwortels [cm/cm d]

$T^*$  : potentiële transpiratie [cm/d]

$z_{\max}$  : maximale worteldiepte [cm]

- Onttrekkingspatroon volgens Hoogland.  
 Dit gaat uit van een nauwkeurig bepaalde maximale onttrekking van de wortels in het bovenste deel van het bodemprofiel, en een lineaire reductie dieper in het profiel, m.a.w.

$$S_{\max} : a - b * z \quad (33)$$

$z$  : diepte in profiel [cm]

$a$  : maximale onttrekking bovenin profiel [cm/cm d]

$b$  : afname onttrekkingsfunctie met de diepte [1/cm d]

- Onttrekkingspatroon volgens Prasad.  
 Dit gaat evenals Hoogland uit van een lineaire afname van de maximale wortelonttrekking met de diepte. Hierbij neemt de onttrekking echter af tot 0 onderaan de wortelzone, bovendien wordt de maximale onttrekking bovenin afhankelijk gesteld van de potentiële transpiratie. Evenals in het concept van Feddes, wordt de totale potentiële transpiratie verdeeld over de gehele maximale diepte van de wortelzone:

$$S_{\max} = \frac{2 * T^*}{z_{\max}} * \left(1 - \frac{z}{z_{\max}}\right) \quad (34)$$

HET MODEL SWATRE

In het geval van toepassing van de theorie van Feddes of Prasad is de diepte waarover de wortels vocht onttrekken gelijk aan de actuele worteldiepte van het gewas. Bij de methode van Hoogland geldt dit niet; van boven naar beneden krijgt iedere diepte de maximale onttrekking toegewezen totdat de potentiële verdamping helemaal verdeeld is of de maximale bewortelingsdiepte bereikt is.

Toepassing van een formule waarin de onttrekking met de diepte afneemt lijkt de meest voor de hand liggende aangezien onttrekking bovenin het profiel de weg van de minste weerstand betekend, alhoewel de grote onttrekking direct onder het maaiveld in twijfel getrokken moet worden (DE GRAAF, 1982). De benadering van Prasad heeft als voordeel dat de reële maximale onttrekking niet bekend hoeft te zijn. Een duidelijke fysische achtergrond ontbreekt hier echter. De keuze voor een concept wordt veelal bepaald door de vorm en de staat van het wortelstelsel.

De maximale bewortelingsdiepte  $z_{max}$  kan in het programma constant gehouden worden danwel variabel gemaakt worden gedurende het seizoen.

De berekende potentiële onttrekking kan ten gevolge van de in de wortelzone optredende drukhoogten gereduceerd worden. Daartoe wordt een zogenaamde "sink-term"  $\alpha(h)$  ingevoerd, die de reductie van  $S_{max}$  representeert. In formule:

$$S(h) = \alpha(h) * S_{max} \tag{35}$$

$S(h)$  : actuele onttrekking van de plantenwortels [cm/cm d]

$\alpha(h)$  : "sink-term" [-]

Het verloop van deze "sink-term" is in figuur 8 schematisch weergegeven:

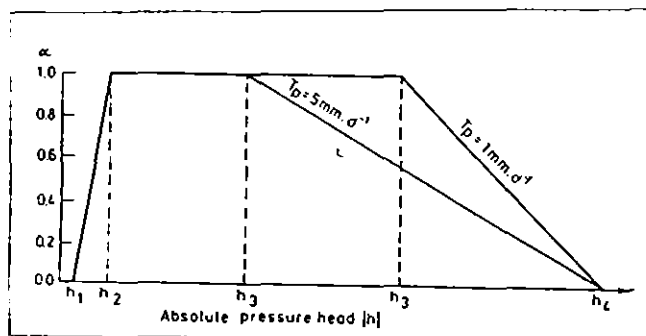


Fig. 8. Verloop van de "Sink-term".

Tot drukhoogte  $h_1$  vertonen de wortels geen onttrekking ten gevolge van een te hoog vochtgehalte van de grond waardoor de gasuitwisseling beperkend wordt, van  $h_2$  tot  $h_3$  verloopt de wortelonttrekking optimaal, na  $h_3$  neemt de onttrekking lineair af tot  $h_4$  vanwege de toenemende druk die de wortels moeten ontwikkelen om water aan de grond te onttrekken. Na  $h_4$  nemen de wortels zelfs helemaal geen water meer op,  $h_4$  correspondeert meestal met het verwelkingspunt uit de pF-curve ( $pF=4.2$ ).

In het programma zijn enkele modificaties mogelijk van dit patroon; zo wordt bij het onttrekkingspatroon van Feddes een  $h_{3H}$  en een  $h_{3L}$  gedefinieerd, die het tijdstip van afname van de wortelonttrekking



HET MODEL SWATRE

afhankelijk stelt van de potentiële verdampingsvraag (tussen 0.1 en 0.5 cm/d), verder kan een parabolisch verloop voor het gedeelte van  $h_3$  tot  $h_4$  gebruikt worden, zodat de reductie van de actuele transpiratie in het begin sneller toeneemt dan aan het eind van het traject  $h_3$ - $h_4$ .

De parameters  $h_1$  t/m  $h_4$  zijn afhankelijk van zowel het type begroeiing als het type bodem, en moeten dus expliciet ingevoerd worden.

In SWATRE wordt voor ieder compartiment waarin zich wortels bevinden de maximale onttrekking en de "sink-term" berekend, de actuele onttrekking wordt voor de compartimenten opgesteld en vormen samen de term  $S(h)$  in de basisvergelijking (18) van het programma. Deze som vermenigvuldigd met de diepte van de wortelzone vormt de totale actuele transpiratie op een tijdstip.

3.3.1.2.3 Actuele Bodemevaporatie

De potentiële bodemevaporatie wordt gereduceerd door de vochtinhoud van de bovenste lagen van het bodemprofiel. Indien de bovenste bodemlagen erg ugedroogd zijn, zal het profiel niet meer aan de potentiële bodemevaporatievraag kunnen voldoen, de potentiële bodemevaporatie wordt gereduceerd. In het programma wordt deze reductie afhankelijk gesteld van het aantal achter elkaar optredende droge dagen, waarop minder dan 1 mm neerslag valt, in formule:

$$E_r^* = \lambda \sqrt{t+1} - \lambda \sqrt{t} \quad \text{indien } E_r^* < E^* \quad (36)$$

$$E_r^* = E^* \quad \text{indien } E_r^* > E^*$$

$\lambda$  : bodemparameter [ $\text{cm/d}^{\frac{1}{2}}$ ]

$t$  : aantal achter elkaar optredende dagen met  $t < 1 \text{ mm/d}$  [d]

$E^*$  : potentiële bodemevaporatie [cm/d]

$E_r^*$  : gereduceerde bodemevaporatie [cm/d]

Deze uitdrukking is volledig empirisch en nogal discutabel, bovendien is de bodemparameter afhankelijk van de bodemsoort, deze wordt echter in het programma constant (0.35) voor ieder type bodem gesteld. Aangezien reductie van de bodemevaporatie in de meeste gevallen slechts marginaal is, zal dit de resultaten echter slechts weinig beïnvloeden.

In het programma wordt nog een tweede reductie toegepast op de bodemevaporatie, namelijk een reductie ten gevolge van een te lage transportcapaciteit van de bodem. Deze capaciteit wordt op dezelfde manier berekend als de maximale infiltratiecapaciteit, gebruikmakend van de formule van Darcy (zie vergelijking (23)). Als drukhoogte aan de bovenzijde van het profiel, wordt de druk in de atmosfeer berekend.

Deze tweede reductie vindt overigens niet plaats op de bodemevaporatie maar op de totale flux van neerslag, interceptieverdamping en bodemevaporatie. Een reductie van deze flux wordt echter wel geheel aan de bodemevaporatie toegekend.

Of er sprake is van netto infiltratie of verdamping, wordt bepaald door

HET MODEL SWATRE

het berekenen van de balans van potentiële neerslag en verdamping. Volgt uit deze balans netto infiltratie dan wordt de druk aan het oppervlak 0 gesteld, in het andere geval krijgt deze druk de waarde van de druk in de atmosfeer. Indien neerslag en verdamping ongeveer met elkaar in evenwicht zijn, kunnen er kleine inconsequenties in het programma optreden omdat de balans zonder tweede reductie op verdamping wijst echter met tweede reductie op netto infiltratie, de optredende verschillen in de totale balans zijn hinderlijk maar verwaarloosbaar.

3.3.2 Onderrandvoorwaarden

Voor de onderrandvoorwaarden van SWATRE kan zowel de Neuman-voorwaarde (flux gegeven) als de Dirichlet-voorwaarde (potentiaal gegeven) gebruikt worden. Het programma kent 6 verschillende formuleringen van de randvoorwaarden. Figuur 9. geeft een overzicht van de mogelijke onderrandvoorwaarden die in het model ingevoerd kunnen worden.

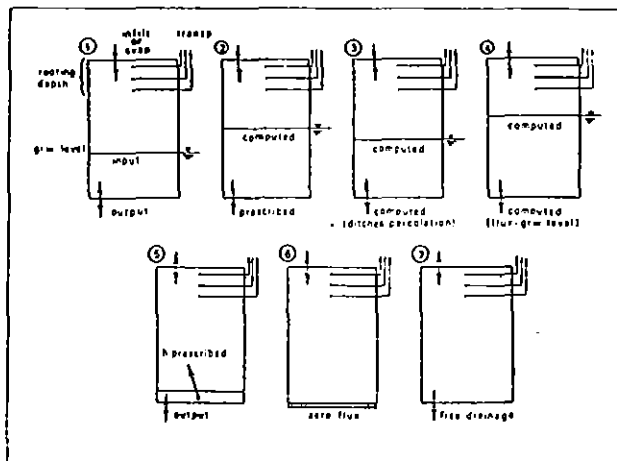


Fig. 9. Mogelijke onderrandvoorwaarden in het programma SWATRE.

De elementairste is de voorwaarde waarbij de flux door de onderkant van het profiel gegeven wordt (Neuman) en die waarbij de grondwaterstand gegeven wordt (Dirichlet). In het eerste geval wordt de grondwaterstand door het programma berekend, in het tweede de flux door de onderzijde van het systeem.

Voor praktische toepassingen, worden deze voorwaarden echter niet zo vaak gebruikt. Vaak wordt een randvoorwaarde gebruikt waarbij een bepaalde slootwaterstand ingevoerd wordt, waaruit de flux door de onderkant van het profiel berekend wordt. Aangezien het slootpeil veel directer door de mens beheerst kan worden dan b.v. de grondwaterstand leent deze voorwaarde zich beter voor toepassingen met een voorspellende aard.

Een andere veel gebruikte randvoorwaarde, onder andere in de toepassingen in dit onderzoek, is die waarbij een relatie moet worden gegeven tussen de optredende grondwaterstand en de afvoer van het gebied, door drains, kwel of wegzijging. De parameters in de relatie representeren dan de geo-hydrologische eigenschappen van het gebied en de eigenschappen

## HET MODEL SWATRE

van de aangelegde ontwatering. Het slootpeil wordt hierbij echter niet meegenomen, hetgeen met name bij callibratie moeilijkheden kan opleveren, zeker als het slootpeil op drainnivo staat.

Het programma biedt voor een grondwaterstand-afvoer-relatie (Q-h-relatie) de mogelijkheid van een e-functie van de volgende gedaante:

$$Q(h) = a * e^{b*h} \quad (37)$$

Q(h) : afvoer door de onderrand van het profiel [cm/d]

h : grondwaterstand [cm]

a, b : regressiecoëfficiënten

Deze uitdrukking kan opgesteld worden aan de hand van een reeks afvoer- en grondwaterstanden, en dient voor iedere toepassing opnieuw gecalibreerd te

### 3.3.3 Beginvoorwaarden

Als starttoestand voor de berekeningen vraagt SWATRE een beginvoorwaarde, die de vochttoestand tijdens de start van de rekenproces weergeeft.

Naast het geven van een begingrondwaterstand kan een intieel vochtprofiel of drukhoogteprofiel ingevoerd worden. Er kan ook uitgegaan worden van een vochtprofiel dat in evenwicht verkeerd met het grondwaterniveau, waarbij er geen vochttransport plaats vindt.

Indien de berekeningen over een langere tijd verlopen kan volstaan worden met een berekend drukhoogteverloop als beginvoorwaarde, de fouten die hiermee in het begin gemaakt worden, blijken in de praktijk meestal snel gereduceerd te worden.

### 3.4 HET PROGRAMMAVERLOOP

In het navolgende zal het verloop van de berekeningen in SWATRE in chronologische volgorde beknopt besproken worden, met de nadruk op die algoritmen die in het onderzoek van belang zijn. Slechts de hoofdmodules zullen besproken worden.

Het programma start met het inlezen van alle randvoorwaarden en vaste parameters uit de input-file SWADAT.INP, in de modules RDATA (Read DATA), BOCOTO (BOUNDARY CONDITIONS TOP), BOCOBO (BOUNDARY CONDITION BOTTOM), PARPLA (PARAMETERS PLANT) en PARSOL (PARAMETERS SOIL). In de modules vindt ook al de berekening van de enkele parameters plaats, met name de potentiële termen van de waterbalans zoals de potentiële evapotranspiratie, (gereduceerde) bodemevaporatie en interceptieverdamping. Verder vindt in deze modules de initialisatie plaats van de variabelen en het instellen van de beginvoorwaarde.

Na deze verwerking begint het eigenlijke rekenproces. Allereerst worden de momentane waarden van de randvoorwaarden toegekend aan

HET MODEL SWATRE

de programmavariabelen meestal eindigend met de A van Actual (PRECA, FINA etc.), dit vindt plaats in de module BOCO (Boundary Conditions).

Vervolgens wordt in het hoofdprogramma de hoeveelheid water berekend die zich op dat moment in het profiel bevindt na de vorige tijdstap, aan de hand van de vochtgehalten en fluxen die in de vorige tijdstap berekend zijn. De vochtinhoud in het profiel wordt vergeleken met de vochtinhoud aan het begin van de vorige tijdstap, hieruit volgt een overschot of tekort, de DEL-term. Deze DEL-term moet later weggewerkt worden met behulp van afvoer door de onderand van het profiel en door grondwaterstandstijging.

Dat laatste gebeurt in de module CALGWL (CALculate Ground Water Level), in die gevallen waarbij de grondwaterstand berekend moet worden, zoals tijdens het onderzoek. Hiertoe wordt de DEL-term gereduceerd met de afvoer door de onderand, QDEEPA. Indien deze term niet 0 is, is er dus teveel of te weinig water in het profiel aanwezig. Dit verschil mag oplopen tot een vaste waarde (standaard 0.1 cm), wordt de factor groter dan wordt de grondwaterstand gewijzigd. Blijft deze waarde echter kleiner dan de vaste waarde, dan wordt dit verschil in een buffer (DVOL) geplaatst die bij de volgende evaluatie meegenomen wordt bij het bepalen van de hoeveelheid water in het profiel. Wordt de grondwaterstand aangepast, dan wordt deze DVOL opnieuw berekend. De vergelijking die in het begin van CALGWL opgesteld moet worden wordt dus:

$$DVOL(t) = DVOL(t-dt) + DEL(t) - QDEEP*DT \quad (38)$$

DEL : hoeveelheid water in profiel zonder afvoer [cm]

QDEEP : afvoer door onderrand [cm]

T : tijdstip [d]

DT : tijdstap-grootte [d]

Indien de grondwaterstand aangepast moet worden, wordt deze met opgelegde stapjes, waarvan de grootte als invoer dient, gewijzigd, waarna iedere keer de DEL-factor uitgerekend wordt. Dit gebeurt net zolang totdat het verschil DVOL een acceptabele, eveneens ingevoerde, waarde heeft gekregen. Bij iedere grondwaterstandswijziging wordt het vochtprofiel in de knooppunten boven het grondwaternivo aangepast aan de nieuwe situatie. Het grote voordeel van deze methode is dat de waterbalans nagenoeg in evenwicht blijft, aangezien dit evenwicht het acceptatiecriterium voor de iteratie is.

Na deze aanpassing van de grondwaterstand wordt in de module MOSCON (MOiSture CONtent) de differentiele vochtcapaciteit C(h) uit de basisformule (18) voor ieder knooppunt berekend evenals de doorlatendheden K(h), met behulp van de geometrische middeling beschreven door formule (20).

Hierna worden de fluxen die in de actuele tijdstap gaan gelden tussen de knooppunten berekend in FLUXES, aan de hand van de gemiddelde doorlatendheden en de in de vorige tijdstap berekende drukhoogten. Tevens wordt de infiltratie/verdampingscapaciteit van de toplaag berekend met behulp van formule (23). Hiermee wordt de actuele infiltratie/verdamping berekend middels het vergelijken van de capaciteit met de potentiële flux, FLXA.

In de module ROOTEX (ROOTs EXtraction) wordt de wortelonttrekking en dus de actuele transpiratie berekend met een van de formules (32) - (34) en (35).

De benodigde invoer voor de differentiaalvergelijking moet nu nog

## HET MODEL SWATRE

aangevuld worden met een grote van de tijdstap, dit vindt plaats aan de hand van het criterium uit formule (22) in de module DELTIM. Hiervoor worden echter eerst de waarden van de relevante parameters naar de output-file geschreven, de output bestaat dus uit de nieuwe randvoorwaarden en fluxen op tijdstip  $T+DT$ , echter niet uit de nieuwe drukhoogten ten gevolge van deze fluxen.

In de module HEDCAL (CALculation of hydraulic HEAdS) vindt uiteindelijk het oplossen van de differentiaalvergelijking (18) plaats op een expliciete wijze (door middel van het zogenaamde Thomas-algoritme) volgens de gediscretiseerde vergelijking (21), nadat de tijd verhoogd is met de tijdstap  $DT$ .

De drukhoogten die uit de module HEDCAL volgen worden vervolgens in het hoofdprogramma omgezet in vochtgehalten met behulp van de ingevoerde drukhoogten.

Tenslotte worden de gecummuleerde waarden van de waterbalans berekend in de module INTGRL (calculate INTeGRAL values). Hierna vervolgd het programma weer met een aanroep van BOCO voor het nieuwe tijdstip.

N.B. Door de plaats in het programma waarop SWATRE uitvoer naar de output-file schrijft, komen de gecummuleerde waarden van met name de flux- en wortelonttrekkingstermen niet overeen met de actuele waarden. De actuele waarden zijn wel al vastgesteld en dienen als output, de subrouitne INTGRL is dan echter nog niet aangeropen.

### 3.5 TEKORTKOMINGEN VAN SWATRE BIJ GEBRUIK OP KLEIGRONDEN

Het model SWATRE heeft een aantal belangrijke tekortkomingen die van groot belang zijn bij de toepassing van het model op zwellende en krimpende zware kleigronden.

De belangrijkste zijn:

- SWATRE berekent slechts een inkomende flux aan de bovenkant van het bodemprofiel dat geen scheuren bevat, het programma houdt geen rekening de aanwezigheid van scheuren en daarom ook niet met de infiltratie door de scheurwanden.
- SWATRE rekent met dagelijkse neerslagsommen en de gebruikte versie. Dit is echter een slechte maat om te bepalen of de hoeveelheid aangeboden water ook daadwerkelijk kan infiltreren in de bodemmatrix, de neerslagintensiteit is hierbij van belang.
- SWATRE gaat uit van een volledige verdeling van het geïnfiltreerde water in de bodemmatrix in het eerste compartiment tijdens een tijdstap. Vooral in slecht doorlatende gronden zoals kleigronden is dit echter geen goede benadering. De analytische formules van bijvoorbeeld Stroosnijder (formule 11) en Perroux (formule 14) beschrijven het proces fysisch juister en geven betere resultaten.
- SWATRE houdt geen rekening met plasmvorming aan het maaiveld, al het niet geïnfiltreerde water wordt tot de "runoff" gerekend en komt dus buiten het systeem terecht. In werkelijkheid komt deze "runoff" in de scheuren terecht en wordt dan dieper in het bodemprofiel geïnfiltreerd.

## HET MODEL SWATRE

- Het is niet zeker of in kleigronden met over het algemeen vrij hoge optredende drukhoogten, de bestaande theorieën met betrekking tot de wortelonttrekking voldoen, temeer daar het wortelstelsel in zware kleigronden vaak afwijkend van vorm is, door restricties met betrekking tot de wortelgroei.
- Het gebruik van een vaste Q-h-relatie in gronden die gedurende het jaar wisselend scheuring vertonen, is discutabel. Aangezien een Q-h-relatie een beschrijving is van de ontwateringstoestand van een gebied, met andere woorden een beschrijving van de aanwezige drainage. Door het voorkomen van scheuren die niet constant van grootte, en soms helemaal dicht zijn wordt de drainage van het gebied beïnvloedt, hetgeen zeker ook zijn weerslag zal hebben op de Q-h-relatie.

In het volgende hoofdstuk wordt een aangepaste versie van SWATRE besproken genaamd SWACR, waarin een aantal van de genoemde tekortkomingen ondervangen is.

## HOOFDSTUK 4

### AANPASSINGEN AAN SWATRE (SWACR)

Teneinde het model SWATRE geschikt te maken voor het gebruik op zwellende en krimpende kleigronden was het noodzakelijk om het programma op enkele punten ingrijpend te wijzigen, tot een nieuwe versie SWACR.

In het navolgende zullen de voornaamste principes van deze wijzigingen besproken worden. Een gedetailleerde modulematige opsomming en een beschrijving van de nieuwe invoer en uitvoer wordt gegeven in BIJLAGE 1. en 4. De sourcelistings van de aanpassingen en aanvullingen worden gegeven in BIJLAGE 2. en 3.

#### 4.1 BASISVERGELIJKING

De wijzigingen in de basisvergelijkingen hebben tot doel om de horizontale infiltratie van water in de scheuren in de bodemmatrix te berekenen.

Vergelijking (39) geeft de gemodificeerde differentiaalvergelijking rekening houdend met bypass-flow, zoals die in SWACR ingevoerd is:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{C(h)} * \frac{\delta}{\delta z} \{K(h) * (\frac{\delta h}{\delta t} + 1)\} - \frac{S(h)}{C(h)} - \frac{B(h)}{C(h)} \quad (39)$$

$B(h)$  : horizontale infiltratieflux door scheurwanden [cm/cm.d]

De factor  $B(h)$  is de horizontale infiltratie zoals die door de scheurwanden plaatsvindt ten gevolge van het optreden van bypass-flow. De dimensie van deze factor is gelijk aan de dimensie van de onttrekkingsterm  $S(h)$  en representeert de horizontale infiltratieflux door de scheurwanden op een bepaalde diepte. De bypass-term heeft het tegengestelde teken van de onttrekkingsterm.

Naast deze aanpassing van de differentiaalvergelijking moet de waterbalansvergelijking in het programma ook aangepast worden ten behoeve van de berekening van de hoogte van het grondwater-nivo. De nieuwe waterbalansvergelijking in SWACR uitgebreid met een bypass-term wordt dan:

AANPASSINGEN AAN SWATRE (SWACR)

$$DEL = VOL - VOL1 + CTRA - CTRA1 + FLXA(1)*DT - BYPA*DT \quad (40)$$

VOL : geborgen hoeveelheid water in profiel [cm]  
 VOL1 : VOL uit vorige tijdstap [cm]  
 CTRA : cummulatieve transpiratie [cm]  
 CTRA1 : CTRA uit vorige tijdstap [cm]  
 FLXS(1) : actuele flux door bovenrand profiel [cm/d]  
 BYPA : actuele infiltratie via scheuren [cm/d]

De term BYPA\*DT representeert de totale hoeveelheid bypass-flow die in de scheuren infiltreert tijdens de beschouwde tijdstap.

4.2 BEPALEN VAN DE BYPASS-TERMEN

Voor het bepalen van de parameters B(h) en BYPA moet de infiltratiesnelheid van de neerslag nauwkeurig vastgesteld worden. Daartoe is het noodzakelijk dat de regenintensiteit in het nieuwe programma SWACR bekend is. Dit houdt in dat er naast een regenhoeveelheid per dag, ook een regenduur per dag ingevoerd wordt, waaruit tenslotte een regenintensiteit volgt. Het zou ook mogelijk zijn om in de plaats van dagelijkse waarden van de regenval, bijvoorbeeld 3-uurs of 1-uurs-regenwaarnemingen in te voeren in het model. Dit vraagt echter een betrekkelijk grote inspanning bij invoer, en zal waarschijnlijk de resultaten niet verbeteren ten opzichte van invoer van de regenduur.

Naast het bepalen van de regenintensiteit is het noodzakelijk de infiltratiecapaciteit van het water in de bodemmatrix nauwkeurig vast te stellen. De methode zoals gehanteerd in SWATRE is daarvoor niet geschikt zoals uit het vorige hoofdstuk bleek. In het nieuwe programma SWACR wordt een onderscheid gemaakt tussen constante potentiaal en constante flux infiltratie. In de periode met constante flux infiltratie infiltreert alle neerslag in de bodemmatrix, na deze periode treedt er plasvorming op en is er sprake van een constante potentiaal infiltratie. Indien het tijdstip van plasvorming bereikt is (zoals berekend met formule (14)) treedt de constante flux infiltratie in.

Om te bepalen wanneer het niet geïnfiltreerde water als bypass-flow door de scheuren in het bodemprofiel infiltreert moet een waarde voor de maximale oppervlakteberging ingevoerd worden. Indien de hoeveelheid aan het oppervlak geborgen water deze maximale hoeveelheid bereikt treedt runoff-bypass-flow op. De maximale infiltratie in het geval van plasvorming wordt berekend met behulp van de formule van Stroosnijder (11).

Een gedeelte van de neerslag valt onafhankelijk van de infiltratiecapaciteit van de bodem direct in de scheuren, de direct bypass flow. Om deze hoeveelheid te bepalen moet het oppervlak van de scheuren aan de bovenkant van het bodemprofiel bekend zijn. In SWACR wordt aan de hand van de ingevoerde krimpkaracteristieken het actuele volume van de grond en daarmee het oppervlak van de scheuren aan het maaiveld berekend. De hoeveelheid neerslag die als direct-bypass-flow in de scheuren valt wordt zonder beperking onttrokken aan de totale neerslag en is gelijk aan de verhouding



## AANPASSINGEN AAN SWATRE (SWACR)

scheuroppervlak/totaal oppervlak vermenigvuldigd met de totale neerslag.

### 4.3 BEREKENING VAN DE GRONDWATERSTAND

Bij de bepaling van de grondwaterstand wordt de balans opgesteld van de in het profiel geborgen hoeveelheid water en de actuele hoeveelheid geïnfiltreerd of verdampt water. In SWACR bestaat deze geïnfiltreerde hoeveelheid water uit twee termen te weten de matrix-infiltratie bovenin het profiel en de scheurwandinfiltratie in de buurt van het grondwater, de bypass-infiltratie. De bypass-infiltratie is in het hoofdprogramma al bij de waterbalans, die ook gebruikt wordt bij het bepalen van de grondwaterstand, opgeteld. In vergelijking met SWATRE zal SWACR de grondwaterstand vaker en heviger moeten aanpassen om de balans in evenwicht te houden.

Het criterium dat bepaalt bij welke overschot of tekort in de waterbalans de grondwaterstand aangepast wordt ter compensatie, de zogenaamde DEL-term, bedroeg in de gebruikte versie van SWATRE 0.1 cm. Bij de toepassing van dit criterium op de berekening van de grondwaterstand in kleigronden kan dit moeilijkheden opleveren. Vanwege de steile pF-curve van klei kan er slechts weinig water geborgen worden in de buurt van het grondwaternivo. Dit betekent dat een kleine hoeveelheid extra vocht in deze zone, de grondwaterstand snel kan laten stijgen. Omgekeerd, als het tekort of overschot in de waterbalans gecompenseerd moet worden door grondwaterstands daling of -stijging, moet dit gebeuren over een vrij grote diepte. Indien het gebruikte criterium hiervoor te groot is, resulteert dit in niet reële plotselinge stijgingen van het grondwaternivo.

In verband hiermee is het criterium voor toepassing op kleigronden verscherpt tot 0.02 in de plaats van 0.1. Dit blijkt meer gelijkmatiger veranderingen van het grondwaternivo te veroorzaken. In geval van een grote bypass-term treden wel sterke plotselinge veranderingen op, hetgeen ook overeen komt met de werkelijkheid.

Toepassing van het scherpere criterium heeft wel tot gevolg dat de stapjes waarmee de grondwaterstand gecorrigeerd wordt in sommige gevallen kleiner moeten zijn dan gewoonlijk in verband met optredende instabiliteiten. Verandering van de stapgrootte van 0.5 cm naar 0.25 cm geeft in de praktijk een stabiele oplossing.

### 4.4 BEPALING TIJDSTAP

De bepaling van de tijdstapgrootte vindt in het programma plaats zoals in hoofdstuk 3 behandeld is. Door het toepassen van regenperiodes en het onderscheid tussen constante flux en constante potentiaal infiltratie wordt de bepaling van de tijdstapgrootte aan enkele extra voorwaarden gebonden. In SWACR wordt daartoe eerst de tijdstap op de gebruikelijke manier uitgerekend, daarna wordt bepaald of deze tijdstap voor een gedeelte voor en voor een gedeelte na een het begin of eind van een regenperiode valt of van het begin van de constante potentiaal infiltratie. Als dit het geval is wordt de tijdstap gereduceerd tot het begin of het eind van de periode.

Aangezien de tijdstap afhankelijk gesteld is van de vochtverandering in het bodemprofiel, worden in het begin van een regen- of infiltratieperiode te grote tijdstappen bepaald. Voor het bepalen van de infiltratiecapaciteit

## AANPASSINGEN AAN SWATRE (SWACR)

is het belangrijk dat het begin van de infiltratie nauwkeurig met kleine tijdstappen doorgerekend wordt, vanwege de snelle verandering van deze capaciteit. Bij het begin van een infiltratie of regen-periode wordt de tijdstap daarom op een kleine waarde gesteld (0.0001). Na het doorlopen van de eerste tijdstap is de vochtverandering in het bodemprofiel zo groot, dat het programma zelf de tijdstap niet te groot kiest. Een aanpassing is dus slechts nodig voor het bepalen van de eerste tijdstap.

### 4.5 HET GEBRUIK VAN VOCHTGEHALTEN

Het is niet noodzakelijk om de volumes en vochtgehalten in het programma aan te passen ten gevolge van de zwel- en krimp. Aangezien de in het laboratorium vastgestelde pF-curven en doorlatendheidskarakteristieken, vochtgehalten bevatten op basis van het constante volume van de monsterringen, wordt bij consequent gebruik de waterbalans niet verstoord.

In het programma is het slechts van belang dat de hoeveelheid geborgen water tussen de verschillende drukhoogten juist gegeven wordt, aangezien het vochtgehalte in het basisalgoritme slechts voorkomt in de continuïteitsvergelijking. Door het volume van de grond in de berekening constant te veronderstellen, worden de vochtgehalten als het ware gerelateerd aan het constante volume van de monsterringen zoals in de laboratoriumbepalingen. De reële vochtgehalten zoals die in het veld gemeten zouden worden zijn dan weliswaar niet correct, de hoeveelheid water van belang in de waterbalans ( $\theta_L * V$ ) is dat wel.

De in hoofdstuk 2 genoemde onzuiverheid in de doorlatendheden wordt gedeeltelijk opgeheven door het eveneens constant veronderstellen van de afstandsstep DX. Gezien de nauwkeurigheid van de doorlatendheidsmetingen op zichzelf lijkt het niet noodzakelijk om een en ander verder te modificeren.

## HOOFDSTUK 5

### SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

#### 5.1 HET PROEFGEBIED

Het proefgebied waarvan de fysische eigenschappen in het model SWACR ingevoerd zijn is gelegen in het Friesche knipkleigebied in de buurt van Oosterend tussen Sneek en Leeuwarden. De grond wordt geklassificeerd als poldervaaggrond. De kleigronden in dit gebied vertonen zonder twijfel de zwel- en krimpverschijnselen zoals die in hoofdstuk 2. beschreven zijn.

In het kader van een onderzoek van het I.C.W. en L.D.-Friesland betreffende "de relatie tussen ontwatering, bodemfysische eigenschappen en plasvorming in knipkleigebieden", zijn er gedurende 1986 veldmetingen verricht op twee geselecteerde proefvelden. Een van deze proefvelden was voorzien van buizendrainage en was ten behoeve daarvan tevens geegaliseerd, een tweede proefveld was niet voorzien van buizendrainage, maar van een traditionele begreppeling met een bolvormige perceelssligging. Tijdens het onderzoek is alleen gebruik gemaakt van de metingen verricht aan het gedraineerd perceel, vanwege de moeilijkheden die een onregelmatig gevormd perceel veroorzaakt bij modellering.

De bodem op de beide (naburige) percelen vertoonde enige variatie in granulaire samenstelling. Het gedraineerde perceel bleek meer fijne delen ( $<16\mu\text{m}$ ) te bevatten dan het begreppelde perceel zoals blijkt uit BIJLAGE 5. waarin de beide textuurverdelingen weergegeven zijn. Het percentage  $<2\mu\text{m}$  bleek op het gedraineerde perceel 40-50% te bedragen.

De metingen aan het proefveld betroffen op de eerste plaats metingen van de bodemfysische eigenschappen doorlatendheid en drukhoogteverloop in het laboratorium aan ongestoorde monsters op verschillende diepten met behulp van de verdampingsmethode (BEUVING, 1983). Tevens werden voor verschillende diepten krimpkaracteristieken bepaald met behulp van de SARAN-methode (BRONSWIJK, 1986a).

Naast deze eenmalige laboratoriummetingen zijn in 1986 veldmetingen verricht. Continu werden geregistreerd: grondwaterstand, drainafvoer en neerslag. Periodiek werden gemeten: gravimetrisch vochtgehaltes, drukhoogteprofielen, bodemlaagdikteveranderingen en maaiveldzakkingen. Daarnaast vonden controlemetingen plaats van de drainafvoer en grondwaterstand.

## 5.2 VASTE INVOERGEGEVENS VAN HET MODEL

### 5.2.1 Bovenrandvoorwaarden

De bovenrandvoorwaarden die in het model benodigd zijn, bestaan hoofdzakelijk uit weersgegevens. Op de proeflocatie is uitsluitend de neerslag gemeten, zodat de overige gegevens uit andere bronnen geput moesten worden. De meest voor de hand liggende bron in deze is het Maandelijks Overzicht Weersgesteldheid (K.N.M.I., 1986), waarin van enige weerstations de belangrijkste weersgegevens gegeven worden.

Aangezien het model vrij gedetailleerde metingen gebruikt voor met name het berekenen van de verdampingstermen, kwamen in feite slechts de K.N.M.I.-hoofdstations in aanmerking, waar alle benodigde termen dagelijks berekend danwel gemeten worden. Het meest nabije hoofdstation was Eelde op 40 km, voor enige ontbrekende neerslaggegevens zijn tevens de data van het station Leeuwarden op 20 km gebruikt.

#### 5.2.1.1 Neerslaggegevens

De neerslaghoeveelheid op het proefveld is gemeten vanaf dag 106. In de aanlooperperiode van het model van dag 60 t/m 106 zijn aanvullende neerslaggegevens gebruikt van station Leeuwarden. In BIJLAGE 6. is een histogram van de verdeling van de neerslag gedurende het jaar gegeven.

In de nieuwe versie van het model is naast een dagelijkse neerslaghoeveelheid tevens een dagelijkse neerslagduur benodigd. Deze neerslagduren zijn bepaald uit de neerslagstroken uit de regenmeter. In die gevallen waarbij sprake was van duidelijke hevige buien waarin de meeste neerslag viel, is de tijd waarin deze buien vielen als maatgevende regenduur aangehouden, om te voorkomen dat het model uit de totale regenduur een regenintensiteit berekent die te laag is. Bij de aanvullende gegevens van het station Leeuwarden kon hiermee geen rekening gehouden worden aangezien de opgave van het K.N.M.I. slechts de totale regenduur betreft, deze waarden werden echter slechts gebruikt tijdens de aanlooperperiode.

In BIJLAGE 6. is tevens een histogram gegeven met de dagelijks optredende regenintensiteit. Tevens zijn in deze bijlage twee histogrammen opgenomen betreffende de frequentieverdeling van de neerslaghoeveelheid en van de neerslagintensiteit. Indien in het model de regenduur niet ingevoerd zou worden maar verondersteld zou worden dat de regenval gedurende de hele dag valt, zou deze klasse van intensiteiten slechts 3% van het totaal aantal buien bevatten, de bypass-flow zou in strijd met de werkelijkheid drastisch verminderen.

#### 5.2.1.2 Verdampingstermen

Voor het bepalen van de potentiële evapotranspiratie zijn een grote hoeveelheid meteorologische gegevens nodig als invoer in het model, afhankelijk van de methode die gehanteerd wordt. De benodigde gegevens worden slechts op de 5 hoofdstations gemeten, waarvan het dichtstbijzijnde het station Eelde was. Een nadeel hiervan is, dat het dit station relatief ver verwijderd is van de proeflocatie.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

Een andere methode om de potentiële transpiratie in het model te brengen, is het expliciet invoeren van deze gegevens zoals door het K.N.M.I. berekend. In K.N.M.I. (1986) staan waarden vermeld van de potentiële verdamping berekend met de formule van Penman vgl. (24), voor een aantal weerstations op decadebasis. Aan de hand van de op de hoofdstations gemeten globale straling zou op deze manier de decadewaarde over de afzonderlijke dagen verdeeld kunnen worden. Om de potentiële gewasverdamping te berekenen zouden deze waarden vermenigvuldigd moeten worden met de gewasfactor  $f$ . Het voordeel van deze methode is, dat er verdampingsgegevens verkregen kunnen worden van relatief veel verschillende locaties. Een nadeel van deze methode is echter dat gewasfactor variabel is per seizoen en in mindere mate per locatie. Overigens worden de verdampingscijfers die door het K.N.M.I. vanaf april 1987 verstrekt worden, berekend met een andere formule dan voor april 1987 (formule van Makkink), dit betekent dat er hogere  $f$ -factoren gebruikt moeten worden (voor gras ong. 1.0)

In het onderzoek is gekozen voor het invoeren van de gegevens van het station Eelde, waarmee de theoretisch best onderbouwde methode namelijk die van Montheith-Rijtema gebruikt kon worden voor het bepalen van de totale evapotranspiratie.

De dagelijkse waarden van de relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur, windsnelheid op 10 m hoogte en globale straling konden direct uit K.N.M.I. (1986) gehaald worden.

De windsnelheid op 2 m hoogte die voor het model noodzakelijk is, werd afgeleid uit het logaritmisch windprofiel. Voor het berekenen van voor de netto straling benodigde langgolvlige straling werd gebruik gemaakt van de benadering die door het K.N.M.I. gehanteerd wordt (DE GRAAF, 1983):

$$R_1 = -\sigma * T^4 * (0.47 - 0.067 * \sqrt{e2}) * (0.2 + 0.8 * n/N) \quad (41)$$

$R_1$  : netto langgolvlige straling [W/m]

$\sigma$  : constante van Stefan-Boltzman [ $W/m^2 K^2$ ]

$T$  : absolute temperatuur [K]

$e2$  : dampspanning [mbar]

$n/N$  : relative zonneschijnduur [-]

Temperatuur, dampspanning en relatieve zonneschijnduur konden allen uit de maandelijkse weersgesteldheidsoverzichten gehaald worden.

De totale nettostraling wordt dan (DE GRAAF, 1983):

$$R_n = (1 - r) * R_s + R_1 \quad (42)$$

$R_n$  : totale nettostraling [ $W/m^2$ ]

$R_s$  : totale kortgolvlige (globale) straling [ $W/m^2$ ]

$r$  : reflectiecoëfficiënt [-]

De reflectiecoëfficiënt in formule (42) bedraagt voor open water 0.06, voor gras varieert deze tussen 0.22 en 0.27. Voor de modelberekeningen is de waarde 0.25 aangehouden voor gras.

Als in te voeren bedekkingsgraad voor gras werd 1.0 gehanteerd, als

gewashoogte werd 10 cm ingevoerd voor de periode mei t/m september en de 5 cm voor de rest van het jaar.

Voor de minimale en maximale gewasweerstand werden de waarden 44.0 respct 150.0 s/m ingevoerd (GELDERLAND, 1984).

De interceptieverdamping die in het model berekend wordt is moeilijk te schatten. FEDDES et.al. (1978), schatten de maximale interceptieverdamping voor onder andere gras, op 2.0 mm/d bij hevige buien. GELDERLAND (1984) schatten deze interceptieverdamping op ten hoogste 0.5 mm/dag, aangezien de relatief vaak gemeten interceptieverdamping van bossen al niet meer dan 1.0 mm/d blijkt te bedragen. De waarde 0.5 mm/d is in het model gebruikt, waarbij de overige parameters van vergelijking (31) aangehouden zijn als in FEDDES et.al (1978).

### 5.2.2 Onderrandvoorwaarden

Aangezien op de proeflocaties gedurende een jaar zowel grondwaterstands- als drainafvoermetingen verricht waren, kon een Q-h-relatie opgesteld worden voor het betreffende perceel. Ten opzichte van variaties van de bovenrandvoorwaarde die met het invoeren van de bypass-flow ingevoerd wordt, is dit een flexibele onderrandvoorwaarde. Nadeel is echter dat de relatie slechts geldt voor een klein gebiedje, en bepaald wordt door de ontwateringstoestand.

Omdat met name de geregistreeerde afvoerverlopen met behulp van drainmeters bijzonder onbetrouwbaar bleken te zijn, kon bij het opstellen van de relatie alleen gebruik worden gemaakt van de handmatig uitgevoerde controlemetingen, 13 in getal. In figuur 10. is de geconstrueerde relatie getekend.

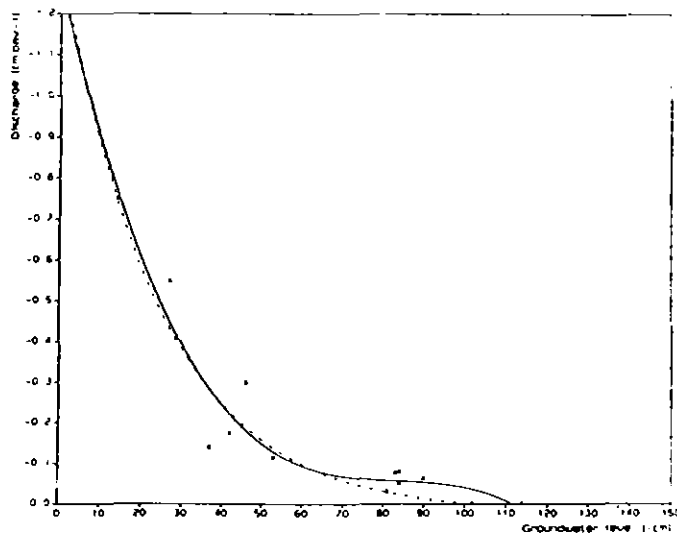


Fig. 10. Grondwaterstand-afvoerrelaties van het gedraineerde perceel, volgens derde graads polynoom (getrokken lijn) en volgens e-functie (gestippelde lijn).

De gestippelde lijn is de Q-h-relatie op basis van een e-functie zoals in formule (37) gegeven is aangevuld met een term c. Aangezien er geen

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

aanwijzingen van kwel of wegzijging in het gebied waren, is de afvoer 0 ter hoogte van het drainnivo (1.00-1.10m). Naar aanleiding van de vaak gemeten relatief hoge afvoeren bij een grondwaterstand van 80.0-90.0 cm -mv, is echter besloten om een 3e graads polynoombenadering toe te passen op de meetpunten, deze doorloopt het traject van de getrokken lijn, en verloopt tot een grondwaterstand tot 70 cm -mv identiek aan de e-functie.

### 5.2.3 Bodemfysische Parameters

#### 5.2.3.1 Het Bodemprofiel

Voor de simulatie is het bodemprofiel opgedeeld in 4 bodemlagen op grond van de korrelgrootteverdeling en de gevonden vochtgehalten en drukhoogten in het veld, het profiel ziet er als volgt uit:

- 0 - 40 cm: zware klei met humus en 10% structuurkrimp (wormgaten e.d.), verzadigd volumevochtgehalte van 57%.
- 40 - 60 cm: zware klei met weinig humus en zonder structuurkrimp, verzadigd volumevochtgehalte van 53%.
- 60 - 80 cm: matig zware klei met weinig humus en zonder structuurkrimp, verzadigd volumevochtgehalte van 48%.
- 80 - 120 cm: matig zware klei met weinig humus en zonder structuurkrimp, verzadigd volumevochtgehalte van 53%.

Een volledige beschrijving van de korrelgrootteverdeling in het profiel is te vinden in BIJLAGE 5.

In oorsprong was het perceel voorzien van begreppeling, later is het perceel voorzien van buizendrainage. Tevens heeft een egalisatie plaatsgevonden, waarbij de bouwvoor zoveel mogelijk teruggeplaatst is bovenin het profiel. Ten gevolge van deze egalisatie vertoont het profiel enige ruimtelijke variabiliteit voor wat betreft de samenstelling.

#### 5.2.3.2 Waterretentiecurves

De waterretentiecurves die met behulp van de verdampingsmethode bepaald worden blijken vaak gunstiger te zijn dan de werkelijke waarden in het veld, dit wil zeggen dat de vochtgehalten in het laboratorium hoger liggen dan in het veld. Daarnaast bleek met name de bovengrond van het profiel bijzonder heterogeen te zijn voor wat betreft de hoeveelheid bodemmateriaal.

Een en ander had tot gevolg dat de laboratoriumcurves vergeleken moesten worden met de veld pF-curven, om tot een zinnig resultaat te komen. Dit resulteerde in ingrijpende aanpassingen van de curven van de eerste twee bodemlagen, de onderste twee bodemlagen konden alleen voor wat hun startpunt van de pF-curve betreft worden aangepast.

Aangezien bij de verdampingsmethode en in het veld slechts drukhoogten geregistreerd kunnen worden tot ca. 1000 cm, moest vanaf pF=3 volstaan worden met een logaritmische interpolatie naar het punt met pF=7.

Bij het bepalen van de pF-curve van de eerste laag werd rekening gehouden met de structurele krimp die vooral in de bovenlaag plaats vindt. Zoals in hoofdstuk 2. reeds vermeld werd krimpt de grond in het traject met

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

structurele krimp niet bij vochtonttrekking, vanwege de relatief grote poriën die geleegd moeten worden. Figuur 11. geeft de in het veld bepaalde relatie tussen vochtonttrekking aan het profiel en krimp van de bodem.

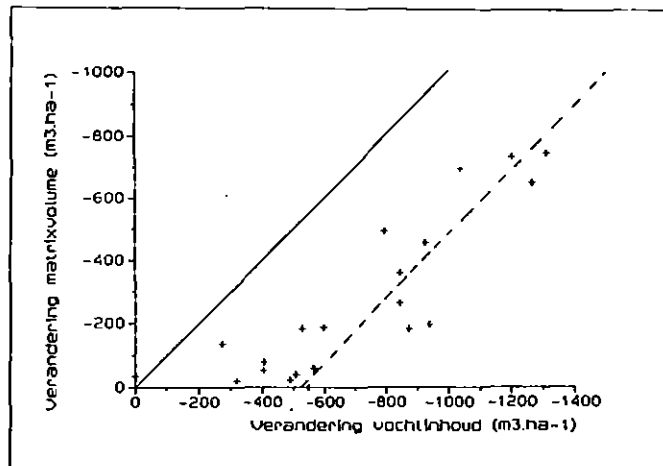


Fig. 11. In het veld gemeten verband tussen vochtonttrekking en krimp (getrokken lijn: geschatte verloop, stippellijn: verloop indien geen structuurkrimp optreedt).

Het blijkt dat de structurele krimp 40 - 50 m<sup>3</sup>/ha bedraagt, dit betekent een waterverlies van 40 - 50 mm voordat de grond in volume afneemt. Bij de simulatie wordt er vanuit gegaan dat deze structurele krimp in zijn geheel in de eerste bodemlaag plaats vindt, waardoor ongeveer de eerste 10% van het vochtverlies in de eerste bodemlaag van het profiel niet gepaard gaat met krimp.

Het legen van de grote poriën in het bodemprofiel, vindt voor een groot deel plaats onder invloed van de zwaartekracht, aangezien de capillaire krachten afnemen naarmate de poriën groter worden. Dit houdt in dat de drukhoogte in de waterretentiecurve minder snel toeneemt in het eerste stuk na het verzadigingspunt dan in het geval van een bodem zonder structurele krimp. In figuur 12. zijn onder andere de pF-curven van de eerste laag (met structurele krimp) en de tweede laag (zonder structurele krimp) getekend, beide curves zijn identiek met uitzondering van het eerste deel waar structurele krimp optreedt in de bovenste bodemlaag.

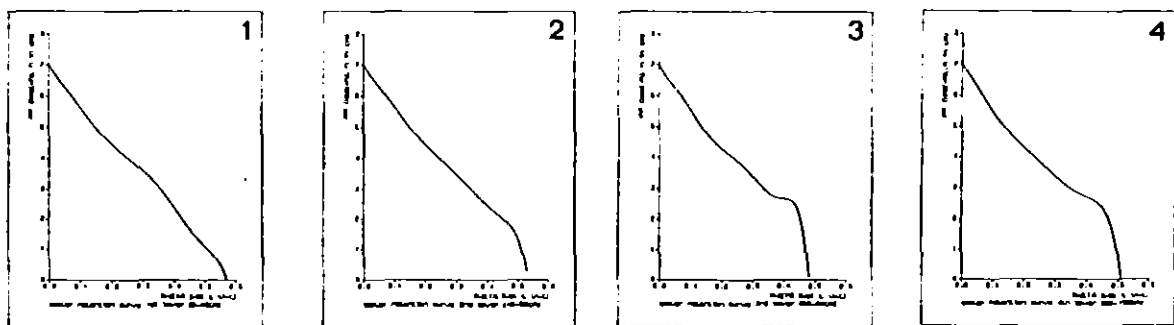


Fig. 12. pF-curven van de 4 bodemlagen in het bodemprofiel van het proefperceel.



SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

De toename van de de drukhoogte in de eerste bodemlaag bij een onttrekking van 10% vocht vanaf het verzadigingspunt bedraagt 20 cm en is geschat uit de veld-pF-curven. De toename van de drukhoogte in hetzelfde traject in de tweede bodemlaag is bedraagt 160 cm.

De structurele krimp wordt ook wel gezien als een extra waterberging van het bodemprofiel. Vooral na het winterseizoen blijkt deze berging aangesproken te worden. Dit geborgen water is echter vaak niet beschikbaar voor de plant, vanwege het gebrek aan lucht in de bodem tijdens deze natte perioden.

5.2.3.3 Doorlatendheidskarakteristieken

Het bepalen van de doorlatendheidskarakteristieken in het laboratorium met behulp van de verdampingsmethode vindt synchroon plaats met het bepalen van de pF-curven. De optredende drukhoogten in het monster worden gecombineerd met de verdamping.

Bij de bepaling van de doorlatendheid met behulp van de verdampingsmethode gelden dezelfde beperkingen aan het drukhoogtetraject zoals in de vorige paragraaf besproken. Daarnaast kan de verzadigde doorlatendheid nauwelijks bepaald worden. Ook vertonen de gevonden punten een grote spreiding, waarbij in het onderhavige geval ongewoon lage doorlatendheden in het traject met drukhoogten hoger dan 500 cm het resultaat waren.

Dit heeft er toe geleid dat de doorlatendheidskarakteristiek voor de eerste twee lagen bepaald is met behulp van enige betrouwbaar geachte karakteristieken uit BEUVING (1983), van een zware kleigrond in "Nieuw Statenzijl" (Groningen) waarvan de granulaire samenstelling gelijkenis vertoonde met die van het perceel in Oosterend.

De verzadigde doorlatendheid van de bodem werd voor alle vier de bodemlagen geschat op 0.4 cm/d, naar aanleiding van in de literatuur gevonden waarden voor de doorlatendheid (o.a. STROOSNIJDER, 1976) van de bodemmatrix van zware kleigronden. Het effect van de structurele krimp op de doorlatendheid van de eerste laag is nauwelijks te meten, en werd daarom geschat op een lineaire toename van 0.40 m/d (verzadiging matrix) naar 1.60 cm/d (verzadiging veldbodem) wanneer alle grotere poriën aan de stroming deelnemen.

In figuur 13. zijn de geconstrueerde doorlatendheidskarakteristieken voor de 4 bodemlagen gegeven.

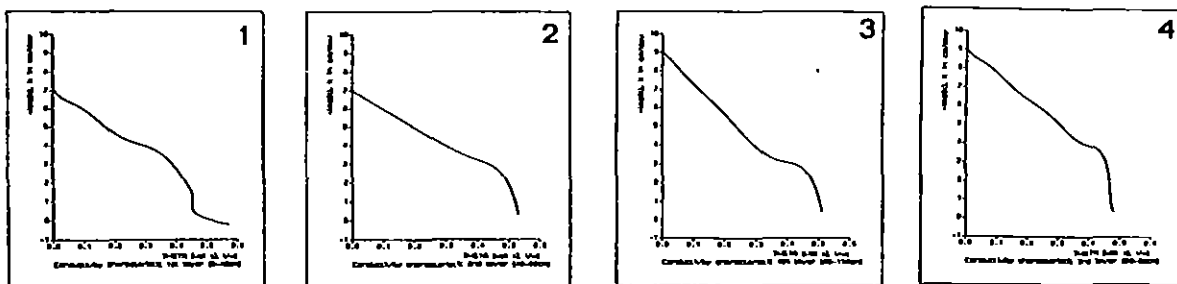


Fig. 13. Doorlatendheidskarakteristieken van de 4 bodemlagen in het bodemprofiel van het proefperceel.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

5.2.3.4 Krimpkaracteristieken

Van het bodemprofiel zijn op verschillende diepten krimpkaracteristieken bepaald. Deze bepalingen zijn uitgevoerd in het laboratorium met behulp van de zogenaamde SARAN-methode (BRONSWIJK 1986a).

De bepalingen hadden betrekking op kluitvormige monsters uit het bodemprofiel. Dit betekent dat een eventuele structurele krimp niet met deze methode bepaald wordt.

Indien er geen sprake is van structurele krimp, kan de laboratoriumkarakteristiek direct gebruikt worden als veldbodemkarakteristiek. Is er wel sprake van structurele krimp, dan moet de curve aangepast worden zoals in hoofdstuk 2 behandeld is. Daarbij moet het percentage structurele krimp aan de hand van veldbepalingen geschat worden.

Aangenomen wordt dat de structurele krimp zich alleen afspeelt in de bovenste laag. Daarom hoeft in dit geval alleen de eerste karakteristiek aangepast te worden, waarbij het percentage structurele krimp geschat wordt op 10% van de bodemmatrix (zie figuur 11.).

In figuur 14. worden de 4 krimpkaracteristieken gegeven die bij de simulaties gebruikt zijn.

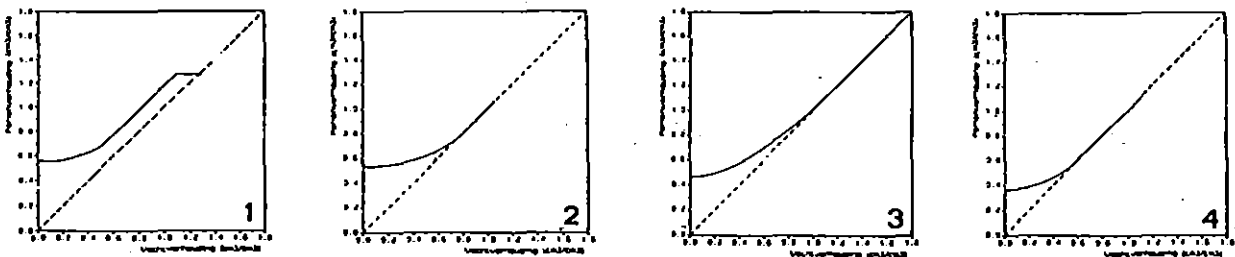


Fig. 14. krimpkaracteristieken van de 4 bodemlagen in het bodemprofiel van het proefperceel.

5.2.3.5 Infiltratiecapaciteit

Ten behoeve van het bepalen van de maximale infiltratiecapaciteit van de bodemmatrix, is een nieuwe methode ingevoerd in het model die beschreven is in paragraaf 4.3.5. Voor de bepaling van deze capaciteit is het noodzakelijk de waarde van de sorptiviteit bij ieder vochtgehalte vast te stellen. Zoals al eerder werd opgemerkt, is veruit de meest nauwkeurige methode, een directe bepaling in het veld. Deze metingen zijn echter nogal tijdrovend en lastig en zijn derhalve nog niet uitgevoerd.

Om toch de methode te kunnen gebruiken, is volstaan met een bepaling van de sorptiviteit uit de pF-curven en doorlatendheidskarakteristieken, door voor ieder vochtgehalte de diffusiviteit uit deze gegevens te berekenen, door toepassing in formule (13b). STROOSNIJDER (1976) vindt voor zware zeeklei een sorptiviteit van  $1.94 \text{ cm/dag}^{1/2}$  terwijl uit de berekeningen met de karakteristieken van de grond op het proefveld  $2.84 \text{ cm/dag}^{1/2}$  bepaald werd voor een volkomen uitgedroogd profiel.

In figuur 3. (hoofdstuk 2.) zijn de infiltratiecapaciteit en cumulatieve

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

infiltratie van de bovengrond in Oosterend geschets, met behulp van de berekende sorptiviteiten, uitgaande van formule (11a) en (11b) voor een isotroop profiel.

### 5.3 RESULTATEN VAN DE SIMULATIE.

De simulaties die met het aangepaste model SWACR uitgevoerd zijn, hadden vooral ten doel het gewijzigde model te toetsen aan de in 1986 uitgevoerde veldmetingen, te weten de gemeten grondwaterstanden en de gemeten vocht- en drukhoogteprofielen, en daarmee samenhangend de gemeten maaiveldzakking. Door het ontbreken van (moeilijk te bepalen) grasopbrengsten, kon het model hierop niet getoetst worden.

De belangrijkste tijdens de definitieve run gebruikte parameters en opties zijn:

max. tijdstap:	0.5 dag
max. verandering vochtinhoud:	0.005 cm
max. verandering grondwaterstand:	0.25 cm
onttrekkingspatroon en sinkterm:	FEDDES
afname sinkterm na h4:	parabolisch
diepte wortelzone:	25 cm
coëfficiënten sinktermgrafiek:	h1 = 10 cm h2 = 25 cm h3L= 200 cm h3H= 600 cm h4 = 8000 cm
aantal compartimenten:	40
initiele grondwaterstand:	-10.0 cm
beginvoorwaarde:	profiel in evenwicht met grondwater
max. berging aan maaiveld:	0.1 mm
infiltratiecap. scheurwanden:	0.5 cm/cm.dag

In het navolgende zal eerst de simulatie van de grondwaterstand besproken worden, en daarna de simulatie van de vochtverdeling in het profiel en de daarbij optredende zwel- en krimpverschijnselen. De invloed van variaties in de invoer-parameters en -opties op de berekeningen komen ter sprake in de paragrafen handelend over de gevoeligheid.

#### 5.3.1 Simulatie Van De Grondwaterstand

Een van de belangrijkste effecten van de bypass-flow, is het sneller reageren van de grondwaterstand op de hoeveelheid neerslag, aangezien de neerslag die niet geïnfiltreerd of geborgen kan worden in de matrix of aan het maaiveld, door de scheuren vrijwel direct het grondwater bereikt.

Teneinde het effect van de bypass-stroming te kunnen beoordelen, is het aangepaste programma SWACR met en zonder het voorkomen van scheuren gerund. Hierbij is er vanuit gegaan dat, indien er scheuren voorkomen, deze het hele jaar door min of meer aanwezig zijn, onafhankelijk van het vochtgehalte van de bovenste laag.

De ervaring leert dat het niet geïnfiltreerde water altijd naar de

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

scheuren toe stroomt, onafhankelijk van de grootte van de scheuren of de de verdeling van de scheuren over het maaiveld. In het geval van weinig scheuren zal de weg die het water over het maaiveld moet afleggen wel groter zijn, hetgeen slechts tot uitdrukking komt in een iets hogere bergingscapaciteit van het maaiveld.

Het oppervlakte van de scheuren dat in het programma berekend wordt, is veeleer een statistisch gegeven omtrent de gemiddelde toestand van het maaiveld, en zegt niets over de variatie van deze toestand. Eenvoudig is voor te stellen dat bij een berekend scheuropervlak van 0.0 cm, veel scheuren volledig dichtgezwollen zijn, terwijl een kleiner deel nog net geopend is. Rekening houdend met het voorgaande zal er dus wel runoff-bypass-stroming optreden door de weinige open scheuren. Alleen in het natte winterseizoen zullen alle scheuren volledig dichtgezwollen zijn. De fout echter die gemaakt wordt door het veronderstellen van bypass-stroming zal dan klein zijn, gezien de hoge ligging van het grondwaterniveau.

Figuur 15. toont de verdeling van de totale infiltratie over de bypass-flow en de matrixinfiltratie gedurende 1986 op het proefperceel zoals door SWACR berekend werd:

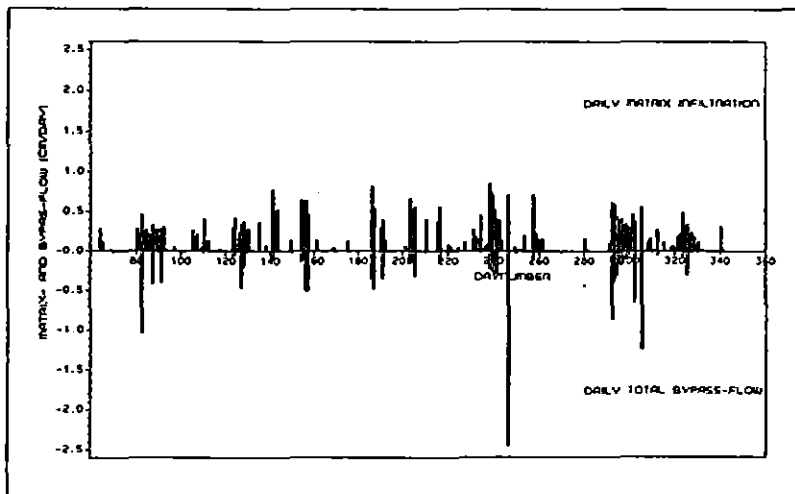


Fig. 15. Verdeling tussen bypass- en matrixinfiltratie gedurende 1986 in Oosterend zoals berekend door SWACR.

Figuur 16. toont het verloop van de grondwaterstand tijdens het seizoen 1986, zoals gemeten (driehoekjes) en zoals berekend met scheuren (getrokken lijn) en zonder scheuren (stippellijn).

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

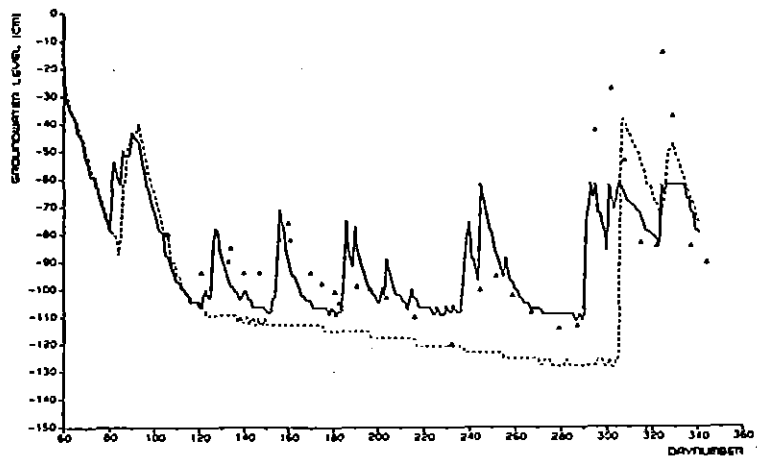


Fig. 16. Gemeten en berekende grondwaterstand met (SWACR) en zonder (SWATRE) scheuren gedurende 1986 in Oosterend.

————— = met scheuren  
- - - - - = zonder scheuren

In het geval zonder scheuren is er vanuit gegaan dat al het aangeboden water geïnfiltreerd kan worden in de matrix, in het geval met scheuren werd het niet geïnfiltreerde water toegerekend aan de bypass-flow en voor een gedeelte aan de oppervlakteberging (1 mm). Het blijkt duidelijk dat door het verwaarlozen van de bypass-flow, de pieken in het grondwaterstand niet berekend worden, met andere woorden al het geïnfiltreerde water wordt in de bodematrix geborgen, het profiel zal daarom natter zijn dan in het geval met scheurvorming. De enige pieken die wel berekend worden, komen voor in het wintersseizoen, waarin de grondwaterstand voor een belangrijk deel door het vocht in de matrix wordt beïnvloed, zoals later blijkt uit figuur 20. tijdens de gevoeligheidsanalyse.

### 5.3.2 Simulatie Van De Waterbalans

Naast de grondwaterstand, heeft de verdeling van het water in het onverzadigde bodemprofiel boven de grondwaterstand een effect op de verschillende waterbalanstermen. Een en ander spits zich voornamelijk toe op het bepalen van de actuele transpiratie van het gewas. De waarde van de actuele transpiratie is direct gekoppeld aan de gewasproductie.

De actuele verdamping werd berekend met de formule van Montheith-Reitema. In tabel 1 staan de voornaamste cumulatieve waterbalanstermen vermeld zoals die berekend werden rekening houdend met (SWACR) en en zonder (SWATRE) scheurvorming en bypass-flow. Figuur 17. geeft de verdeling van de waterbalanstermen gedurende het jaar weergegeven voor beide situaties.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

	Met scheuren (SWACR)	Zonder scheuren (SWATRE)
Neerslag	45.0	45.0
Interceptie	6.9	6.9
Bodemevapor.	2.1	2.1
Pot. Transp.	44.0	44.0
Act. Transp.	24.2	28.2
Bypass-flow	14.0	0.0
Drainafvoer	15.4	12.8
Flux wortelz	0.7	-11.0

Tabel 1. cumulatieve waterbalanstermen Oosterend 1986 berekend met SWATRE (zonder scheuren) en SWACR (met scheuren), in cm, gedurende dag 60-343.

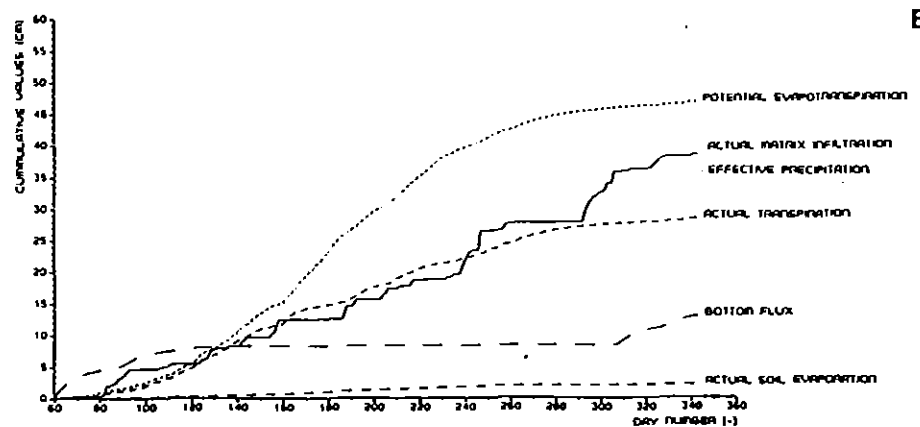
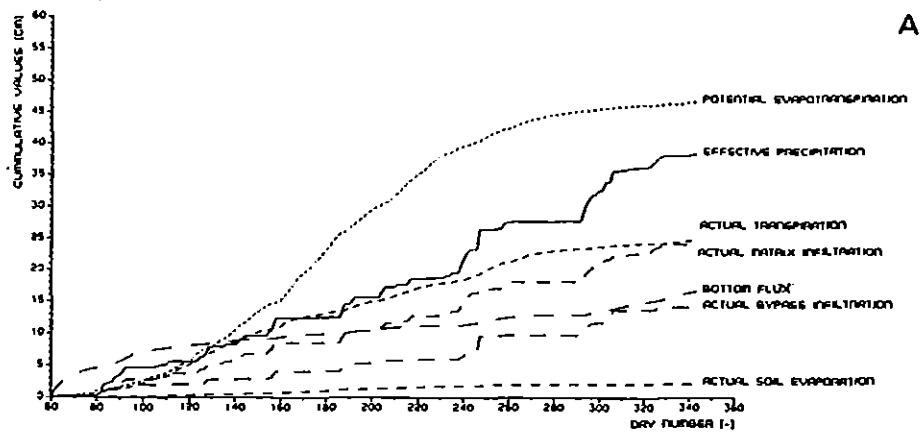


Fig. 17. Opbouw van de berekende waterbalanstermen gedurende het jaar 1986  
 a. rekening houdend met scheurvorming (SWACR)  
 b. zonder rekening houdend met scheurvorming (SWATRE)

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

Uit de overzichten blijkt dat de actuele verdamping van het gewas ver achter blijft bij de potentiële verdamping in beide situaties. Een verschil tussen de actuele verdamping in de situatie zonder bypass-flow en die met bypass-flow is wel aanwezig maar dit verschil is minder dan op grond van de hoeveelheid bypass-flow die optreedt in de simulatie met scheuren verwacht zou worden. Een groot deel van de hoeveelheid water die in de situatie met scheuren door middel van bypass-flow direct naar het grondwater stroomt, verdwijnt blijkbaar ook in de situatie zonder scheuren maar dan van bovenaf naar diepere lagen in het bodemprofiel (zie tabel 1. flux door wortelzone).

### 5.3.3 Simulatie Van De Vochtdistributie

Door het optreden van bypass-flow kan er minder water bovenin de bodemmatrix infiltreren, een deel van de neerslag komt onderin de scheuren pas tot infiltratie. Dit heeft tot gevolg dat er minder vocht bovenin het bodemprofiel terecht komt, in vergelijking met de situatie waarbij er geen bypass-flow optreedt. Hierdoor zullen de drukhoogten in de situatie met bypass-flow hogere waarden bereiken.

Ter toetsing van de gesimuleerde vocht- en drukhoogteverlopen waren periodiek gemeten gravimetrische vochtgehalten en tensiometermetingen op verschillende diepten beschikbaar. In figuur 18. zijn enkele karakteristieke verlopen gegeven zoals die berekend werden door SWATRE (zonder scheuren) en SWACR (met scheuren) met daarbij de in het veld gemeten drukhoogten en vochtgehalten.

Uit figuur 18. blijkt zoals verwacht dat de hoeveelheid vocht bovenin het bodemprofiel zoals berekend met SWACR kleiner is dan de hoeveelheid berekend met SWATRE. De berekende waarden van met name de drukhoogten berekend met SWACR na dag 180 blijken beter overeen te komen met de gemeten waarden in vergelijking met de drukhoogten berekend met SWATRE. In de periode voor dag 180 blijkt dat in beide simulaties de drukhoogten te hoog oplopen.

Vergelijking van het gemeten gravimetrisch vochtgehalte met het berekende is minder goed mogelijk ten gevolge van de variabiliteit van de dichtheid van de bodem, met name in het bovenste deel van het profiel. Dit verklaart de relatief grote afwijkingen in figuur 18b.

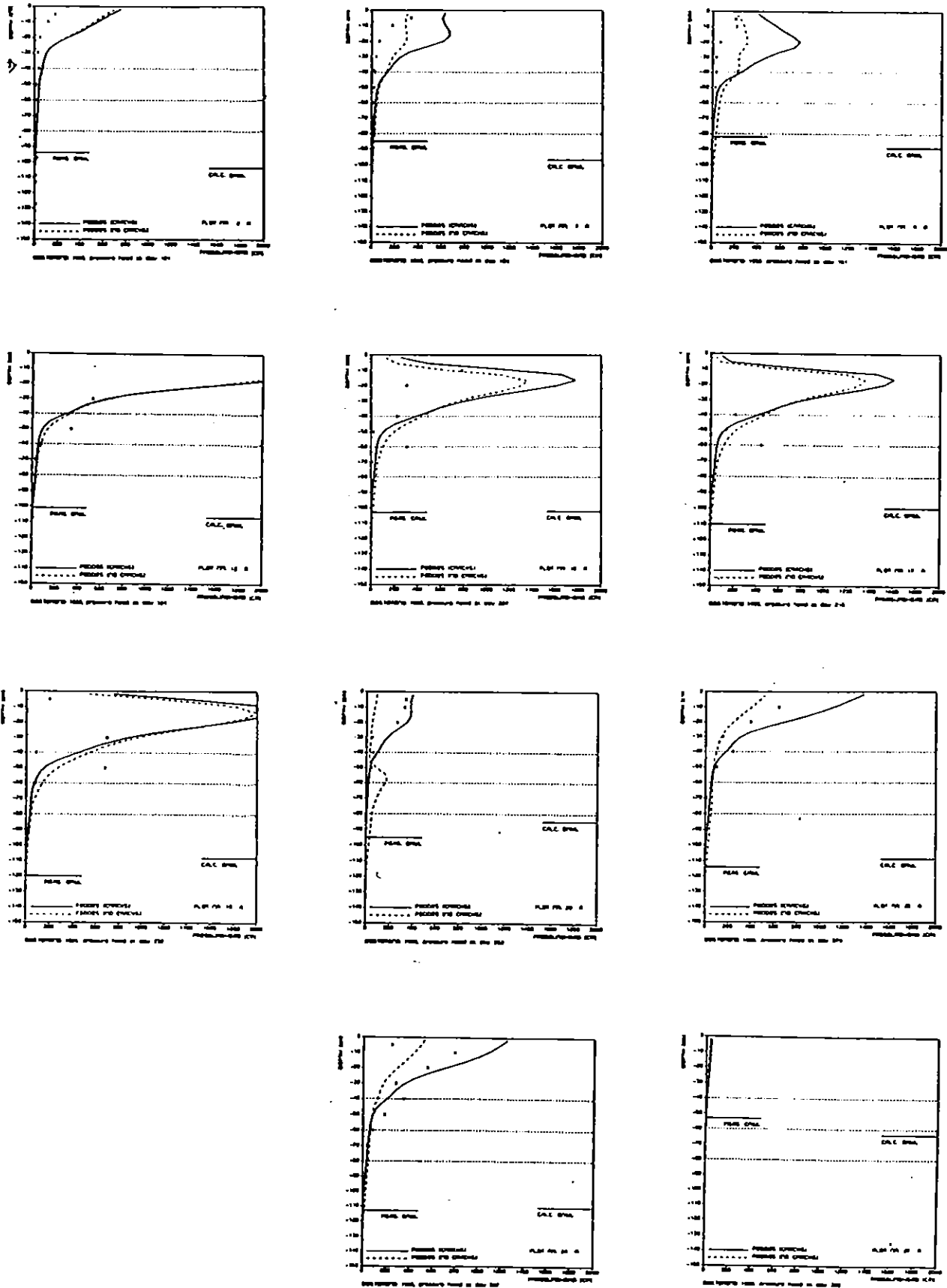


Fig. 18a. Gemeten en berekende drukhoogten in 1986 Oosterend.  
 stippellijnen: berekende verlopen met SWATRE (zonder scheuren)  
 getrokken lijnen: berekende verlopen met SWACR (met scheuren)



SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

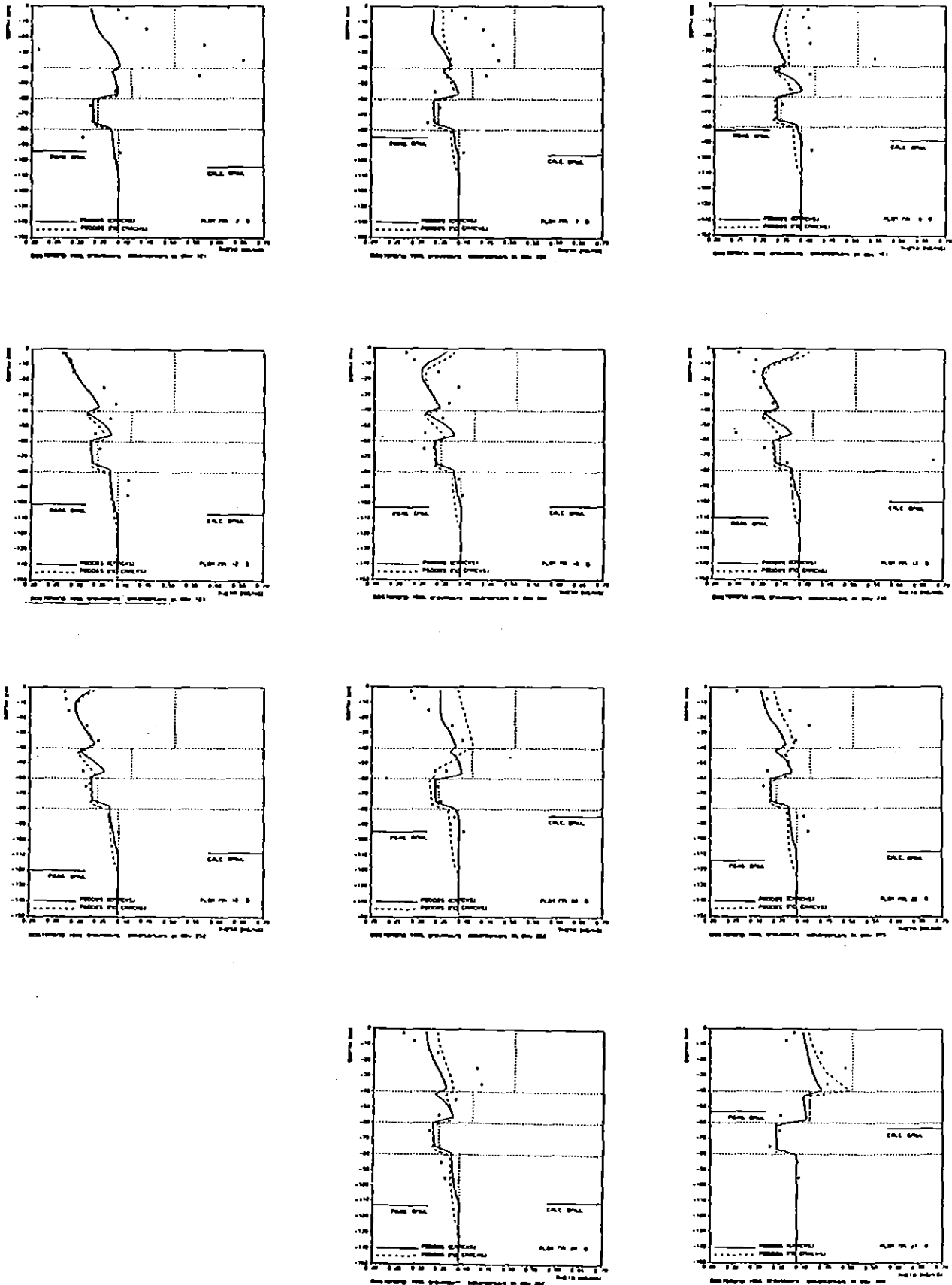


Fig. 18b. Gemeten en berekende gravimetrische vochtgehalte in 1986 Oosterend.  
 stippellijnen: berekende verlopen met SWATRE (zonder scheuren)  
 getrokken lijnen: berekende verlopen met SWACR (met scheuren)

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

### 5.3.4 Simulatie Van Het Zwellen En Krimpen Van De Bodemmatrix

Het zwel- en krimpgedrag van de bodem wordt door SWACR onder andere berekend in de vorm van zakking van het maaiveld. Omdat het krimproces isotroop is, is dit een goede maat voor de volumeverandering van de matrix in alle richtingen. In figuur 19. zijn de met SWACR gesimuleerde maaiveldzakkingen gedurende het jaar 1986 gegeven.

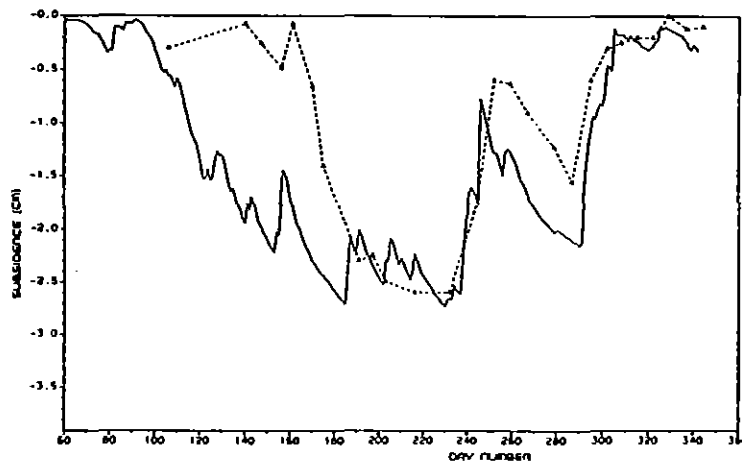


Fig. 19. Maaiveldzakking gedurende 1986 in Oosterend, berekend met SWACR (getrokken lijn) en gemeten (gestippelde lijn).

Uit figuur 19. blijkt dat de berekende maaiveldzakking na dag 180 redelijk overeenkomt met de gemeten zakking. Voor dag 180 berekent het model te hoge waarden voor de zakking, hetgeen overeenkomt met de geconstateerde te hoge waarden voor de drukhoogte en de te lage vochtgehalten.

## 5.4 GEVOELIGHEID BIJ DE SIMULATIE

### 5.4.1 Invloed Van De PF-curve Op De Grondwaterstand

Het grondwaternivo wordt aangemerkt als het nivo waar de capillaire krachten in de bodem gelijk aan 0 zijn. In het geval van simulatie van de grondwaterstand, is dit nivo moeilijk te bepalen, aangezien door het doorgaans steile verloop van de pF-curve vanaf het verzadigingspunt, de verschillen in vochtgehalte direct boven het grondwaternivo klein zijn.

In figuur 20. is een typerend beeld geschetst van het drukhoogteverloop in de buurt van het grondwaternivo in de onderzochte kleigrond.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

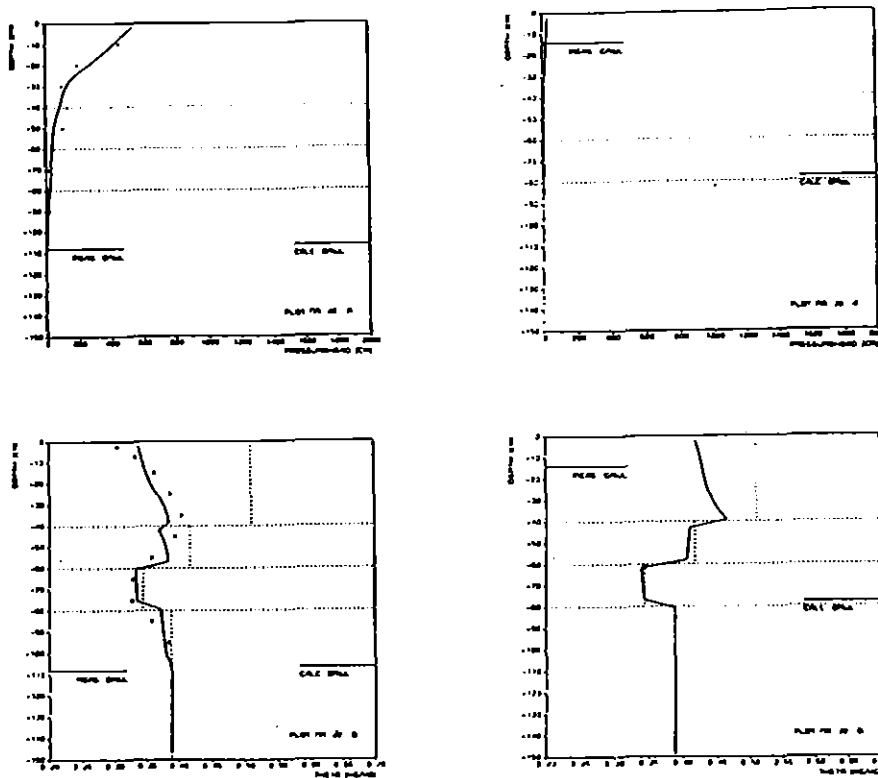


Fig 20. Verloop van de drukhoogte en vochtgehalte met de diepte (dag 267 en 325).

Uit de figuur is te zien dat er tijdens dag 267 slechts een verschil van 2% vochtgehalte optreedt tussen het grondwaternivo op 1.10 m -mv en een punt op 0.80 m -mv. dit representeert een hoeveelheid vocht van 6 mm, het drukhoogteverschil is echter 20 cm. Het is duidelijk dat een kleine onnauwkeurigheid in het rekenschema of de invoergegevens, een relatief aanzienlijke fout in het berekende grondwaternivo teweeg kan brengen.

In het bijzondere geval voor kleigronden komt hier nog bij dat de pF-curve in het hele vochttraject steil verloopt. In de praktijk betekent dit dat een ontrekking snel gevolgd wordt door een grote drukhoogte wat in een hoge tegen-flux resulteert, waardoor er een relatief langzaam afnemend vochtgehalte optreedt van beneden naar boven in het profiel.

Indien de pF-curven in het begin een nog steiler verloop zouden vertonen dan in het dit geval gebruikt is, worden de verschillen nog kleiner, en kan het systeem zelfs instabiel worden. Figuur 21. geeft een beeld van de schommeling van de grondwaterstand voor het geval dat het systeem net instabiel begint te worden, waarbij irrealistische schommelingen van het grondwaternivo optreden van ca. 30 cm/d. De (laboratorium-) pF-curve die voor het geval gebruikt werd was veel steiler dan de curve die gebruikt werd voor de uiteindelijke simulatie.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

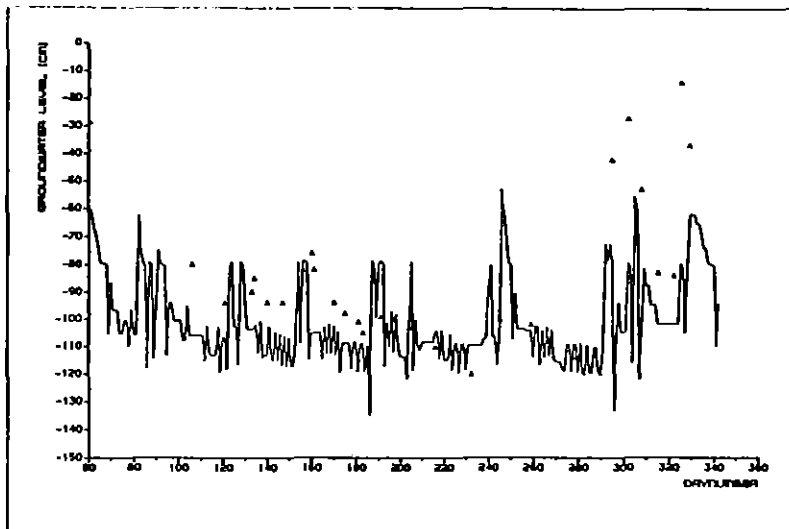


Fig. 21. Berekende instabiele verloop van het grondwaternivo, in het geval van extreem steile pF-curve.

Door de berekening met behulp van de waterbalans zoals beschreven in hoofdstuk 2., worden de meeste instabiliteitsproblemen ondervangen. Toepassen van extreem hoge drukgradiënten in het natte traject blijven echter problematisch.

#### 5.4.2 Invloed Van Bypass-flow En Oppervlakteberging Op De Grondwaterstand

In bovenstaande beschouwing is het bergingsvermogen van het maaiveld constant op 1mm gehouden. Deze parameter is echter moeilijk te bepalen, het is een gemiddelde over het hele perceel van de diepte van de mogelijk optredende plassen vermeerderd met de hoeveelheid water die door het gewas tijdelijk geborgen wordt voor zover dit niet als interceptieverdamping verdwijnt.

Aangezien het maaiveld tussen de scheuren waarschijnlijk bolvormig aflopend is, ten gevolge van de drogere en dus meer gekrompen buitenkanten van de scheuren, zal deze berging niet erg groot zijn. Voor het bepalen van de gevoeligheid zijn een aantal bergingscapaciteiten in het programma ingevoerd.

In figuur 22. is het berekende verloop van de grondwaterstand getekend bij verschillende waarden voor de oppervlakteberging. Bij deze simulaties is het wortelonttrekkingspatroon volgens Feddes gebruikt en een worteldiepte van 25 cm, ofschoon sommige worteldiepten en onttrekkingspatronen lichtelijk verschillende transpiratieverliezen berekenen (zie volgende paragraaf), is het effect op de grondwaterstand klein, het effect van de bypass-stroming en de daarmee samenhangende oppervlakteberging is overheersend.

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

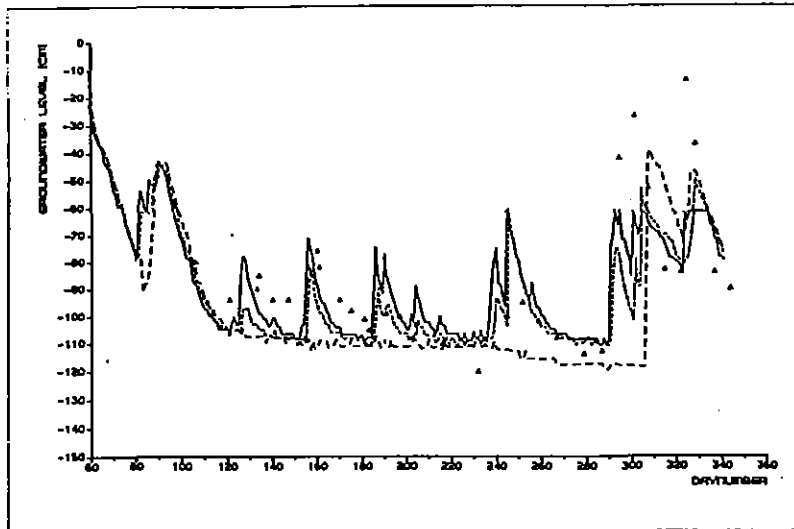


Fig. 22. Verloop van de met SWACR berekende grondwaterstandsverloop bij verschillende waarden voor de maximale oppervlakteberging.  
————— berging = 0.0 mm  
----- berging = 3.0 mm  
- - - - - berging = 15.0 mm

De berekende grondwaterstandsverlopen naderen bij een groter wordende bergingscapaciteit naar het verloop van de grondwaterstand waarbij geen rekening met scheurvorming wordt gehouden, hetgeen niet zo verwonderlijk is aangezien alle neerslag die niet kan infiltreren door het oppervlak wordt geborgen, en later tot infiltratie komt.

De grootte van de werkelijke berging is moeilijk te schatten en zal waarschijnlijk per seizoen en gewassoort afhankelijk zijn. Voor gras onder de gegeven omstandigheden lijkt een gemiddelde bergingscapaciteit van 1 mm aan het maaiveld een goede schatting gezien de hoogte van de pieken in het grondwaterstandsverloop.

### 5.4.3 Invloed Van Bypass-flow En Oppervlakteberging Op De Waterbalans

De hoeveelheid water die door de scheuren als bypass-infiltratie in het profiel terecht komt wordt bijna direct afgevoerd naar het grondwater, waar het meestal uit het profiel gedraineerd wordt. Hierbij is het enigszins van belang welke horizontale infiltratiecapaciteit genomen wordt, immers deze bepaalt welk deel van het profiel deelneemt aan de horizontale infiltratie, en dus in hoeverre het water versneld in het grondwater terecht komt. In de runs wordt voor deze parameter de waarde 0.5 cm per centimeter scheurdiepte genomen. Deze vrij lage waarde vertoont echter hetzelfde grondwaterstandsverloop als bij veel hogere waarden van de capaciteit.

Door het ontbreken van informatie omtrent de geometrie van de scheuren kan over deze parameter weinig zinnigs gemeld worden.

Uitgaande van een bijna direct aansluiting van het bypass-water op het grondwater, kan de waterbalans opgesteld worden voor de verschillende gevallen. Het blijkt dat voor alle gevallen met scheurvorming de directe bypass-flow beperkt blijft tot minder dan 1 cm. De runoff-bypass daarentegen varieert sterk. In tabel 2. zijn de belangrijkste waterbalanstermen

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

weergegeven voor het geval met scheuren bij verschillende bergingscapaciteiten en het geval zonder scheuren met een onbeperkte bergingscapaciteit.

GEVAL	QDIRECT	QRUNOFF	QMATRIX	QDEEP	TACT
z. scheuren	0.0	0.0	38.1	12.7	28.2
berging 1 mm	0.8	13.2	24.1	16.5	24.7
berging 2 mm	0.7	10.4	26.7	15.0	25.4
berging 3 mm	0.7	8.4	29.0	14.6	26.4
berging 4 mm	0.7	6.7	30.4	13.6	26.7
berging 10 mm	0.7	0.0	37.2	12.4	27.8

Tabel 2. Belangrijkste waterbalanstermen bij verschillende bergingscapaciteiten aan het maaiveld, in Oosterend gedurende dag 60-343 in cm/d (op basis van daggemiddelden).

- QDIRECT - direct bypass-flow
- QRUNOFF - runoff bypass-flow
- QMATRIX - matrixinfiltratie
- QDEEP - gedraineerd water
- TACT - actuele transpiratie

Uit de tabel volgt dat een hogere berging weliswaar een sterke verhoging van de matrix-infiltratie veroorzaakt, maar dat deze infiltratie slechts zeer gedeeltelijk aan de plant ten goede komt namelijk voor de helft tot een derde deel van de extra infiltratie, de rest wordt door de drains alsnog afgevoerd. Het effect van de bypass-flow wordt hiermee deels teniet gedaan.

#### 5.4.4 Invloed Van De Onttrekkingsfunctie Op De Vochtverdeling

Voor het berekenen van de wateronttrekking door plantenwortels aan het bodemprofiel moet eerst de hoeveelheid water bepaald worden die de wortels per lengteenheid potentieel kunnen onttrekken, zoals in hoofdstuk 3. besproken werd. Het onttrekkingspatroon volgens Feddes en volgens Prasad gaan er vanuit dat de totale potentiële wortelonttrekking gelijk is aan de potentiële verdamping, in het concept van Hoogland wordt uitgegaan van een maximale, per gewas afhankelijke, wortelonttrekking per diepte eenheid. Is de totale onttrekking over de maximale wortelzone kleiner dan de potentiële verdamping, dan wordt de maximale onttrekking dus a priori gereduceerd. De waarde van deze maximale onttrekking is moeilijk te bepalen.

Na het bepalen van de maximale onttrekking, wordt de actuele onttrekking bepaald door middel van een "sink-term". In de praktijk ligt het punt h1 vast op -10 cm en het punt h2 op -25 cm, voor de meeste landbouwgewassen. Voor het punt h4 wordt vaak het verwelkingspunt  $h = -16000$  cm ( $pF=4.2$ ) genomen, voor zwaardere gronden zonder speciale droogtebestendige vegetatie wordt bijna altijd de waarde -8000 cm aangehouden. Aangezien over de ligging van deze punten redelijke overeenstemming bestaat, worden ze in het model ook ongewijzigd gelaten.

De ligging van de punten h3H en h3L blijken minder vast te liggen, de vorm

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

van het verloop van de sink-term van  $h_{3H}/h_{3L}$  naar  $h_4$  is ook arbitrair, vaak wordt een rechtlijnig verband aangehouden, bij zwaardere gronden wordt echter vaak een parabolisch verloop verondersteld.

De keuze van zowel de maximale onttrekkingsfunctie als van de sink-term is per situatie afhankelijk, en kan alleen via calibratie plaatsvinden, aangezien een theoretische onderbouwing van de verschillende concepten veelal ontbreekt.

Om tot een keuze te kunnen komen van een concept, zijn verschillende opties getest, waarbij vooral de optredende drukhoogten in het profiel zijn beschouwd en vergeleken zijn met de gemeten drukhoogten. Als basis werd een in het veld geschatte bewortelingsdiepte van 25 cm aangehouden.

Toepassen van de verschillende concepten voor het onttrekkingspatroon gaven wisselende resultaten. In figuur 23, staan voor het concept van Feddes, Prasad en Hoogland met een maximale over de hele diepte constante wortelonttrekking van  $0.01 \text{ cm/cm}$ , enkele resultaten van zowel de vocht- als drukhoogteverdeling gegeven. In al de gevallen is het parabolische verloop van de "sink-term" gebruikt, met een waarde voor  $h_{3H}$  en  $h_{3L}$  van respct.  $-200 \text{ cm}$  en  $-600 \text{ cm}$ , en van  $h_4$  van  $-8000 \text{ cm}$ .

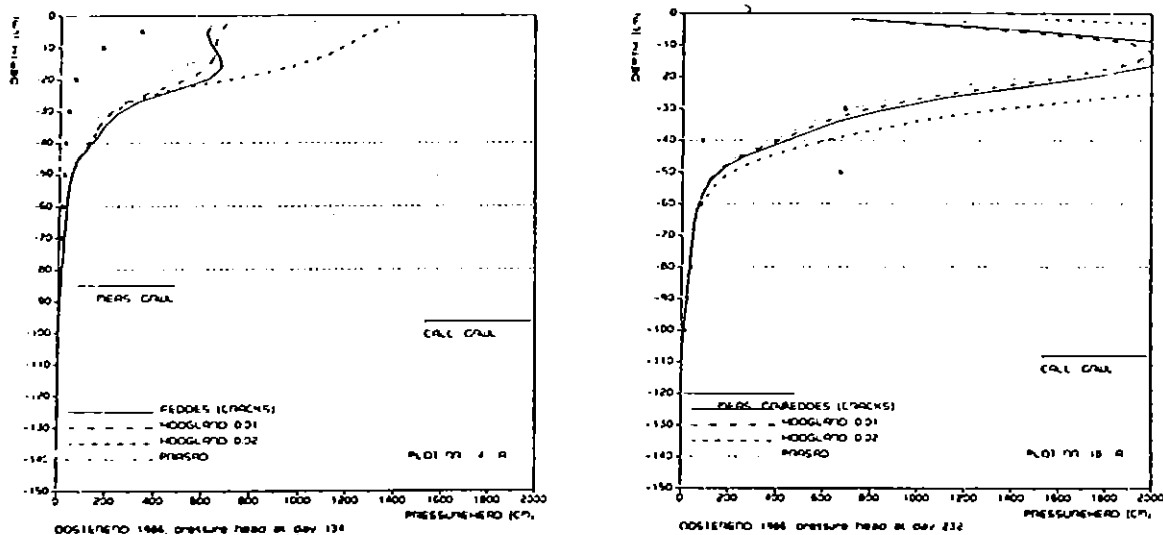


Fig. 23. Het verloop van de drukhoogte op enkele dagen in het bodemprofiel, volgens verschillende concepten voor de wortelonttrekkingsfunctie.

Uit alle gevallen blijkt dat waarden van de drukhoogte en vochtgehalte in het begin van het groeiseizoen te snel oplopen, dit betekent dat het water sneller dan in werkelijkheid het geval is uit de bodem op genomen of afgevoerd wordt. Dit werd ook al geconstateerd bij de bespreking van de resultaten.

Na dag 170 tonen de onttrekkingspatronen van Feddes en van Hoogland 0.01 een redelijke overeenkomst met de gemeten waarden van de drukhoogten. De berekende drukhoogten met het concept van Prasad zijn vaak te hoog dan in werkelijkheid gemeten, soms oplopend tot meer dan 5000 cm. Door deze hoge drukhoogten wordt de opname door het gewas beperkt, waardoor de grond vervolgens weer natter wordt en de drukhoogten weer lager. Op deze manier vertoont het onttrekkingspatroon van Prasad in deze situatie een schommeling

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

om een evenwichtswaarde heen. Dezelfde verschijnselen doen zich voor indien het concept van Hoogland gehanteerd wordt met een maximale ontrekkingsnelheid van 2.0 cm /cm .

Figuur 24. toont de cumulatieve verdeling van de transpiratie over de wortelzone in de drie gehanteerde concepten.

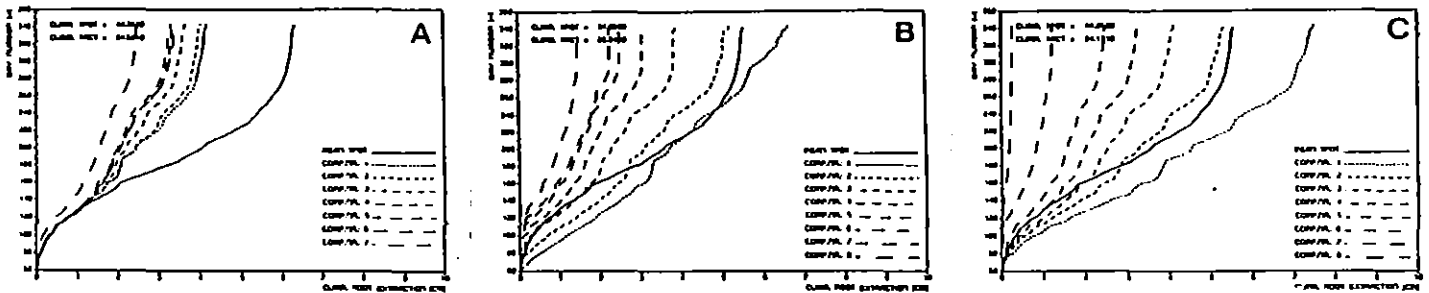


Fig. 24. Berekende cumulatieve ontrekking van water door de wortelzone op verschillende dieptes, uitgaande van verschillende concepten voor wortelonttrekkingsfunctie: FEDDES (a), HOOGLAND 0.01 (b) en PRASAD (c).

Uit de figuur blijkt dat de verdeling van de ontrekking in de verschillende concepten onderling sterk afwijkt. De reductie van de transpiratie vindt echter in alle concepten tijdens dezelfde perioden plaats en op iedere diepte ongeveer even hevig. Vooral de extreem droge perioden (dag 160-180, 190-200 en 220-230) vertonen een versterkte reductie, oplopend tot zelfs een totaal wegvallen van de transpiratie.

De reden voor de optredende verschillen is duidelijk. Het concept van Prasad concentreert de opname van de potentiële verdamping voor 3/4 in de bovenste helft van de wortelzone, in het geval van Hoogland 0.02 vaak nog extremer afhankelijk van de actuele transpiratie. Hierdoor wordt aan de bovenste compartimenten relatief veel water onttrokken met als gevolg dat de drukhoogte snel stijgt. Het concept van Feddes verdeelt de wortelonttrekking over de hele wortelzone gelijkmatig, hierdoor treden er in meer compartimenten beperkende drukhoogten op, echter minder extreem, dit reduceert het aantal extreme schommelingen t.g.v. opnamebeprekingen.

Wel moet de kanttekening gemaakt te worden dat bij sommige drukhoogteverlopen in het groeiseizoen de bovenste tensiometers "doorgeslagen" waren, en zodoende de druk niet gemeten kon worden. Het doorslaan van de tensiometers is een gevolg van optredende drukhoogten boven -1000 cm.

Het vervangen van de parabolische afname van de "sink-term" door een rechte lijn, en in mindere mate van het verhogen van de startwaarden voor de reductie van de transpiratie in de sink-functie, heeft tot gevolg dat de drukhoogten in het bodemprofiel nog hoger oplopen, zelfs tot waarden waarop er geen opname van water door het gewas meer mogelijk is. De evenwichtswaarde van de drukhoogte komt een flink stuk hoger te liggen.

Uit de verkregen resultaten kan geconcludeerd worden dat het concept van Prasad minder goed voldoet in de zware kleigrond, alhoewel dit wel oorspronkelijk ontwikkeld is voor zware gronden in India. Bovendien voldoet



SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

het concept van Hoogland ook niet indien de gebruikelijke waarden van 0.02-0.03 voor de factor a gebruikt worden (zie o.a. HOOGLAND, 1980). Het concept van Feddes en Hoogland 0.01 voldoen redelijk goed op grond van de gemeten en berekende drukhoogteverdeling in het kleiprofiel.

Beschouwing van de gemeten en berekende gravimetrische vochtgehalten toont echter minder grote verschillen. Het toont aan dat de conclusies erg betrekkelijk zijn, een minder steile pF-curve in het traject van pF 3 tot pF 4, die slechts verkregen is uit een schatting, kan de drukhoogten in de concepten van Prasad en Hoogland 0.02 sterk reduceren, tot wellicht acceptabele waarden.

5.4.5 De Invloed Van De Onttrekkingsfunctie Op De Actuele Transpiratie

Doordat in het groeiseizoen, wanneer de potentiële verdamping het grootst is, vaak drukhoogten optreden die beperkend werken voor de wateropname van de plant zoals in de vorige paragraaf besproken is, zal de actuele verdamping sterk afnemen. De reductie van de verdamping zet in het model in bij een drukhoogte van 200 cm (Epot = 0.5 cm/d) tot 600 cm/d (Epot = 0.1 cm). Dit zijn betrekkelijk lage waarden aangezien niet alleen het gewas minder diep kan wortelen, maar ook de wortels in hogere lagen zijn beperkt in hun ontwikkeling, de wortels worden in het algemeen slechts gevonden om de door structuurvorming gevormde aggregaten.

Om de gevoeligheid voor de actuele transpiratie van de verschillende benaderingen van de onttrekking door plantenwortels te testen zijn een aantal runs uitgevoerd, met de onttrekkingspatronen zoals in de vorige paragraaf behandeld. Tabel 3. en figuur 25. geven een samenvatting van de resultaten.

Smax	H2l	H2h	H2 - H3	Scheuren	Tact	Tact/Tpot
FEDDES	200	600	Parab.	nee	28.1	0.64
FEDDES	200	600	Parab.	ja	24.7	0.56
FEDDES	200	600	Lineair	ja	27.8	0.63
FEDDES	400	800	Parab.	ja	25.5	0.58
HOOGL.0.01	400		Parab.	ja	24.8	0.56
HOOGL.0.01	600		Parab.	ja	26.0	0.63
HOOGL.0.02	400		Parab.	ja	26.8	0.60
PRASAD	400		Parab.	ja	24.2	0.55

Tabel 3. Actuele transpiratie bij verschillende aannamen omtrent de wortelonttrekking, drukhoogten en transpiratie in cm gedurende dag 60-343 in 1986.

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

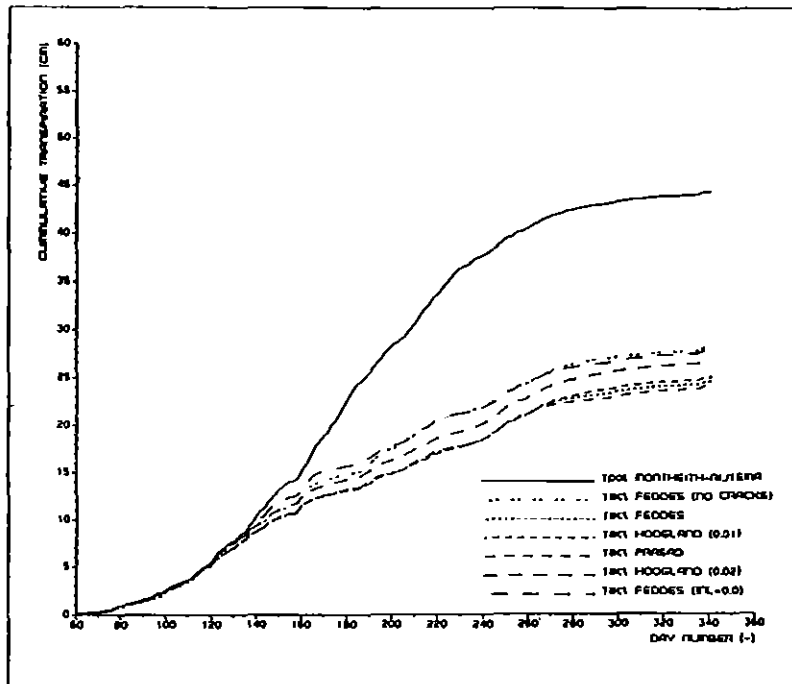


Fig. 25. Verdeling van de berekende totale actuele transpiratie gedurende dag 60-343 in 1986, volgens verschillende wortelonttrekkingsconcepten, in cm.

Uit de tabel blijkt duidelijk dat de actuele transpiratie steeds betrekkelijk laag is ten opzichte van de potentiële transpiratie. Gemiddeld is de efficiëntie van de verdamping slechts 55 % - 60 %, in de op grond van de gemeten en berekende drukhoogteprofielen meest reële gevallen is deze efficiëntie zelfs lager (Feddes, Hoogland 0.01). Op grond van deze resultaten is de knipkleigrond op het proefveld droogtegevoelig te noemen.

Het blijkt ook dat de keuze van de afname van de optimale onttrekking als lineair weliswaar een enorme invloed heeft op de optredende drukhoogten, maar dat de invloed op de totale actuele transpiratie betrekkelijk klein, voor de keuze van het beginpunt van de verdampingsreductie geldt hetzelfde.

Zoals eerder al bleek heeft ook het optreden van scheurvorming in het bodemprofiel slechts een kleine invloed.

## 5.5 DISCUSSIE

### 5.5.1 Afwijkingen Q-h-relatie

Aan het gebruik van een vaste Q-relatie kleven nogal wat nadelen. Zoals bij de modelbeschrijving al opgemerkt werd, wordt de afvoer berekend aan de hand van het berekende grondwaterpeil, waardoor de afvoer uit het bodemprofiel nooit exact bekend is.

Daarnaast is het gebruik van een vaste Q-h-relatie voor het gehele jaar discutabel, met name bij zwellende en krimpende kleigronden. Aangezien de afvoer sneller zal kunnen plaatsvinden in het geval dat er veel krimp-scheuren in het profiel aanwezig zijn, de scheuren fungeren als een extra, gedurende het jaar veranderende drainage. Vooral snelle stijgingen

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

van de grondwaterstand zullen in gescheurde grond ook weer snel teniet gedaan worden, aangezien de scheuren niet onmiddellijk dichtzwellen, de infiltratie en opzwellen van de grond vraagt enige tijd.

Vooraf in het winterseizoen zullen de scheuren nagenoeg dichtgezwollen zijn, in deze periode bereikt de grondwaterstand ook zijn hoogste waarden. Ten gevolge van het ontbreken van scheuren zal de afvoer relatief klein zijn, waardoor aan het begin van het groeiseizoen nog een grote hoeveelheid water in de bodem geborgen zal zijn, hetgeen duidelijk blijkt uit de gemeten maaiveldzakkingen die vrijwel direct gekoppeld zijn aan de vochtinhoud in het bodemprofiel.

De weinige beschikbare metingen voor de Q-h-relatie hadden allen betrekking op situatie in de zomer en het najaar. Hierdoor kon geen winter-Q-h-relatie opgesteld worden. Wel zijn enkele runs uitgevoerd met aanzienlijk vlakke curves dan welke voor de uiteindelijke simulatie gebruikt is (Q bij  $h=0.0$  van ong 0.1 cm/dag). Dit veroorzaakte echter veelvuldig stijgingen van het grondwaterstand tot in het tweede compartiment van het bodemprofiel, hetgeen tot gevolg had dat de programmaverwerking stopte (beperking rekenschema SWATRE).

### 5.5.2 Afwijkingen Grondwaterstand

Het berekende grondwaterstand rekening houdend met scheurvorming, vertoont over het algemeen de pieken in de perioden waarin deze ook daadwerkelijk voorkomen. De pieken vallen echter over het algemeen te vroeg, en zijn in het groeiseizoen te hoog. Alhoewel de verschillen die in vochtinhoud zullen optreden nabij het phreatische vlak waarschijnlijk klein zullen zijn, geeft dit een aanwijzing voor de veronderstelling dat de horizontale stroming vanaf de scheuren die in het een-dimensionale model verwaarloosd is, toch van belang is voor het beschrijven van het proces. In horizontale richting zal er waarschijnlijk ook sprake zijn van een zich langzaam verplaatsend vochtfront zoals ook in verticale richting plaats vindt, onder invloed van de zeer lage capillaire krachten in het bijna verzadigde deel van het profiel. Figuur 26. toont het werkelijke en door SWACR berekende verloop van dit vochtfront.

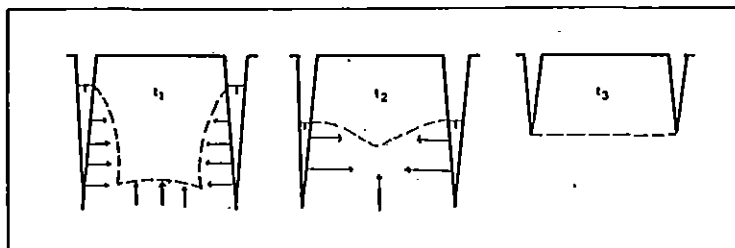


Fig. 26. Werkelijk optredend en door SWACR verondersteld horizontaal vochtfront bij infiltratie in de bodemmatrix.

Uit figuur 16. valt op dat de pieken in het grondwaterstand sneller verdwijnen dan in werkelijkheid gemeten. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het onzekere deel van de Q-h-relatie (figuur 10.) in het traject met hoge grondwaterstanden. Door het optreden van een hoge grondwaterstand zal het model immers meteen een sterk verhoogde drainafvoer berekenen, waarvan de

## SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

waarde slechts bepaald is door enkele gemeten punten.

Het ontbreken van zeer hoge pieken op het einde van het jaar (dag 300-330) valt enerzijds te verklaren door het extreem hoge slootpeil in de buurt van dag 330 en anderzijds door de betrekkelijkheid van het grondwaternivo zoals opgemerkt werd, vooral indien het bodemprofiel nagenoeg verzadigd is, zoals aan het einde van het jaar.

### 5.5.3 Afwijkingen Waterbalans

Ter toetsing van de simulatie van de actuele transpiratie is het noodzakelijk om de actuele opbrengstcijfers te vergelijken met de potentiële opbrengst volgend uit de potentiële transpiratie. Het bepalen van opbrengstcijfers voor gras is een moeilijke zaak zoals eerder opgemerkt werd, en is derhalve vooralsnog niet uitgevoerd. Indirect kan de werkelijkheidszin van de berekende transpiratie wel geëvalueerd worden aan de hand van de gemeten waterbalans, waarbij de niet gemeten transpiratie als restterm uit de balans volgt, het nadeel in dit geval is echter dat met name de drainafvoer niet exact bekend is. Deze wordt immers bepaald uit de discreet gemeten grondwaterstand en de (m.b.v. slechts enkele punten) geschatte Q-h-relatie. De relativiteit van een dergelijke beschouwing mag bij voorbaat duidelijk zijn.

De berekende verlopen van de drukhoogten en de zakking van het maaiveld, die beide een maat zijn voor de hoeveelheid water die in het bodemprofiel geborgen is, vertonen na dag 180 een redelijke goede overeenkomst met de gemeten waarden. Minder reductie van de verdamping zou met name te hoge drukhoogten opleveren zoals bij de gevoeligheidsanalyse bleek.

Door de eerder geschetste beperkingen van het gebruik van de Q-h-relatie als onderrandvoorwaarde, in het bijzonder voor het geval van zwellende en krimpende gronden, lijkt de afgevoerde hoeveelheid water in het begin van het jaar veel meer dan reeel geacht kan worden gezien de te hoge berekende drukhoogten en een te grote maaiveldzakking voor dag 180. Hierdoor wordt de transpiratie te vroeg in het seizoen gereduceerd. Wordt deze hoeveelheid drainafvoer wel goed berekend, dan zal deze droogteschade minder vroeg optreden, echter in hoeverre er dan sprake zal zijn van juist schade door wateroverlast in het begin van het seizoen bij een gereduceerde afvoer, is niet duidelijk.

Echter, zelfs als in het begin van het groeiseizoen een minder grote afvoer en daardoor waarschijnlijk een kleinere reductie van de transpiratie zou plaatsvinden, zou dit nog resulteren in een redelijk lage efficiëntie, aangezien een groot deel van de potentiële verdamping na dag 180 plaatsvindt. De reductie na dag 180 wordt betrouwbaar geacht vanwege de overeenkomst met de gemeten vochtprofielen.

Naast de discutabele Q-h-relatie, kunnen de ingevoerde meteorologische gegevens enig wantrouwen in de lage waarden voor de actuele transpiratie bevestigen. Uit de metingen bleek dat er in de beschouwde periode van dag 60 t/m 343 relatief weinig neerslag geregistreerd werd voor het proefveld, te weten 450 mm, tegenover een gemiddelde neerslag in de provincie Friesland in dezelfde periode van 560 mm. Het waargenomen verschil kan echter ook een gevolg zijn van regionale variatie van de neerslag binnen met name noord-west Friesland.

Een deel van de afwijkingen aan het begin van het groeiseizoen kan misschien verklaard worden door het optreden van vorstschade aan het gewas

SIMULATIE VAN HET GEDRAG VAN KNIPKLEI IN 1986

waardoor de groei later intreedt, het model houdt hier geen rekening mee.  
Gedetailleerde gegevens hierover ontbreken echter.

## HOOFDSTUK 6

### CONCLUSIES EN VERDER ONDERZOEK

Samenvattend kan uit de uitgevoerde simulaties met het aangepaste model SWACR het volgende geconcludeerd worden:

- De grondwaterstand wordt in het aangepaste model veel beter gesimuleerd dan in het oorspronkelijke model. De druk- en vochtverdeling in het bodemprofiel worden door het aangepaste model na dag 180 redelijk goed voorspeld in vergelijking met de gemeten waarden. De waarden gesimuleerd met het oorspronkelijke model wijken meer af, en vertonen dezelfde afwijking in het begin van het seizoen.
- Het optreden van bypass-flow door de scheuren in de onderzochte kleigrond heeft een grote invloed op het verloop van de grondwaterstand, echter een veel minder grote invloed op de vochtverdeling in het bodemprofiel en derhalve op de actuele transpiratie van het gewas. Het verloop van het grondwaternivo is direct gekoppeld aan de grootte van de oppervlakteberging. Deze wordt op lmm geschat.
- In de onderzochte kleigrond treden vooral in droge tijden sterke opbrengstreducties op, niet zozeer ten gevolge van de scheurvorming maar vooral ten gevolge van het steile verloop van de pF-curven in het gehele vochttraject. Het gehanteerde onttrekkingspatroon heeft daarbij wel grote invloed op de drukverdeling in de wortelzone echter minder op de totale actuele transpiratie.
- In de onderzochte kleigrond is waarschijnlijk geen sprake van een eenduidige relatie tussen grondwaterstand en drainafvoer. Waarschijnlijk moet er voor het winter- en voorjaarsseizoen een andere relatie gehanteerd worden dan in de rest van het jaar, ten gevolge van het minder optimaal functioneren van de drainage indien de grond dichtgezwollen is, met andere woorden door een afnemende verzadigde doorlatendheid.
- Door het voorkomen van scheuren in het bodemprofiel infiltreert minder water aan de bovenkant van het profiel als in het geval zonder scheuren. De extra hoeveelheid water die in de wortelzone terecht komt in het geval zonder scheuren worden echter slechts zeer gedeeltelijk door het gewas opgenomen.

## CONCLUSIES EN VERDER ONDERZOEK

- De zakking van het maaiveld wordt door SWACR redelijk goed gesimuleerd. Ten gevolge van de eerder genoemde beperkingen van de gehanteerde Q-h-relatie wordt de zakking aan het begin van het groeiseizoen (voor dag 180) echter te vroeg ingezet in vergelijking met het werkelijk gemeten begin van de maaiveldzakking.

De conclusies moeten echter met de nodige terughoudendheid gehanteerd worden, aangezien veel factoren tijdens de simulaties onzeker waren. Te denken valt aan de onzekere pF-curven en doorlatendheidskarakteristieken, het ontbreken van opbrengstgegevens en zeker ook door het ontbreken van voldoende punten van de Q-h-relatie.

Enkele belangrijke aspecten die voor vervolgonderzoek in aanmerking komen zijn:

- onderzoek naar het proces van horizontale infiltratie in de scheuren, vooral met betrekking tot de snelheid waarmee de grondwaterstand zich instelt in geval van bypass-infiltratie.
- onderzoek naar het functioneren van de drainage indien de grond in opgezwollen toestand verkeert, en het formuleren van een anderssoortige Q-h-relatie in zulke gevallen.
- herhaling van de simulaties op het proefveld in Oosterend met de gegevens over 1987, waarbij naast de Q-h-relatie tevens de flux expliciet ingevoerd en/of de grondwaterstand als onderrandvoorwaarde gebruikt moet worden.
- Nauwkeuriger bepaling van bodemfysische eigenschappen van zware kleigronden, zoals vocht karakteristiek, doorlatendheidskarakteristiek en de sorptiviteit van de bodem.
- Bepaling van de grasopbrengst van de proefpercelen.

LITERATUUR

- BELMANS D., J.G. WESSELING, R.A.FEDDES, 1983  
Simulation model of the water balance of a cropped soil, SWATRE.  
(Journal of Hydrology, 63(1983) blz. 271-286)
- BEUVING J., 1984  
Vocht- en doorlatensheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling  
van bodemprofielen in zand-, zavel-, klei- en veengronden.  
(I.C.W.-rapport nieuwe serie nr. 10)
- BRONSWIJK J.J.B., 1985  
Een oriënterende studie naar het volumeveranderingsproces in zwellende  
en krimpende gronden.  
(Nota I.C.W. nr 1628)
- BRONSWIJK J.J.B., 1986a  
Handleiding voor het bepalen van het zwel- en krimpvermogen van een  
bodem.  
(Nota I.C.W. nr 1719)
- BRONSWIJK J.J.B., 1986b  
Evaporation and cracking of a heavy clay soil.  
(I.C.W. report nr 19)
- CLOTHIER B.E., I. WHITE, G.J. HAMILTON, 1981  
Constant-rate rainfall infiltration: field experiments.  
(Soil Sci. Soc. Am. J., volume 45 blz. 245-249)
- DIRKSEN C., P. KOOREVAAR, 1983  
Elements of soil physics (2nd revised edition).  
(Collegedictaat Landbouwhogeschool Wageningen vakgroep Bodemkunde en  
Bemestingsleer)
- FEDDES R.A., 1987  
Modelling and simulation in hydrologic systems related to agricultural  
development: State of art.  
(Proc. Wat. Man. Agric. Development, Greece, 1986 / I.C.W. Technical  
bulletin (new series) nr. 46)



LITERATUUR

- FEDDES R.A., P.J. KOWALIK, H. ZARADNY, 1978  
Simulation of field water use and crop yield.  
(Simulation monograph Pudoc Wageningen)
- GELDERLAND, dienst waterbeheer, 1984  
Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het  
hydrologische model GELGAM.  
(Rapport van de ad hoc groep verdamping)
- GRAAF de M., 1982  
Toepassen van het niet-stationaire model SWATRE op enkele veenkoloniale  
profielen.  
(Nota I.C.W. nr 1354)
- GRAAF de M., 1983  
Beschouwing over de berekeningswijzen die door het K.N.M.I. worden  
gehanteerd ter berekening van de open waterverdamping.  
(Nota I.C.W. nr 1410)
- HASEGAWA S., T. SATO, 1987  
Water uptake by roots in cracks and water movement in clayey subsoil.  
(Soil Science, volume 143, blz. 381-386)
- HESTERS M., 1985  
Simulatie met fysische en wiskundige modellen van waterinfiltratie in  
isotrope en anisotrope bodemprofielen.  
(Proefschrift Rijksuniversiteit Gent)
- HOOGLAND J., 1980  
Een verbeterd simulatiemodel voor de wateropname door landbouwgewassen.  
(Nota I.C.W. nr 1239)
- HOOGMOED W.B., J. BOUMA, 1980  
A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soils.  
(Soil Sci. Soc. Am. J., volume 44 blz. 458-461)
- KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT, 1986  
Maandoverzicht van het weer in Nederland, 83e jaargang nr. 3 t/m 12.
- MCGARITY J.W., E.H. HOULT, H.B. ZO (editors), 1981  
The properties and utilisation of cracking clay soils.  
(proceedings of a symposium held at New England (Australia), 24 - 28  
august 1981)
- MOLEN van der W.H., 1984  
Agrohydrologie.  
(Collegedictaat Landbouwhogeschool Wageningen vakgroep Cultuurtechniek)
- OVERMARS B., 1982  
Een toepassing van SWATRE voor het meteoveld Assink in het Hupselse  
beekgebied.  
(Doctoraalscriptie Landbouwhogeschool Wageningen, vakgroep Hydraulica  
en Afvoerhydrologie.)

LITERATUUR

- PERROUX K.M., D.E. SMILES, I. WHITE, 1981  
Water Movement in uniform soils during constant-flux infiltration.  
(Soil Sci. Soc. Am. J. volume 45, blz. 237-240)
- ROMEIN E., 1985  
Valkuilen bij het bepalen van de potentiële verdamping van grasland  
door middel van "f"-factoren.  
(H2O(18) 1985 nr 12 blz 265-270.)
- STROOSNIJDER L., 1976  
Infiltratie en herverdeling van vocht in de grond.  
(Proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen)
- YULE, D.F., J.T. RITCHIE, 1980  
Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols. I. small cores, II.  
large cores.  
(Soil Sci. Soc. Am. J. volume 44, blz. 1285-1295)

## BIJLAGEN

- A1 MODULEMATIGE BESCHRIJVING VAN SWACR
  - A1.1 AANPASSINGEN AAN DE INVOER
  - A1.2 AANPASSINGEN EN UITBREIDINGEN VAN DE MODULES
  - A1.3 AANPASSINGEN AAN DE UITVOER
  
- A2 LISTINGS VAN DE AAN SWATRE TOEGEVOEGDE SUBROUTINES
  - A2.1 SUBROUTINE CALCBY
  - A2.2 SUBROUTINE CRACKVOL
  - A2.3 SUBROUTINE CALSOR
  - A2.4 SUBROUTINE PARSW
  - A2.5 COMMON-BLOKKEN
  
- A3 LISTINGS VAN DE BELANGRIJKSTE BINNEN SWATRE GEWIJZIGDE SUBROUTINES
  - A3.1 PROGRAMMA SWACR
  - A3.2 SUBROUTINE BOCO
  - A3.3 SUBROUTINE DELTIM
  - A3.4 SUBROUTINE HEDCAL
  
- A4 VOORBEELD NIEUWE UITVOER VAN HET PROGRAMMA SWACR
  
- A5 KORRELGROOTTEVERDELING DRAIN- EN GREPPELPERCEEL OOSTEREND
  
- A6 NEERSLAGGEGEVENS OOSTEREND
  - A6.1 DAGELIJKS GEMETEN NEERSLAG
  - A6.2 DAGELIJKSE NEERSLAGINTENSITEIT
  - A6.3 FREQUENTIEVERDELING DAGELIJKSE NEERSLAG
  - A6.4 FREQUENTIEVERDELING DAGELIJKSE NEERSLAGINTENSITEIT

## A1 MODULEMATIGE BESCHRIJVING VAN SWACR

### A1.1 AANPASSINGEN AAN DE INVOER

Het programma is uitgebreid met een aantal opties, die net zoals de bestaande opties aangegeven kunnen worden met de invoerarray CODE.

De nieuwe opties betreffen:

- CODE(10) - 0 : het programma houdt geen rekening met volumeveranderingen in de grond.
- 1 : het programma houdt rekening met volumeveranderingen in de grond, en berekent bypass-flow in de scheuren.
- 2 : als optie 1, indien het berekende scheuoppervlak aan het maaiveld 0 is, wordt de bypass-flow niet berekend.

en

- CODE(11) - 0 : de berekening van de infiltratiecapaciteit vindt plaats op de gebruikelijke manier binnen SWATRE.
- 1 : de berekening van de infiltratiecapaciteit vindt plaats met behulp van formule (9b), de sorptiviteit wordt uit de bodemkarakteristieken bepaald volgens vergelijking (11b), als functie van het vochtgehalte.
- 2 : als 1, de sorptiviteit wordt echter niet berekend door het programma maar direct ingevoerd.

Indien zowel CODE(10) als CODE(11) de waarde 0 hebben, is de invoer gelijk aan die van versie november 1986 van SWATREN, met uitzondering van de extra invoer van CODE(10) en CODE(11), invoer van de bergingscapaciteit van het maaiveld en invoer van de Q-H-relatie.

De extra invoer zal chronologisch besproken worden.

De parameter IRER uit input-groep F is aangevuld met een derde optie IRER = 2, waarmee de relatie tussen Smax en z volgens Prasad uit formule (34) gebruikt kan worden in combinatie met de definitie van de "Sink-term" volgens Hoogland.

Indien CODE(11) gelijk is aan 1, moet na groep N die de bodemfysische parameters bevat, een waarde voor het vochtgehalte waarop de bodem verzadigd is gegeven worden voor de berekening van de sorptiviteit (dit verzadigd vochtgehalte betreft alleen de bodemmatrix en kan verschillend zijn van in vergelijking met het verzadigd vochtgehalte uit de pF-curve). Indien CODE(11) gelijk aan 2 is, moet op de eerste regel na groep N de maximale en minimale waarde van het vochtgehalte gegeven worden waarvan de sorptiviteit ingevoerd wordt. Op de volgende regels moet voor iedere vochtgehalte een sorptiviteit gegeven worden uitgedrukt in {cm/dl/2}.

Bij alle opties moet na de laatste regel handelend over de sorptiviteit of na groep N, een maximale bergingscapaciteit gegeven worden in cm boven het maaiveld. Indien deze parameter gelijk is 0.0, dan geldt dezelfde conditie als in de oorspronkelijke versie.

Indien CODE(10) niet gelijk is aan 0, moet op de volgende regel een waarde gegeven worden van de maximale infiltratiecapaciteit van de scheuren,

per hoogteenheid, in cm/cm.d. Deze parameter heeft dus betrekking op het totale verticale scheuroppervlak op een bepaalde diepte.

Indien CODE(10) niet gelijk is aan 0, komen op de volgende regels de waarden van de zwel- en krimp karakteristieken van de bodemlagen, beginnend bij laag 1. Hiertoe moet voor iedere laag het aantal invoerpunten gegeven worden op de eerste regel, op de volgende regels volgt steeds een bodemvochtgetal samen met een corresponderende poriëgetal in  $m^3/m^3$ , beginnend bij het laagste bodemvochtgetal.

Indien invoer-groep F gebruikt wordt om een Q-H-relatie als onderrandvoorwaarde in te voeren, dient eerst een optie ingevoerd te worden op de regel met regressiecoëfficiënten voor de e-functie. Indien OPTIE is 1, dan moeten op dezelfde regel 3 coëfficiënten van de e-functie opgegeven worden, indien OPTIE is 2, dan moeten op dezelfde regel 4 coëfficiënten opgegeven worden als zijnde de coëfficiënten van een 3e graads polynoom.

Indien CODE(10) niet gelijk is aan 0, dan moet bij de invoer van meteorologische gegevens direct na een waarde voor de dagelijkse neerslag, een waarde van de dagelijkse regenduur opgegeven worden.

## A1.2 AANPASSINGEN EN UITBREIDINGEN VAN DE MODULES

In de volgende paragrafen zal een overzicht gegeven worden van de wijzigingen in de programmamodules van SWATRE, in de volgorde waarin ze in het programma voor zullen komen. Nieuwe subroutines zullen aangegeven worden met (\*).

### A1.2.1 VERWERKING NIEUWE INVOERGEGEVENS

De invoer van de nieuwe invoergegevens vindt voor een groot deel plaats in de twee subroutines CALSOR (\*) (CALculate SORptivities) en PARSWs (\*) (PARAmeters SWel and Shrinkage).

De subroutine CALSOR berekent indien CODE(11) gelijk aan 1 is, de diffusiviteit aan de hand van het logaritmisch gewogen gemiddelde van de doorlatendheid en de voorwaartse gradient  $d\theta/dh$ . Met behulp van deze diffusiviteiten wordt voor ieder vochtgehalte de sorptiviteit S en de factor b berekend volgens de gediscretiseerde vergelijking (13b). Voor vochtgehalten groter dan het verzadigde vochtgehalte PRAKSAT, wordt de sorptiviteit op 0 gesteld en b op 5000, zodat in dit vochttraject de infiltratie alleen bepaald wordt door de zwaartekracht.

Indien CODE(11) gelijk aan 2 is, worden de sorptiviteiten expliciet ingelezen uit de input-file, uit deze sorptiviteiten wordt de factor b uit formule (13b) berekend. Voor S en b bij hogere vochtgehalten dan de maximaal ingelezen waarde, wordt dezelfde werkwijze gehanteerd als bij CODE(11)=1. De subroutine schrijft ingelezen en berekende waarden naar de output-file.

De subroutine PARSWs leest de maximale bergingscapaciteit aan het maaiveld en de maximale infiltratiecapaciteit door de scheurwanden in. Verder leest de subroutine de tabel van bodemvochtgetallen en poriëgetallen uit de input-file in. Waarden van het bodemvochtgetal groter dan de maximale, krijgen een poriëgetal gelijk aan het maximaal ingelezen poriëgetal, waarden kleiner dan het minimale bodemvochtgetal krijgen het minimaal ingelezen poriëgetal.

De subroutine schrijft ingelezen en berekende waarden naar de output-file.

BIJLAGEN

A1.2.2 VASTSTELLEN RANDVOORWAARDEN (BOCO)

In de subroutine BOCO vindt het toewijzen van de actuele waarden van de randvoorwaarden plaats. In de oorspronkelijke versie waren alle randvoorwaarden voor een daglengte constant gesteld, de subroutine BOCO kent dan gedurende een daglengte, tijdens iedere tijdstap dezelfde data toe. Pas bij het begin van een nieuwe dag worden nieuwe waarden toegekend.

In de nieuwe versie van BOCO wordt de neerslag-component van de bovenrandvoorwaarde variabel gemaakt gedurende de dag. Daartoe wordt gesteld dat de neerslag die gedurende een dag valt, in een aaneengesloten deel van de dag valt, en wel precies in het midden. Dit is uiteraard in strijd met de werkelijkheid, echter de fouten die hiermee gemaakt worden zijn klein en het beperkt de invoer aanzienlijk.

Met behulp van de regenduur op een dag, is een begin- en eindtijdstip van de regenval uit te rekenen, op de volgende manier:

$$\begin{aligned} \text{PRSTART} &= M - 0.5 - (\text{PRECDURA}/2) && \text{(A1)} \\ \text{PREND} &= M + 0.5 + (\text{PRECDURA}/2) \end{aligned}$$

PRSTART : begin regenval op Me dag [d]  
 PREND : eind regenval op Me dag [d]  
 M : nummer dag  
 PRECDURA: actuele duur van de regenval [d]

Indien de rekenperiode T+DT in het traject (PRSTART-PREND) ligt, wordt aan de actuele neerslag PRECA de waarde van de regenintensiteit (PREC(M)/PRECDURA) toegekend. In alle andere gevallen wordt deze variabele op 0 gesteld.

Een andere belangrijke wijziging betreft de toewijzing van de drukhoogte aan het oppervlak PHSA. Deze parameter wordt op 0 gesteld in geval van een neerslagoverschot, en gelijk aan de atmosferische druk indien er sprake is van een neerslagtekort. Indien er echter geen neerslag maar alleen berging optreedt aan het maaiveld kan dit ook beschouwd worden als neerslag. Aangezien de grootte van de tijdstap in dit stadium van het programma nog niet bekend is, kan de intensiteit van deze "neerslag" niet bepaald worden. In dit stadium is dus niet te bepalen of deze "neerslag" opgevangen kan worden door de bodemevaporatie. Om de fouten die hiermee gemaakt worden tot een minimum te beperken, wordt PHSA op 0 gesteld indien er voldoende berging optreedt via het volgende statement:

$$\begin{aligned} \text{FLXA} &= \text{ESRA} - (\text{PRECA} - \text{FINA}) && \text{(A2)} \\ \text{IF} ((\text{FLXA}.\text{LT}.0.0).\text{OR}.\text{(STORAGE/DTS.GT.FLXA)}) &&& \text{PHSA} = 0.0 \end{aligned}$$

ESRA : actuele waarde bodemevaporatie [cm/d]  
 FINA : actuele waarde interceptieverdamping [cm/d]  
 FLXA : actuele flux door bovenrand [cm/d]  
 STORAGE: hoeveelheid berging aan maaiveld [cm]  
 DTS : maximale tijdstap in geval van alleen berging [d]

Indien er geen neerslag maar wel berging optreedt dan wordt de tijdstap in de subroutine DELTIM maximaal DTS genomen, opdat de flux veroorzaakt door de berging reeds in een vroeg stadium verwerkt kan worden.

#### A1.2.3 BEREKENING GRONDWATERSTAND (HOOFDPROGRAMMA EN CALGWL)

Zoals reeds in het vorige hoofdstuk behandeld is, vindt de berekening van de grondwaterstand plaats aan de hand van de waterbalans. Aangezien door het optreden van bypass-infiltratie door de scheuren een deel van de neerslag onttrokken wordt aan het normale infiltratieproces, moet hier in de waterbalans rekening mee gehouden worden. Hiertoe wordt de in de routine CALCBY (\*) (zie verder) berekende bypass-term BYPA toegevoegd aan de DEL-term in het hoofdprogramma:

Deze nieuwe DEL-factor wordt ook in de berekeningen van de subroutine CALGWL gebruikt. Indien er een bypass-flow optreedt wordt het verschil DVOL in CALGWL abrupt groter waardoor een aanpassing van de grondwaterstand noodzakelijk wordt.

Door de "steile" pF-curven van kleigronden in het algemeen, treden er vaak lange vage vochtfronten op in de nabijheid van het grondwaternivo. In die gevallen is vaak een kleine vochtverandering in het profiel reeds voldoende om het grondwaternivo aanzienlijk te veranderen. De subroutine CALGWL hanteert echter een relatief grof criterium om te bepalen wanneer de grondwaterstand aangepast moet worden, namelijk pas indien  $DVOL > 0.1$  cm. Voor specifieke toepassingen op kleigronden is het beter dit criterium te verscherpen, in de praktijk is 0.02 voldoende. Hiermee wordt voorkomen dat er plotselinge grondwaterstandswijzigingen optreden na een lange tijd van constant nivo. In sommige gevallen is het noodzakelijk om de maximale verandering van het grondwaternivo ook te reduceren via de input-variabel CGWLAM, vanwege optredende instabiliteit van het algoritme in CALGWL. Grote nivoschommelingen treden uiteraard wel op in geval van grote bypass-termen, hetgeen ook reeel is.

#### A1.2.4 BEPALING TIJDSTAPGROOTTE (DELTIM)

In de subroutine DELTIM wordt de tijdstapgrootte bepaald waarmee de in BOCO vastgestelde randvoorwaarden verwerkt worden. T.b.v. van de stabiliteit en de nauwkeurigheid worden aan de tijdstap enige grenzen gesteld, zie o.a. formule (22). Bovendien wordt de tijdstap op de grens tussen twee dagen gesteld indien de grens met de berekende tijdstap overschreden zou worden.

De belangrijkste aanpassing in DELTIM binnen SWACR houdt in dat een neerslagperiode in zijn geheel opgedeeld wordt in tijdstappen, dat wil zeggen dat net zoals bij het overschrijden van een grens tussen twee dagen, de tijdstap zo bepaald wordt dat deze niet gedeeltelijk binnen of buiten een neerslagperiode valt, maar in zijn geheel binnen of buiten.

Aangezien de infiltratiecapaciteit van de bodem gedurende een regenperiode sterk afneemt, is het noodzakelijk om ervoor te zorgen dat een (vaak korte maar hevige) regenperiode in niet te grote tijdstappen doorgerekend wordt. Daarom wordt in het programma de maximale tijdstap bepaald op 0.00001 dag voor de eerste tijdstap waarop neerslag of infiltratie plaatsvindt. Na een eerste tijdstap met regen of infiltratie is er zoveel vocht in het profiel bijgekomen, dat de subroutine met behulp van formule (22) al een kleinere tijdstap berekend.

A1.2.5 BEREKENING VAN SCHEURVOLUME EN BYPASS-FLOW (CRACKVOL(\*) EN CALCBY(\*)

Voordat de subroutine HEDCAL aangeroepen wordt om de nieuwe differentiaalvergelijking (39) op te lossen, wordt in de nieuwe versie van het programma eerst de nieuwe bypass-flux uitgerekend. Omdat deze bypass-flow in de analogie van het programma tot de nieuwe uitvoer behoort, worden de print-statements van de oude subroutine OUTPUT, pas uitgevoerd na deze berekening, in de nieuwe subroutine PRINTOUTPUT(\*). In tegenstelling tot de oude versie is op het moment van printen de nieuwe tijdstap dus bekend.

Om de direct-bypass-flow te kunnen berekenen is het nodig om eerst het oppervlak van de scheuren aan het maaiveld vast te stellen. Dit vindt plaats in de subroutine CRACKVOL(\*). Daartoe wordt het bodemvochtgetal uitgerekend aan de hand van het (laboratorium) vochtgehalte en het verzadigd vochtgehalte, volgens:

$$\text{MORAT}(1) = \text{THETA}(1) / (1.0 - \text{SWCA}(1)) \quad (\text{A3})$$

MORAT(1) : bodemvochtgetal le compartiment [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]  
 THETA(1) : lab. volume vochtgehalte le compartiment [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]  
 SWCA(1) : verzadigd volume vochtgehalte le compartiment [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]

Met behulp van dit bodemvochtgetal, kan een poriëgetal worden bepaald met behulp van de ingevoerde punten van de krimp karakteristiek. De relatieve volumeverandering van het compartiment en de relatieve 1-dimensionale krimp wordt bepaald aan de hand van dit getal, er vanuit gaande dat het krimpproces isotroop plaatsvindt:

$$\text{CRACKREL}(1) = 1 - (1 - \text{VOLCHANGE})^{**1/3} \quad (\text{A4})$$

met

$$\text{VOLCHANGE} = (1 - \text{SWCA}(1)) * (\text{VORATMAX} - \text{VORAT}(1)) \quad (\text{A5})$$

CRACKREL : relatieve 1-dimensionale krimp [m/m]  
 VOLCHANGE : relatieve 3-dimensionale krimp [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 VORATMAX : maximaal poriëgetal (bij verzadiging) [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 VORAT(1) : poriëgetal le compartiment [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

De nieuwe poriëgetallen en krimppercentages worden op analoge wijze voor de overige compartimenten berekend, echter uitsluitend ten behoeve van de output, voor de berekeningen zijn ze niet van belang.

De nieuwe subroutine CALCBY(\*) berekend de bypass-flux en herberekend hiermee de matrix-flux die reeds in de subroutine FLUXES berekend werd zonder het effect van de scheurvorming.

In de subroutine wordt eerst het oppervlak van de scheuren berekend met de waarde voor de relatieve 1-dimensionale krimp:

$$\text{CRACKAREA} = 2 * \text{CRACKREL}(1) - (\text{CRACKREL}(1)**2) \quad (\text{A6})$$

CRACKAREA : relatieve oppervlak van de scheuren aan maaiveld [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

Het gedeelte van de neerslag dat direct in de scheuren terecht komt is rechtevenredig met het scheuroppervlak, CRACKAREA. Dit gedeelte infiltreert



BIJLAGEN

blz. A-7

in de scheuren onafhankelijk van de hoeveelheid bodemevaporatie, interceptieverdamping of de oppervlakteberging. Het gedeelte van de neerslag dat overblijft wordt verdeeld over runoff-bypass, matrixinfiltratie, bodemevaporatie, interceptieverdamping en oppervlakteberging.

Om de totale hoeveelheid water te berekenen dat potentieel in de matrix kan infiltreren danwel eruit kan verdampen, wordt net zoals in de subroutine FLUXES de waterbalans opnieuw opgesteld voor een tijdstap, aan deze balans is echter een factor toegevoegd namelijk de zogenaamde "bergingsintensiteit", dit is de intensiteit waarmee de actuele berging in de matrix kan infiltreren indien dit exact gedurende de actuele tijdstap zou plaatsvinden, de balans ziet er dan als volgt uit:

$$\text{FLXA} = \text{ESRA} - (\text{SOILMAT} + \text{STOINT} - \text{FINA}) \quad (\text{A7})$$

met

$$\text{STOINT} = \text{STORAGE} / \text{DT} \quad (\text{A8})$$

FLXA : flux door bovenzijde van profiel [cm/d]  
 ESRA : actuele gereduceerde bodemevaporatiesflux [cm/d]  
 SOILMAT : potentiele matrixinfiltratie dor neerslag [cm/d]  
 STOINT : potentiele oppervlaktebergings"intensiteit" [cm/d]  
 FINA : actuele interceptieverdampingsflux [cm/d]  
 STORAGE : actuele hoeveelheid bergingsflux [cm]  
 DT : huidige tijdstapgroote [d]

Indien deze flux positief is, verdampt alle neerslag en oppervlakteberging voordat deze de plantenwortels kunnen bereiken, als deze flux negatief is er een neerslagoverschot. De flux wordt gereduceerd als de infiltratie- of verdampingscapaciteit van de bodem kleiner is dan de potentiele flux. Bij een neerslag overschot wordt afhankelijk van de waarde van CODE(11) de capaciteit berekend met behulp van vergelijking (11b) of met behulp van (23), de verdampingscapaciteit wordt uitsluitend berekend met behulp van vergelijking (23).

In die gevallen waarin de infiltratiecapaciteit tekort schiet vindt er oppervlakteberging en/of runoff-bypass-infiltratie plaats, afhankelijk van de (input-)bergingscapaciteit. De totale hoeveelheid runoff-bypass-flow wordt dan als volgt uit de balanstermen berekend:

$$\text{BYPAO} = \text{FLXA} - \text{CAPINI} - \text{STOMAXA}/\text{DT} \quad (\text{A9})$$

met

$$\text{STOMAXA} = \text{STORAGE} * (1 - \text{CRACKAREA}) \quad (\text{A10})$$

BYPAO : runoff-bypass-flow [cm/d]  
 CAPINI : infiltratiecapaciteit van de bodem [cm/d]  
 STOMAXA : maximale actuele berging [cm]

Indien de bypass-term negatief berekend wordt treedt er dus geen infiltratie via de scheuren plaats, BYPAO wordt dan nul gesteld. De nieuwe berging aan het eind van de tijdstap wordt vastgesteld aan de hand van de waterbalans.

Deze werkwijze wordt gehanteerd voor die perioden waarin er regenval plaats vindt volgens het model (zie subroutine BOCO), in de perioden zonder neerslag verloopt de gang van zaken analoog, echter uiteraard zonder neerslagterm in de waterbalans en meestal zonder infiltratie van de berging.

Het tijdstip waarop de aangeboden neerslag niet meer in zijn geheel kan infiltreren, wordt bepaald met formule (14) aan het begin van de

regenperiode met het dan actuele vochtgehalte van het eerste compartiment, er vanuit gaande dat de infiltratie tot dit deel van het profiel beperkt blijft. In de subroutine DELTIM wordt er voor gezorgd dat de tijdstap waarin de berging begint, begint bij dit tijdstip PONDSTART via een soortgelijk algoritme als bij het begin van de regenval. Vanaf dit tijdstip beginnen de formules voor de constante-potentiaal infiltratie te gelden (11b). De virtuele infiltratietijd zoals bedoeld in formule (15) wordt bepaald aan de hand van de tot dan toe geïnfiltreerde neerlslag en de formule van Kostiakov (9).

#### A1.2.6 OPLOSSEN VAN DE DIFFERENTIAALVERGELIJKING (HEDCAL)

Door de toevoeging van de bypass-term aan de waterbalansvergelijking in het programma (zie vergelijking (40)) is de bypass-stroming reeds in het programma verwerkt als ware het een kwelstroming door de onderrand van het profiel. Door deze stroming wordt het grondwaternivo verhoogd om de bypass-stroming te verwerken. In veel gevallen zal dit een bevredigend resultaat geven, aangezien in de meeste gevallen het water tot diep in de scheuren wegzakt, en pas onderin, in de directe nabijheid van het grondwater, tot infiltratie komt.

Eleganter en fysisch juister zou het zijn om deze waterbalansterm in de differentiaalvergelijking (18) te verwerken als een positieve "sink-term" zoals in vergelijking (39), die de infiltratie op een bepaalde diepte weergeeft: Discretisering van formule (39) tot formule (21) heeft enkel tot gevolg dat de factor  $D_i$  uit (21) aangevuld wordt met de factor  $B$  uit de basisvergelijking

Toepassing van de nieuwe differentiaalvergelijking leidt er toe dat het water in de scheuren over een gedeelte van het onverzadigde gedeelte van het bodemprofiel boven het phreatische vlak verdeeld wordt. Hierdoor zal in principe de grondwaterstand minder direct op hevige buien reageren. Dit effect kan van belang zijn in geval van hevige buien.

Om de verdeling over de compartimenten te bewerkstelligen wordt de maximale bypass-flux van onderaf in het profiel aan de compartimenten toegerekend, net zolang totdat de hele flux verdeeld is. Slechts aan het laatste compartiment dat deel neemt aan de infiltratie wordt niet de maximale flux toegerekend. Alhoewel het feit dat alle compartimenten in principe dezelfde flux toegerekend krijgen niet geheel juist is (zie hoofdstuk 2.), is het geschikt voor een eerste benadering.

#### A1.3 AANPASSINGEN AAN DE UITVOER

De uitvoer van het programma SWACR (file SWADAT.OUT) is uitgebreid met enkele parameters. Met uitzondering van enkele vaste parameters zoals sorptiviteit en krimpkarakteristiek, hebben deze betrekking op de dagelijkse uitvoer.

In de tabel met cumulatieve waarden handelt het om de volgende variabelen:

CBYPA	- cumulatieve hoeveelheid bypass-stroming [cm]
CBYPAR	- cumulatieve hoeveelheid direct-bypass-stroming [cm]
CBYPAO	- cumulatieve hoeveelheid runoff-bypass-stroming [cm]

BIJLAGEN

blz. A-9

- STORAGE - waternivo op maaiveld ten tijde van uitvoer [cm]
- CSUBSID - maaiveldzakking (cumm. 1-dimensionale krimp) [cm]
- CRACKAR - oppervlakte van de scheuren aan het maaiveld [cm]
- ACAPINF - gemiddelde infiltratiecapaciteit aan het maaiveld gedurende periode tussen twee outputs in, deze is 0 indien er geen infiltratie heeft plaatsgevonden [cm/d]
- RELGWLA - het nivo van het grondwater rekening houdend met de zakking van het maaiveld [cm]

Behalve met deze cumulatieve waarden is de outputfile uitgebreid met een aantal kolommen in het overzicht van de dagelijkse drukverdeling en vochtgehalten. De volgende kolommen zijn toegevoegd:

- VARDX - hoogte van ieder compartiment na krimp [cm]
- RTHETA - volume vochtgehalte van ieder compartiment, gerelateerd aan het actuele volume van de grond. Dit is dus het volume vochtgehalte zoals het in het veld gemeten zou worden (i.t.t. THETA) [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- MORAT - bodemvochtgetal van ieder compartiment [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- VORAT - poriëngetal van ieder compartiment [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

Een voorbeeld van deze nieuwe uitvoer is te vinden in BIJLAGE 4.

BIJLAGEN

blz. A-10

A2 LISTINGS VAN DE AAN SWATRE TOEGEVOEGDE SUBROUTINES

A2.1 Subroutine CALCBY

```

c+++++
c
      SUBROUTINE CALCBY
c
c ---- SUBROUTINE CALCBY : - CALCULATING MATRIX INFILTRATION, DIRECT BYPASS
c ----                       FLOW AND OVERFLOW BYPASS FLOW THROUGH CRACKS.
c ----                       - CALCULATING STORAGELEVEL AT SOILSURFACE AND
c ----                       ACTUAL INFILTRATION RATE, ON THE CONVENTIONAL
c ----                       WAY OF SWATRE OR WITH THE SORPTIVITY PARAMETER
c
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),(O-Z)
      INTEGER CODE, TRAIN, TDIF
      LOGICAL TGIFT
      DOUBLE PRECISION LAI
c
      DIMENSION IA(99), NDGIFT(366)
c
      SAVE OLDSTORAGE, SORPTHETA, BTHETA, CUMCAPINI, UST
c
c.....
c.....
      INCLUDE 'COMMON.INC'
c.....
c.....
c
c ---- initialisation of actual parameters.
      BYPA = 0.0
      BYPAR = 0.0
c
      M = T - DT + 1
      PHSA = PHS(M)
c
c ---- estimating moisture content at start of raining period.
      IF ((ABS(PRSTART-(T-DT)).LT.0.000001).OR.(PRECA.EQ.0.0)).AND.
      1 (STORAGE.LT.0.000001).AND.(CODE(11).GT.0)) THEN
c
          PONDSTART = 50000.0
c
          IF (ABS(PRSTART-(T-DT)).LT.0.000001) THEN
              ITHETAL = NINT(100.0*(THETA(1)-0.005))+1
              ITHETAH = NINT(100.0*(THETA(1)+0.005))+1
c
              SORP1 = SORP(ITHETAL)
              SORP2 = SORP(ITHETAH)
          
```

BIJLAGEN

blz. A-11

```

1          SORPTHETA = SORP1 + (100.0*THETA(1)-REAL(ITHETAL)+1.0)
              *(SORP2-SORP1)

          IF (SORPTHETA.NE.0.0) THEN
              BTHETA = 4.0 * CON(1,NINT(100.0*PRAKSAT)+1) /
              (3.0 * SORPTHETA)
          ELSE
              BTHETA = 50000.0
          END IF

          IF (PRECA.LE.CON(1,NINT(100.0*SWCA(1)+1.0))) THEN
              PONDSTART = 5000.0
          ELSE
              PONDSTART = (SORPTHETA**2 / (2 * PRECA * (PRECA -
1              CON(1,NINT(100.0*SWCA(1)+1.0))))
1              + T - DT

              UST = PONDSTART - T + DT
          END IF
          END IF

          CUMCAPINI = 0.0
          CUMCUMCAPINI = 0.0
          END IF

c ---- assigning storage infiltration rate (supposed all storage infiltrates
c ---- in this timestep).
          IF (OLDSTO) THEN
              STOINT = STORAGE/DT
              OLDSTO = .FALSE.
          ELSE
              STORAGE = 0.0
              STOINT = 0.0
              OLDSTO = .FALSE.
          END IF

c ---- calculating bypass-flow

          IF ((PRECA.NE.0.0).OR.(STOINT.NE.0.0)) THEN
c ---- calculating direct bypass-flow, no overflow.
              IF (CODE(10).NE.0) THEN
                  CRACKAREA = 2.0 * CRACKREL(1) - (CRACKREL(1)**2)
              ELSE
                  CRACKAREA = 0.0
              END IF

              BYPA = CRACKAREA * PRECA
              SOILMAT = PRECA * (1 - CRACKAREA)

              BYPAR = BYPA
              SBYPAR = SBYPAR + BYPAR * DT

c ---- calculating infiltration capacity of soil-matrix.
    
```

BIJLAGEN

blz. A-12

```

c ---- potential flux from input values.
        FLXA = -(ESRA-(SOILMAT+STOINT-FINA))

        IF (FLXA.GT.0.0) THEN
            PHSA = 0.0
        END IF

c ---- IF ((FLXA.GT.0).AND.(CODE(11).GT.0)) THEN
        calculation with sorptivity (only for infiltration).

c ---- calculating possible infiltration rate.
        IF (ABS(T-PONDSTART).LT.0.00001) THEN
            USINF = (PRECA*UST)

            IF (SORPTHETA.EQ.0.0) THEN
                TINFIL = 0.0
            ELSE
                TINFIL = (USINF/SORPTHETA)**2
            END IF

            CAPINI = 5000.0
            ELSEIF (T.LE.PONDSTART) THEN
                CAPINI = 5000.0
            ELSE
                TINFIL = TINFIL + DT

                CAPINI = ( ((SORPTHETA/BTHETA) * (1.0 - EXP(-BTHETA *
1          SQRT(TINFIL)))) + CON(1,NINT(100.0*SWCA(1))+1)
1          * TINFIL )

                CUMCUMCAPINI = CUMCAPINI
                CUMCAPINI = CAPINI
                CAPINI = (CAPINI - CUMCUMCAPINI)/DT
            END IF
        ELSE
c ---- calculation same as in FLUXES (infiltration and evaporation).
            CAPINI = (CONIN(1)*(PHSA-PRHEAD(1)+DXH)/DXH)
        END IF

c ---- estimating flux in other cases then normal infiltration.

c ---- IF ((CAPINI.LT.0.0).AND.(FLXA.LT.0.0)) THEN
        only evaporation flux (even with storage or prec.)
        IF (CAPINI.LT.FLXA) THEN
            FLXS(1) = -FLXA
        ELSE
            FLXS(1) = -CAPINI
        END IF

        RETURN
    ELSE
c ---- possible flux has different sign then potential flux.
        IF ((CAPINI.LT.0.0).OR.(FLXA.LT.0.0)) THEN
            FLXS(1) = 0.0
    
```

BIJLAGEN

blz. A-13

```

        RETURN
    END IF
END IF

c ---- calculating bypass-flow as a result of overflow in cracks.
PREFF = SOILMAT + STOINT - FINA - ESRA
STOMAXA = STORAGEMAX * (1-CRACKAREA)
TOTCAPINI = TOTCAPINI + CAPINI
NRINF = NRINF + 1

IF ((CODE(10).EQ.2).AND.(CRACKAREA.LT.0.0000001)) THEN
c ---- assigning infinite storage capacity in case of no cracks.
    STOMAXA = 10.0
ELSEIF ((CAPINI*DT+STOMAXA.LT.PREFF*DT).AND.(CODE(10).NE.0))
1 THEN
c ---- calculating runoff-bypass-flow.
    BYPA = BYPA + (PREFF - CAPINI - STOMAXA/DT)

    IF (BYPA.LT.0.0) THEN
        BYPA = PINTA * CRACKAREA
    END IF
END IF

SBYPA = SBYPA + BYPA * DT

c ---- calculating actual infiltration flux.
IF (PREFF.GT.CAPINI) THEN
    ACAPINI = CAPINI
ELSE
    ACAPINI = PREFF
END IF

c ---- calculating precipitation balance.
PREFF = PRECA + STOINT - FINA - ESRA
OLDSTORAGE = STORAGE
STORAGE = (PREFF - BYPA - ACAPINI) * DT

IF (STORAGE.GT.STOMAXA) THEN
    STORAGE = STOMAXA
END IF

SOILMAT = PRECA + STOINT - BYPA - STORAGE/DT

c ---- assign values for next call to CALCBY.
IF (STORAGE.GT.0.0000001) THEN
    OLDSTO = .TRUE.
ELSE
    OLDSTO = .FALSE.
    STORAGE = 0.0
END IF

C ---- calculating new matrix flux and pressure head at the top
C ---- (flux through unit-area, without cracks)
100 FLXA = ESRA - (SOILMAT-FINA)
    
```

BIJLAGEN

```
      IF (FLXA.LT.0.0) THEN
          FLXS(1) = FLXA
          PHSA = 0.0
      ELSE
          FLXS(1) = 0.0
      END IF
  END IF

  RETURN
  END
```



BIJLAGEN

blz. A-15

A21.2 Subroutine CRACKVOL

```

c+++++
c
      SUBROUTINE CRACKVOL
C
C ---- SUBROUTINE CRACKVOL : - CALCULATING NEW VOID AND MOISTURE RATIO
C ----                          - CALCULATING RELATIVE SHRINKAGE OF EVERY
C ----                          COMPARTMENT (ONE DIMENSIONAL).
C
c ---- subroutine crackvol : calculating the void fraction of all soil
c ----                          layers

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),(O-Z)
      INTEGER CODE, TRAIN, TDIF
      LOGICAL TGIFT
      DOUBLE PRECISION LAI
C
      DIMENSION IA(99), NDGIFT(366)
C
c.....
c.....
      INCLUDE 'COMMON.INC'
c.....
c.....
c
      ISTART = 1
      DO I = 1, NPL
c ---- calculating volume of solid phase.
          VOLSOL(I) = 1.0-SWCA(ISTART)
          VORATMAX = SWCA(ISTART)/VOLSOL(I)

          DO J = ISTART, NC(I)
              LAYER = LAYNUM(J)

c ---- selecting shrinkage-characteristic and calculating
c ---- new moisture ratio.
              MORAT(J) = THETA(J) / VOLSOL(I)

              K = 1
              DO WHILE (MORAT(J).GT.CURVEMR(I,K))
                  K = K + 1
              END DO
              K = K - 1

c ---- calculating new void ratio.
              VORAT(J) = ACURVE(I,K)*MORAT(J) + BCURVE(I,K)

c ---- calculating relative one-dimensional shrinkage.
              VOLCHANGE = VOLSOL(I) * (VORATMAX - VORAT(J))
    
```

BIJLAGEN

```
                CRACKREL(J) = 1 - (1-VOLCHANGE)**0.3333334  
                VDX(J) = DX - CRACKREL(J) * DX  
            END DO  
  
c ----- calculating start of new loop.  
            ISTART = NC(I) + 1  
        END DO  
  
    RETURN  
END
```

BIJLAGEN

blz. A-17

A2.3 Subroutine CALSOR

```

c+++++
c
      SUBROUTINE CALSOR
c
c ---- SUBROUTINE CALSOR: - INPUT OF MEASURED SORPTIVITIES (CODE(11)=2)
c ---- - CALCULATION OF SORPTIVITIES FROM WATER
c ---- RETENTION CURVE AND K - THETA - RELATION.
c
c ---- subroutine calsor: input and calculation of sorptivity-parameters.

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),(O-Z)

      PARAMETER ( PHI = 3.141592654 )

      INTEGER CODE, TRAIN, TDIF
      LOGICAL TGIFT
      DOUBLE PRECISION LAI, DIFFU(81)
      CHARACTER*37 HEAD1, HEAD2

c
c      DIMENSION IA(99), NDGIFT(366)
c
c.....
c.....
      INCLUDE 'COMMON.INC'
c.....
c.....
c

      WRITE(21,1)
1      FORMAT('1', ' ' '////)

      ISTART = LV(1) + 1
      IEND = MV(1) + 1

      IF (CODE(11).EQ.2) THEN
c --- reading measured sorptivities (code(11)=2) or calculating sorp-
c --- tivities from pF-curve en k-theta-relation.
      WRITE(21,'(1X,A)') 'Meassured sorptivities.'
      WRITE(21,'(1X,A//)') '-----'
      GOTO 100
      ELSE
      WRITE(21,'(1X,2A)') 'Calculated sorptivities from',
1          ' diffusivities.'
      WRITE(21,'(1X,2A//)') '-----',
1          '-----'
      END IF

c --- calculation of the diffusivity.
    
```

BIJLAGEN

blz. A-18

```

READ(11,*) PRAKSAT

IEND = NINT(PRAKSAT*100.0+1.0)

DO I = ISTART, IEND
    WEIGHTCON = 10** ( (DLOG10(CON(1,I))+DLOG10(CON(1,I+1)))/2.0)
    DIFFU(I) = ABS(WEIGHTCON / (0.01/(PRH(1,I)-PRH(1,I+1))))
END DO
DIFFU(IEND) = 0.0

c --- calculation of sorptivities for every moisture content.
THETASAT = IEND * 0.01 - 0.01
DO I = ISTART, IEND-1
    THETASTART = I * 0.01 - 0.01
    SORP(I) = 0.0
    DO J = I, IEND
        THETAJ = J * 0.01 - 0.005

        SORP(I) = SORP(I) + (THETAJ-THETASTART)*DIFFU(J)*0.01
    END DO

    SORP(I) = SQRT(2.0*SORP(I))

c --- calculation of factor b in sorptivity formula.
BFAC(I) = (4.0 * CON(1,IEND)) / (3.0 * SORP(I))
END DO

C ---- sorptivities at theta higher than PRAKSAT, are set to zero, and
C ---- factor B is set to practical infinite.
DO I = IEND, 81
    SORP(I) = 0.0
    BFAC(I) = 1000.0
END DO

GOTO 200

c ---- reading measured values of sorptivity.
100 READ(11,*) THETASTART, THETAEND

ISTART = NINT(100.0*THETASTART)+1
IEND = NINT(100.0*THETAEND)+1

DO I = ISTART, IEND-1
    READ(11,*) SORP(I)

    BFAC(I) = (4.0 * CON(1,IEND)) / (3.0 * SORP(I))
END DO

DO I = IEND, 81
    SORP(I) = 0.0
    BFAC(I) = 1000.0
END DO

GOTO 200
    
```

BIJLAGEN

blz. A-19

```
c --- reporting calculated and interpolated sorptivities to SWADAT.OUT.
200 HEAD1 = 'theta      S      b      '
    HEAD2 = '{m3/m3}      {cm/d1/2}      [1/day1/2] '
    WRITE(21, '(1X,3(A,10X))') HEAD1,HEAD1,HEAD1
    WRITE(21, '(1X,3(A,10X),/)' ) HEAD2,HEAD2,HEAD2

    ISTOP = INT((IEND-ISTART)/3) + 1
    DO I = 1, ISTOP
        INEXT = (I-1) * 3
        WRITE(21, '(3(F5.2,2F14.3,14X))')
    1          INEXT*0.01, SORP(INEXT+1), BFAC(INEXT+1),
    2          (INEXT+1)*0.01, SORP(INEXT+2), BFAC(INEXT+2),
    3          (INEXT+2)*0.01, SORP(INEXT+3), BFAC(INEXT+3)
    END DO

    RETURN
    END
```

A2.4 Subroutine PARSW

```

c+++++
c
      SUBROUTINE PARSW
c
c ---- SUBROUTINE PARSW: - READING PARAMETERS OF VOID RATIO - MOISTURE
c ---- RATIO TABEL (CODE(10) EQUALS 1)
c ---- - GENERATING CONSTANT VOID RATIO - MOISTURE
c ---- RATIO TABEL (CODE(10) EQUALS 0), SO NO SWEL
c ---- AND SHRINKAGE OCCURES.
c ---- - REPORTING PARAMETERS TO SWADAT.OUT.
c
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),(O-Z)
      INTEGER CODE, TRAIN, TDIF
      LOGICAL TGIFT
      DOUBLE PRECISION LAI
c
      DIMENSION IA(99), NDGIFT(366)
c
c.....
c.....
      INCLUDE 'COMMON.INC'
c.....
c.....
c
c ---- input of parameters void ratio - moisture ratio relationship.
      READ(11,*) STORAGEMAX
c
c ---- no parameters are given, calculating with constant volume and no cracks.
      IF (CODE(10).EQ.0) THEN
          DO I = 1, NPL
              CURVEVR(I,1) = SWCA(NC(I))/(1-SWCA(NC(I)))
              CURVEMR(I,1) = -500.0
              CURVEVR(I,2) = CURVEVR(I,1)
              CURVEMR(I,2) = 500.0
              ACURVE(I,1) = 0.0
              BCURVE(I,1) = CURVEVR(I,1)
          END DO
          GOTO 100
      END IF
c
c ---- swel and shrinkage parameters are given.
      READ(11,*) CRINFMAX
      NR = 1
      DO I = 1, NPL
    
```

BIJLAGEN

blz. A-21

```

        READ(11,*) NUMBER

        DO J = 2, NUMBER+1
            READ(11,*) CURVEMR(I,J), CURVEVR(I,J)
        END DO

C ---- generating start and end of tabel (straight line).
        CURVEMR(I,1) = -500.0
        CURVEMR(I,NUMBER+2) = 500.0
        CURVEVR(I,1) = CURVEVR(I,2)
        CURVEVR(I,NUMBER+2) = CURVEVR(I,NUMBER+1)

C ---- calculating terms of line equation.
        DO J = 1, NUMBER+1
            ACURVE(I,J) = (CURVEVR(I,J) - CURVEVR(I,J+1)) /
1             (CURVEMR(I,J) - CURVEMR(I,J+1))

            BCURVE(I,J) = CURVEVR(I,J) - CURVEMR(I,J)*ACURVE(I,J)
        END DO
    END DO

c --- reporting swel- and shrinkageparameters, to SWADAT.OUT.
        WRITE(21,2000)
2000  FORMAT('1',///,T30,' S W E L   A N D   S H R I N K A G E',/,
*           T30,' = = = = = = = = = = = = = = = '///)

        WRITE(21,'(//2A,F7.2,A)') ' Maximum storage capacity at the',
*                               ' soil surface: ', STORAGEMAX,' cm'

        WRITE(21,'(//2A,F7.2,A)') ' Maximum infiltration capacity of',
*                               ' cracks: ', CRINFMAX,' cm/cm'

        DO I = 1, NPL
            WRITE(21,'(///2A,I1)') ' Swel and shrinkage parameters',
*                               ' of layer: ',I
            WRITE(21,'(2A)')      ' -----',
*                               ' -----'
            WRITE(21,'(/A,F7.2,A)') ' Soilvolume: ', 1-SWCA(NC(I)),
*                               ' CM3/CM3'
            WRITE(21,'(/A)')      '   MOIST.RATIO       VOID RATIO'

            J = 2
            DO WHILE (CURVEMR(I,J).NE.500.0)
                WRITE(21,'(F7.2,10X,F7.2)') CURVEMR(I,J),
*                                           CURVEVR(I,J)
                J = J + 1
            END DO
        END DO

        DO I = 1, NPL
            VOLSOL(I) = 1 - SWCA(NC(I))
        END DO

        DO I = 1, NCS
    
```

BIJLAGEN

```
          VDX(I)   - DSP/NCS  
        END DO  
  
100     RETURN  
       END
```



A2.5 COMMON-blokken

LOGICAL NEWDAY, OLDSTO, PRINTOUT

C ---- additional precipitation parameters.

COMMON/ADDRAIN/

1 PRECDUR(366),	!* daily part of the day at which precipitation	!*
1 PRECDURA,	!* actual value of PRECDUR	!*
1 PINTA,	!* actual raining intensity (only if preca.ne.0)	!*
1 FINTA,	!* actual interception intensity (only if preca.ne.0)	!*
1 PRSTART,	!* actual start time of precipitation	!*
1 PREND,	!* actual end time of precipitation	!*
1 NEWDAY	!* indicator for the start of a new day	!*

C ---- swel and shrinkage soil parameters

COMMON/ADDSOIL/

1 ACURVE(5,50),	!* tangens of VR-MR-curve between inputpoints	!*
1 BCURVE(5,50),	!* corresponding intercepts VR-MR-curves	!*
1 CURVEMR(5,51),	!* input values of moisture ratio	!*
1 CURVEVR(5,51),	!* corresponding values of void ratio	!*
1 CRACKREL(40),	!* relative shrinkage for every compartment	!*
1 VOLSOL(5),	!* soilvolume for every soil layer	!*
1 VORAT(40),	!* voidratio for every compartment	!*
1 MORAT(40),	!* moisture ratio for every compartment	!*
1 VDX(40),	!* variable length of compartments	!*
1 CRINFTERM(40),	!* additional infiltration term in diff. equation	!*
1 CRINFMAX	!* maximum crack infiltration per cm length	!*

C ---- additional terms of waterbalance

COMMON/ADDWABA/

1 BYPA,	!* actual total bypass flow	!*
1 BYPAR,	!* actual direct (regular) bypass flow	!*
1 SOILMAT,	!* actual soil matrix flow (infiltration)	!*
1 OLDBYPA,	!* bypass flow of time step before actual	!*
1 CBYPA,	!* cumulative total bypass flow	!*
1 CBYPAR,	!* cumulative direct bypass flow	!*
1 CBYPAO,	!* cumulative overflow bypass flow	!*
1 SBYPA,	!* total bypass flow on a day	!*
1 SBYPAR,	!* direct bypass flow on a day	!*
1 STOINT,	!* raining intensity if storage infiltrates in timestep	!*
1 CSTOINT,	!* STOINT of timestep before	!*
1 STORAGEEMAX,	!* maximum height of the waterlevel at soilsurface	!*
1 DTS,	!* minimum timestep for last storage infiltration	!*
1 STORAGE,	!* actual height of stored water at soilsurface	!*
1 CSTORAGE,	!* STORAGE of timestep before	!*
1 TOTPREC,	!* sum of all factors of watre balance (only to check)	!*
1 OLDSTO	!* indicates whether storage has build up in timestep	!*
	!* before	!*

COMMON/ADDMISC/

BIJLAGEN

```
C ---- miscellaneous additional variables
1 TOTCAPINI,      !* cumulative potential infiltration in output period*!
1 NRINF,          !* number of infiltration timestep in output period  *!
1 OLDDT,          !* timestep of timestep before the actual          *!
1 PRINTOUT(4),   !* indicates what data have to be printed out      *!
1 SUBDIR

C ---- additional data to calculate infiltration with sorptivity
COMMON/ADDSORP/
1 SORP(81),       !* sorptivity for every moisture content          *!
1 BFAC(81),       !* factor b in formula according STROOSNIJDER 1978 *!
1 PRAKSAT,        !* practical saturation point of soil matrix          *!
1 PONDSTART       !* time at which ponding takes place                    *!
```

A3 LISTINGS VAN DE BELANGRIJKSTE BINNEN SWATRE AANGEPASTE SUBROUTINES

A3.1 Programma SWACR

```

.
.
.
.
.
c ---- s t a r t   o f   t i m e   s t e p
c      = = = = =   = =   = = = =   = = = =
c
      1  t=t+dt
         nts=nts+1
.
.
C-----
c ---- calculation of crack-volume with the new moisture content, if CODE(10)
c ---- equals 0, only the constant will be filled in.
         CALL CRACKVOL
c
c ---- calculating bypass-flow as part of the total precipitation, if CODE(10)
c ---- equals 0, only storage will be calculated.
         CALL CALCBY
c
c ---- print statements of subroutine OUTPUT.
         CALL PRINTOUTPUT(NTS)
C-----

c ---- of pressure heads
      do 10 i=1,n
         oldhed(i)=prhead(i)
      10 continue
         call hedcal
c
c ---- irrigation necessary ?
      if (code(9).eq.1) then
         if (prhead(ncrit).lt.phcrit) then
            m=int(t)+2
            if (train.lt.(m-tdif)) then
               tgift(m)=.true.
               train=m
               prec(m)=prec(m)+size
            end if
         end if
      end if
c
c ---- correction of moisture content and pressure head
      n0=n
      if(code(1).lt.4) n0=n-1

```

BIJLAGEN

blz. A-26

```

do 20 i=1,n0
    theta(i)=theta(i)+(prhead(i)-oldhed(i))*dmcap(i)
C-----
c ---- modification of theta, in case of calculation higher THETA then the
c ---- saturated THETA.
        IF (THETA(I).GT.SWCA(I)) THEN
            THETA(I) = SWCA(I)
        END IF
C-----

    20 continue
        call preshd
c
c ---- calculation of cumulative values
        call intgr1
c
c ---- reading of boundary conditions
        call boc0
c
c ---- calculation of water balance
        vol1=vol
        vol=0.0
        do 30 i=1,ncs
            vol=vol+theta(i)*dx
30    continue
        if(code(1).lt.4) vol=vol+(n*dx+gwla)*(swca(n+1)-theta(n))
        del=vol-vol1+ctra-ctral+flxs(1)*dt - BYPA*DT
        if(del.gt.0.) cdelp=cdelp+del
        cdel=cdel+del
c
        visd1=visd
        visd=0.
        do 31 i=1,isd
            visd=visd+theta(i)*dx
31    continue
        delisd=visd-visd1+ctra-ctral+flxs(1)*dt
        if(delisd.gt.0.) cflsdp=cflsdp+delisd
        cflsd=cflsd+delisd
c
c ---- calculation of groundwater level only if code(1)=1,code(1)=2
c ---- or code(1)=3
        if(iwt.eq.1) call calgwl
c
c ---- calculation of dif. moist. capacities and hydr. conductivities
        call moscon
c
c ---- calculation of fluxes in between the nodal points
        call fluxes
c
c ---- calculation of root extraction rates
        call rootex
c
c ---- output
    
```

BIJLAGEN

```
        if(iprt.eq.1.or.its.eq.1) call output(its,nts,npra)
c
c ---- calculation of next time step (dt)
        call deltim(its)
c
c ---- next time step
        go to 1
c
        end
```

BIJLAGEN

A3.2 Subroutine BOGO

```

.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
-----
c ---- assigning daily precipitation values.
      PRECA = PREC(M)
      PRECDURA = PRECDUR(M)

      SMAT = SMAT + SOILMAT*DT

c ---- calculation of precepation interval in the middle of the day
c ---- if at last call to DELTIM a new day was detected.
      IF (T.EQ.TMD-1) THEN
        K = T

c ---- calculating surface lowering (only output plotfile).
      SURL = 0.0
      DO I = 1, NCS
        SURL = VDX(I) - DX + SURL
      END DO

c ---- calculating precipitation duration last day (only output plotfile).
      IF (PRECDUR(K).EQ.0.0) THEN
        PDUR = 1.0
      ELSE
        PDUR = PRECDUR(K)
      END IF

c ---- writing relevant data to plot outputfile SWADAT.OUT
      WRITE(90,'(21F10.3)') T, GWLA-SURL, PREC(K), PREC(K)/PDUR,
1          SBYP A, SBYPAR, SBYP A-SBYPAR, SMAT, SURL,
2          CPREC-CINTC, CPSEV, CQD,
3          EP(K), (CRTEX(I), I = 1, 8)

c ---- calculating start and end of precipitation in middle of day.
      NEWDAY = .TRUE.

      IF (PRECA.NE.0.0) THEN
        PRSTART = M - 0.5 - (PRECDURA/2)
        PREND = M - 0.5 + (PRECDURA/2)
      ELSE
        PRSTART = 500.0
        PREND = 500.0
      END IF
      END IF

c ---- calculating raining intensity and initialisation.
      IF ((NEWDAY).AND.(PRECA.NE.0.0).AND.(PRECDURA.NE.0.0)) THEN
        PINTA = PRECA / PRECDURA
  
```

BIJLAGEN

blz. A-29

```

        FINTA = FINA / PRECDURA

        NEWDAY = .FALSE.

        SBYPA = 0.0
        SBYPAR = 0.0
        SMAT = 0.0
    ELSEIF ((NEWDAY).AND.(PRECA.EQ.0.0)) THEN
        PRECDURA = 0.0
        PINTA = 0.0
        FINTA = 0.0

        NEWDAY = .FALSE.

        SBYPA = 0.0
        SBYPAR = 0.0
        SMAT = 0.0
    END IF

c ---- assigning raining intensity to actual precipitation.
    IF ((T.GE.PRSTART).AND.(T.LT.PREND)) THEN
        PRECA = PINTA
        FINA = FINTA
    ELSE
        PRECA = 0.0
        FINA = 0.0
        SOILMAT = 0.0
    END IF

C-----
.
.
.
C-----
c ---- selecting runoff - groudwater level relationship

        IF (OPTION.EQ.1) THEN
c ---- exponential relation.
            qdeepa=arel*dexp(brel*dabs(gwla)) + CREL
        ELSE
c ---- polynomial relation.
            QDEEPA = AREL + BREL*ABS(GWLA) + CREL*(GWLA**2) +
1             DREL*ABS(GWLA**3)
        END IF

c ---- upward infiltration (not possible in case of Oosterend data).
    IF (QDEEPA.GT.0.0) THEN
        QDEEPA = 0.0
    END IF

.
.
.
    
```

A3.3 Subroutine DELTIM

```

c+++++
c
      subroutine deltim(its)
c ---- subroutine deltim : calculation of the time step (dt)
C
C ---- ADDITIONAL: - CALCULATING MAXIMUM TIME STEP FOR INFILTRATION
C ----                - CALCULATING EXACT TIMESTEPS AT STRT AND END OF
C ----                RAINING PERIOD.
C
      implicit double precision (a-h),(o-z)
      logical tgift, REPORT
      integer code,train,tdif
      double precision lai

c
c.....
c.....
      INCLUDE 'COMMON.INC'
c.....
c.....
C-----

c ---- storage of timestep, for usage in subroutine PRINTOUTPUT.
      OLDDT = DT

c ---- start of raining period, low time step
      IF ((T.EQ.PRSTART).AND.(CODE(10).NE.0)) THEN
          DTSTART = 0.0001
C
          DTSTART = (PREND-PRSTART)/10.0
      ELSEIF ((FLXA.GT.0.0).AND.(STORAGE.GT.0.00001)) THEN
          DTSTART = DTS
      ELSE
          DTSTART = 1.0
      END IF
C-----

c
      dtdt=rtex(1)+dabs((flxs(1)-flxs(2))/dx)
      j=n-1
c
      do 10 i=2,j
          dtdt=dmax1(dtdt,rtex(i)+dabs((flxs(i)-flxs(i+1))/dx))
10  continue
      dtdt=dmax1(dtdt,rtex(n)+dabs((flxs(n)-flxs(n+1))/dxn))
      if(dtdt.gt.0.0) dt=dthm/dtdt
      dt=dmin1(dt,dtm,DTSTART)
      dt1=dt
C-----
    
```



BIJLAGEN

blz. A-31

```
      IF ((PRECDURA.LT.1.0).AND.(T.LT.PRSTART).AND.  
        * (T+DT.GT.PRSTART)) THEN  
c ---- end of time step is start of precipitation.  
      DT = PRSTART - T  
      ELSEIF ((T+DT.GT.PONDSTART).AND.(T.LT.PONDSTART).AND.  
        * (PONDSTART.LT.PREND).AND.(PONDSTART.LT.TMD).AND.  
        * (STORAGE.LT.0.00001).AND.(CODE(11).GT.0)) THEN  
c ---- end of timestep is start of ponding period.  
      DT = PONDSTART - T  
      ELSEIF ((PRECDURA.LT.1.0).AND.(T.LT.PREND).AND.  
        * (T+DT.GT.PREND)) THEN  
c ---- end of timestep is end of precipitation.  
      DT = PREND - T  
      ELSEif (t+dt.ge.tmd) then  
c ---- end of timestep is start of new day.  
      REPORT = .TRUE.  
      PRECB = PREC(M)  
C-----  
  
      dt=tmd-t  
      its=1  
      tmd=tmd+1.  
      if(t+dt .ge. toutp .or. t+dt .ge. tend) iprt=1  
end if  
c  
return  
end
```

BIJLAGEN

A3.3 Subroutine HEDCAL

```

.
.
c ---- calculation of coefficients for 1<i<n
C
C-----
c ---- eventually taking additional term in equation for crack-infiltration.
  IF (BYPA.GT.0.0000001) THEN
    ICOMP = N-1
    BUFFER = BYPA
    DO WHILE (ICOMP.GT.2)
      IF (BUFFER.GT.0.0) THEN
        CRINFTERM(ICOMP) = CRINFMAX
        BUFFER = BUFFER - CRINFMAX * (DSP/NCS)

        IF (BUFFER.LT.0.0) THEN
          CRINFTERM(ICOMP) = CRINFMAX + BUFFER/(DSP/NCS)
          BUFFER = 0.0
        ENDIF
      ELSE
        CRINFTERM(ICOMP) = 0.0
      END IF

      IF ((ICOMP.EQ.3.0).AND.(BUFFER.GT.0.0000001)) THEN
        CRINFTERM(N-1) = CRINFTERM(N-1) + BUFFER
      END IF

      ICOMP = ICOMP - 1
    END DO
  END IF
C-----
  j=n-1
  do 10 i=2,j
    d=h2*conin(i)/dmcap(i)
    if(i.eq.n-1) h2=dt/(dx*dxg)
    a=h2*conin(i+1)/dmcap(i)
    b=1.0+a+d
C-----
    e=prhead(i)-h1*(conin(i+1)-conin(i))/dmcap(i)-
    * dt*rtex(i)/dmcap(i) + DT*CRINFTERM(I)/DMCAP(I)
C-----
    r1(i)=a/(b-d*r1(i-1))
    r2(i)=(d*r1(i-1)*r2(i-1)-e)/a
  10 continue
c
C-----
c ---- cleaning CRINFTERM for next call.
  IF (BYPA.GT.0.0000001) THEN
    DO I = 1, 40
      CRINFTERM(I) = 0.0
    END DO
  END IF
C-----

```

time : 181. days  
 time step= 0.500E+00 day number of time step=1385

cpred = 15.161 cm	cintcep = 2.726 cm	cpinfiltr = 12.435 cm	cinfiltr = 8.427 cm
cpetr = 23.935 cm	cptransp = 22.863 cm	cpsevap = 1.072 cm	cruno = -0.017 cm
cetr = 14.266 cm	*ctransp = 13.177 cm*	*csevap = 1.089 cm*	flux1 = 0.019770 cm/day
cflxsd = 1.364 cm	cflxsdp = 4.538 cm	cflxsdn = -3.174 cm	flxsd = 0.020241 cm/day isd = 5
cflxbu = 0.000 cm			flxbu = 0.000000 cm/day
cqdeep = -9.842 cm	cqdeepp = 0.000 cm	cqdeepn = -9.842 cm	qdeepa = -0.008995 cm/day
cdelta = -7.123 cm	cdeltap = 0.162 cm	cdeltan = -7.285 cm	delta = 0.153E-02 cm
volinit = 78.477 cm	vol = 66.945 cm	gula = -112.3 cm	drza = -25.0 cm n = 30
qpot = 0. kg/ha	qtot = 0. kg/ha	qtuber = 0. kg/ha	
CBYPA = 4.024 CM	CBYPAR = 0.274 CM	CBYPAD = 3.750 CM	STORAGE = 0.000 CM CSURLOW = 2.628 CM
CRACKAR = 11.482 DM2/M2	ACAPINF =	RELGNLA = -109.7 CM	

cnr	level (cm)	VARDX (CM)	theta (vol)	RTHETA (VOL)	MORAT (VOL)	VORAT (VOL)	pr.head (cm)	conduc (cm/day)	root ext (1/day)	c.root ext (cm)	cum.water (cm)	fluxes (cm/day)
1	1.8	3.53	0.300	0.360	0.697	0.937	-4248.	0.1044E-03	0.1105E-02	2.094	1.124	0.19994E-01
2	5.3	3.54	0.308	0.366	0.716	0.956	-3564.	0.1164E-03	0.1317E-02	2.076	2.278	0.16633E-01
3	8.8	3.55	0.315	0.371	0.732	0.972	-3051.	0.1289E-03	0.1539E-02	1.974	3.459	0.15432E-01
4	12.4	3.56	0.321	0.376	0.747	0.987	-2620.	0.1421E-03	0.1792E-02	1.873	4.664	0.16444E-01
5	16.0	3.57	0.328	0.381	0.764	1.004	-2208.	0.1605E-03	0.2127E-02	1.836	5.893	0.20241E-01
6	19.5	3.58	0.337	0.387	0.784	1.024	-1771.	0.1910E-03	0.2652E-02	1.912	7.159	0.26496E-01
7	23.1	3.60	0.348	0.395	0.810	1.050	-1309.	0.2463E-03	0.2392E-02	1.411	8.465	0.32062E-01
8	26.7	3.61	0.361	0.404	0.840	1.080	-897.6	0.3532E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	9.819	0.28837E-01
9	30.3	3.63	0.372	0.411	0.865	1.105	-640.4	0.5152E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	11.214	0.26104E-01
10	34.0	3.64	0.381	0.417	0.887	1.127	-476.8	0.7280E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	12.644	0.23733E-01
11	37.6	3.65	0.389	0.422	0.905	1.145	-369.1	0.1006E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	14.103	0.22101E-01
12	41.2	3.59	0.405	0.463	0.863	0.863	-260.5	0.6217E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	15.624	0.18862E-01
13	44.8	3.62	0.430	0.478	0.915	0.915	-160.9	0.8757E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	17.236	0.14620E-01
14	48.5	3.65	0.452	0.490	0.961	0.961	-107.0	0.1362E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	18.929	0.10808E-01
15	52.1	3.67	0.466	0.498	0.991	0.991	-79.23	0.2097E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	20.675	0.77147E-02
16	55.8	3.68	0.474	0.502	1.009	1.009	-63.86	0.2953E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	22.453	0.45233E-02
17	59.5	3.73	0.460	0.469	0.885	0.888	-54.62	0.3239E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	24.179	0.38732E-02
18	63.2	3.73	0.462	0.470	0.888	0.890	-48.47	0.1128E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	25.911	0.37140E-02
19	67.0	3.73	0.463	0.470	0.890	0.892	-43.72	0.1747E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	27.646	0.33463E-02
20	70.7	3.73	0.464	0.471	0.892	0.894	-39.35	0.2319E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	29.385	0.29856E-02
21	74.4	3.73	0.465	0.472	0.894	0.895	-35.17	0.2865E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	31.128	0.26329E-02
22	78.2	3.72	0.486	0.498	0.993	0.993	-30.96	0.1654E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	32.953	0.22573E-02
23	81.9	3.72	0.488	0.499	0.996	0.996	-26.72	0.1825E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	34.782	0.20004E-02
24	85.6	3.72	0.489	0.500	0.998	0.998	-22.58	0.1993E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	36.616	0.19333E-02
25	89.3	3.73	0.491	0.500	1.002	1.002	-18.51	0.2549E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	38.457	0.29049E-02
26	93.1	3.73	0.494	0.502	1.008	1.008	-14.42	0.3994E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	40.308	0.46622E-02
27	96.8	3.73	0.496	0.503	1.012	1.012	-11.05	0.5183E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	42.169	0.64233E-02
28	100.5	3.74	0.498	0.504	1.017	1.017	-7.720	0.6360E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	44.038	0.13586E-01
29	104.3	3.74	0.502	0.506	1.024	1.024	-4.567	0.1147	0.0000E+00	0.0000E+00	45.919	0.39936E-01
30	108.0	3.75	0.507	0.508	1.034	1.034	-1.775	0.2517	0.0000E+00	0.0000E+00	47.819	0.39936E-01
31	111.8	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	0.0000E+00	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	49.732	0.89946E-02
32	115.5	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	51.644	0.89946E-02
33	119.3	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	53.557	0.89946E-02
34	123.0	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	55.469	0.89946E-02
35	126.7	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	57.382	0.89946E-02
36	130.5	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	59.294	0.89946E-02
37	134.2	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	61.207	0.89946E-02
38	138.0	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	63.119	0.89946E-02
39	141.7	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	65.032	0.89946E-02
40	145.5	3.75	0.510	0.510	1.041	1.040	-2665E-14	0.3388	0.0000E+00	0.0000E+00	66.944	0.89946E-02

BIJLAGEN

A5 KORRELGROOTTEVERDELING DRAIN- EN GREPPERPERCEEL OOSTEREND

Plaats van bemonstering: Oostereind (Friesland)

Datum : April 1986

Grondsoort :

Granulaire samenstelling

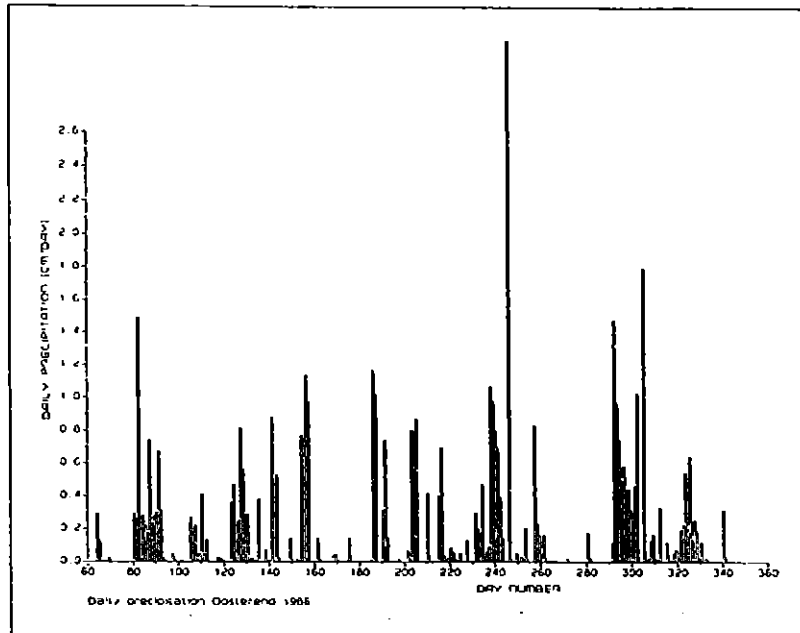
plek	hoofdbestanddelen							
	in % van de grond				in % van de minerale delen			
	CaCO <sub>3</sub>	(500 <sup>o</sup> ) humus	afslib- baar	tot. zand	< 2	2-16	16-50	> 50
Gr 1	0.00	17.19	48.23	34.58	37.68	20.56	35.04	6.72
Gr10	0.00	10.34	54.46	35.20	39.89	20.85	33.43	5.83
Gr20	0.00	6.85	62.02	31.13	40.69	25.89	28.29	5.13
Gr40	7.30	3.85	53.89	34.96	39.61	21.04	34.02	5.33
Gr60	2.47	4.52	76.97	16.04	58.07	24.68	16.17	1.08
Gr80	6.94	2.24	34.87	55.95	24.10	14.30	53.52	8.08
Gr100	9.03	2.16	46.51	42.30	31.94	20.44	45.02	2.61
Gr120	8.35	2.29	37.74	51.62	25.63	16.61	50.70	7.07
Dr 1	0.00	6.41	70.69	22.90	47.28	28.25	22.28	2.19
Dr10	0.00	9.21	68.41	22.38	43.58	31.77	22.20	2.45
Dr20	0.00	11.41	67.19	21.40	48.57	27.27	21.90	2.26
Dr40	5.25	4.12	71.98	18.65	51.52	27.90	19.53	1.05
Dr60	1.82	3.19	73.85	21.14	49.69	28.04	21.44	0.82
Dr80	11.19	2.18	54.73	31.90	37.01	26.17	34.89	1.93
Dr100	15.74	2.25	39.57	42.44	30.88	17.36	39.20	12.55
Dr120	18.80	2.39	55.56	23.25	41.93	28.57	27.65	1.85

BIJLAGEN

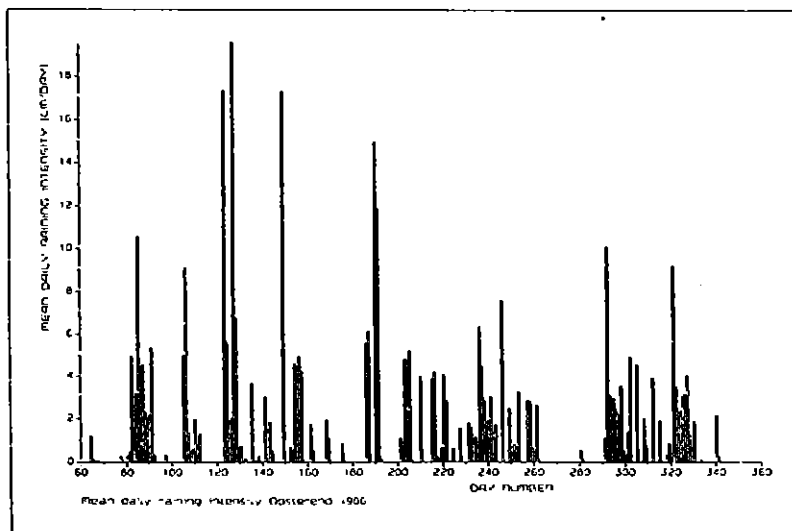
blz. A-35

A6 NEERSLAGGEGEVENS OOSTEREND

A6.1 DAGELIJKS GEMETEN NEERSLAGHOEVEELEID

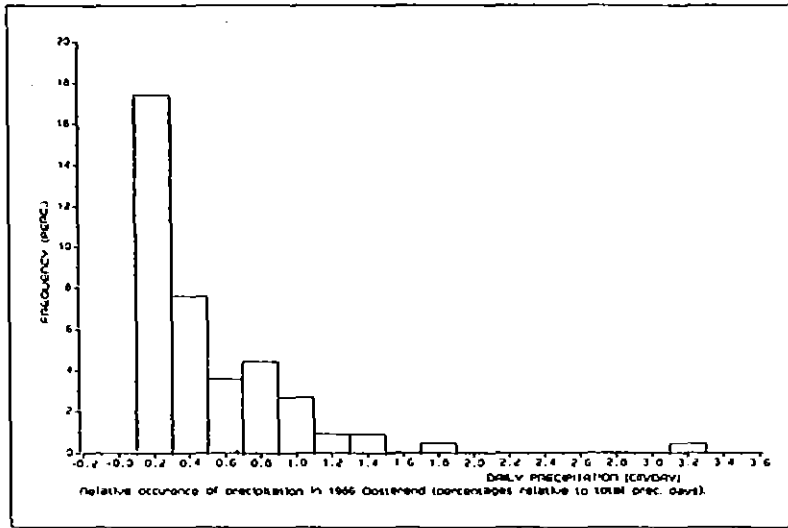


A6.2 DAGELIJKSE NEERSLAGINTENSITEIT



BIJLAGEN

A6.3 FREQUENTIEVERDELING DAGELIJKSE NEERSLAG



A6.4 FREQUENTIEVERDELING DAGELIJKSE NEERSLAGINTENSITEIT

