

M. v. Babel

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

EEN VERBETERD SIMULATIEMODEL VOOR DE WATEROPNAME
VAN LANDBOUWGEWASSEN

J. Hoogland

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

I N H O U D

	Blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. WATERONTTREKKINGSPATRONEN VAN WORTELSYSTEMEN	3
3. MODELLEN VOOR WATEROPNAME	8
3.1. Inleiding	8
3.2. Modellen analoog aan de Wet van Ohm	9
3.3. Modellen op grond van de wortelverdeling	12
3.4. Model waarin de opname afhangt van de drukhoogte van het bodemvocht	13
4. VERBETERD MODEL VOOR DE WATEROPNAME	15
4.1. Beschrijving van het model	15
4.2. Toetsing van het verbeterde model	19
5. CONCLUSIES	22
6. DISCUSSIE	
LITERATUUR	23

VOORWOORD

Het in dit verslag beschreven onderzoek werd uitgevoerd bij het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) in het kader van een doctoraal vak landbouwplantenteelt.

De aanzet voor dit onderzoek kwam voort uit een stage die eerder werd doorgebracht bij de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders te Lelystad. Tijdens deze stage werd gewerkt aan een model voor de simulatie van de fysische rijping van kleigronden. In dit rijpingsproces speelt de wateropname door plantewortels een zeer belangrijke rol.

Het onderzoek werd uitgevoerd onder leiding van dr. R.A. Feddes. Veel praktische hulp heb ik ontvangen van dr. C. Belmans. Zonder de medewerking van deze personen was dit onderzoek niet mogelijk geweest, waarvoor mijn hartelijke dank.

December, 1980

J. Hoogland

1. INLEIDING

Van een gewas wat beperkingen ondervindt in de vochtvoorziening, zal de actuele verdamping lager zijn dan de potentiële verdamping. De laatste is de maximale verdamping die op grond van atmosferische omstandigheden mogelijk is. Waarschijnlijk bestaat er een algemeen verband tussen de opbrengst van een gewas en zijn verdamping, als de andere groeifactoren in voldoende mate aanwezig zijn. Met dit bekende verband kunnen eventuele beperkingen in de vochtvoorziening worden vertaald in opbrengstredukties.

In het verleden werd de relatie tussen de gewasopbrengst en de vochtvoorziening van het gewas voornamelijk bestudeerd aan de hand van veldproeven; dit soort experimenten zijn veelal tijdrovend en duur.

Met de intrede van de computer is het mogelijk geworden met behulp van numerieke methoden voorspellingen te doen over de effecten die voorgenomen ingrepen hebben op een bepaald systeem. Het beschouwde systeem wordt voor dit doel weergegeven in een model. Dit is een stelsel wiskundige vergelijkingen waarmee de verschillende processen in het systeem worden beschreven. Voor de vergelijkingen wordt vaak gebruik gemaakt van empirische relaties.

Voordat het model gebruikt gaat worden om de werkelijkheid na te bootsen dient het getoetst te worden aan experimentele waarnemingen. Als de overeenkomst voldoende nauwkeurig wordt bevonden kan een bepaald verschijnsel met behulp van het model worden bestudeerd. Bij het trekken van conclusies uit de simulaties met een model blijft voorzichtigheid geboden. Alleen de uitkomsten van grootheden waarvoor het model ontworpen en vervolgens getoetst is kunnen als betrouwbare voorspellingen worden aangemerkt.

Het waterverbruik van een gewas is op twee manieren aan grenzen gebonden:

1. Atmosferische omstandigheden bepalen de potentiële verdamping van een gewas. Er zijn verschillende empirische formules opgesteld waarmee uit de weersgesteldheid (temperatuur, instraling, windsnelheid, relatieve luchtvochtigheid) in combinatie met de aard van het gewas (bodembedekking en gewashoogte) de potentiële

verdamping kan worden berekend. Bij neerslag moet rekening worden gehouden met water wat op de planten achterblijft (interceptie). De verdamping van het interceptiewater moet in mindering worden gebracht op de potentiële verdamping van het gewas.

2. Als de actuele verdamping lager is dan die welke op grond van de bovengrondse omstandigheden mogelijk zou zijn, dan is de aanvoer van water uit het wortelstelsel de beperkende factor. Een stagnerende wateropname van de wortels kan gelegen zijn in de volgende oorzaken:

- Als er mechanische barrières in de bodem voorkomen zal de bewortelingsdiepte worden beperkt. De beperkte wortelzone raakt dan snel uitgeput en de plant is na enige tijd aangewezen op het (weinige) water dat capillair opstijgt vanuit bodemlagen beneden de wortelzone.

- In natte en daardoor koude gronden kunnen de lage temperatuur en een slechte gasuitwisseling met de atmosfeer de ontwikkeling van een goed wortelstelsel afremmen.

Hoewel water overvloedig aanwezig is, kan de plant vanwege het ongunstige wortelmilieu er geen gebruik van maken.

- Een grond met een slecht vochthoudend vermogen zal bij een diepe grondwaterstand niet voldoende vocht voor het gewas gedurende een groeiseizoen kunnen leveren. Ook al tracht de plant door dieper te wortelen dit te compenseren.

Door het toepassen van cultuurtechnische ingrepen zoals het verbeteren van de doorwortelbaarheid van het profiel of het wijzigen van de grondwaterstand tracht men de hoeveelheid beschikbaar water voor het gewas zo groot mogelijk te maken.

In dit verslag wordt een model gepresenteerd voor wateropname door plantewortels. Het doel van dit model is wateropname van de plant te simuleren bij verschillende vochtsituaties, alsmede het patroon waarmee het water aan de verschillende lagen van het bodemprofiel wordt onttrokken.

Met dit model kan men voorspellingen doen over de effecten van bepaalde cultuurtechnische ingrepen op de waterhuishouding van de grond, en de verdamping en de produktie van landbouwgewassen.

In hoofdstuk 2 zal een beschrijving worden gegeven van de patronen waarmee planten over het algemeen water aan de grond onttrekken. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 bestaande wateropnamemodellen behandeld met de bezwaren en moeilijkheden die aan het gebruik van deze modellen verbonden zijn. In hoofdstuk 4 wordt het verbeterde model toegelicht en worden de uitkomsten van de toetsing van het model aan laboratoriumproeven gegeven.

2. WATERONTTREKKINGSPATRONEN VAN WORTELSYSTEMEN

Wateronttrekking door plantewortels kan worden uitgedrukt in eenheden van $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{cm}^{-3} \text{grond} \cdot \text{d}^{-1}$, ofwel in: d^{-1} . Een waarde $S = 0,006 \text{ d}^{-1}$ wil dus zeggen dat $0,006 \text{ cm}^3$ water aan een cm^3 grond wordt onttrokken gedurende één dag. Indien er geen stroming door de grond plaats vindt betekent dit dat de sink dan overeenkomt met de verandering van het bodemvochtgehalte.

Het verloop van de sink als functie van tijd en diepte kan worden duidelijk gemaakt aan de hand van experimenteel verkregen gegevens. De wateropname in een bepaald bodemcompartiment kan worden berekend door toepassing van de continuïteitsvergelijking (hierbij veronderstelt men dat de stroming in de wortelzone alleen in verticale richting plaats vindt) (zie fig. 1).

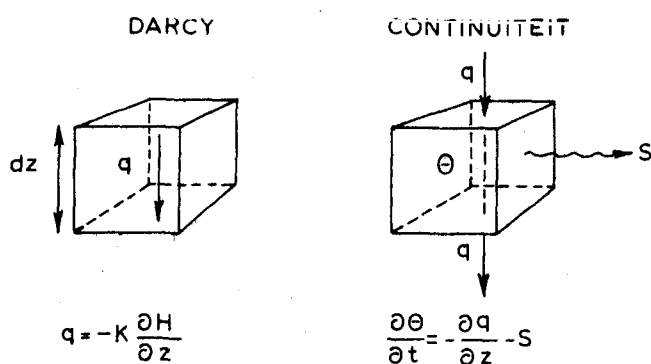


Fig. 1. Schematische weergave van de wateropname door plantewortels door een sink-term S die is opgenomen in de 1-dimensionale continuïteitsvergelijking voor verticale stroming. De flux door de bodem wordt berekend met behulp van de Wet van Darcy (naar FEDDES et al., 1978)

De sink in een bepaald bodemcompartiment wordt berekend als de divergentie van de flux door de plantwortels. De flux door de plantwortels op verschillende diepten in het profiel kan worden berekend door de totale flux door bodem en plant te verminderen met de berekende flux door de bodem.

Voor een niet te lange tijdstip luidt de continuïteitsvergelijking:

$$\int_0^z \bar{S}_z dz = \bar{q}_0 - \int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dz - \bar{q}_z \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (1)$$

(wortels) (totaal = wortels + bodem) (bodem)

waarin: \bar{S}_z = de gemiddelde opnamesnelheid (d^{-1}) van de wortels (sink) gedurende de tijdstip op een bepaalde diepte

\bar{q}_0 = gemiddelde flux door de onderkant van het compartiment (cm.d^{-1})

θ = vochtgehalte ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

\bar{q} = gemiddelde flux door de bodem (cm.d^{-1})

z = verticale coördinaat (cm)

De bodemflux kan worden berekend met behulp van de Wet van Darcy:

$$q_z = -K_z(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (2)$$

waarin: $K_z(h)$ = doorlatendheid van de grond (cm.d^{-1})

h = drukhoogte van het bodemvocht (cm)

z = coördinaat, positief naar beneden (cm)

De sink voor een bepaald compartiment kan nu als volgt worden berekend:

$$S_z = \frac{\partial q_{\text{roots},z}}{\partial z} \quad (3)$$

met $q_{\text{roots},z} = q_{\text{soil} + \text{roots},z} - q_z$

Voor de berekening van de extractiepatronen moet men dus de beschikking hebben over de $K(h)$ -curve en de drukhoogte (pF)-curve van de grond. Met behulp van gamma-scanning of tensiometers kan het verloop

van de vochtprofielen in de tijd worden gemeten.

De totale vochtonttrekking door de plant kan worden berekend door de opname van de wortels in de verschillende lagen te integreren over de bewortelingsdiepte z_r :

$$T = \int_{z=0}^{z=z_r} S_z \cdot dz \quad (4)$$

waarin T = transpiratie ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Een rekenvoorbeeld van de bepaling van de waterextractiepatronen is te vinden in FEDDES en RIJTEMA (1972).

De wateropname door de wortels van rode kool, uitgezet tegen de diepte (FEDDES, 1972) voor vier opeenvolgende perioden, staat weergegeven in fig. 2.

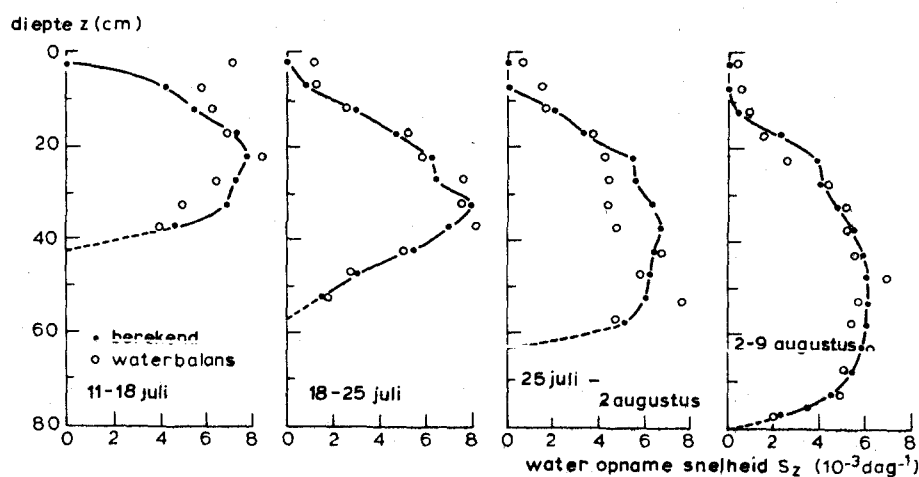


Fig. 2. Voorbeeld van de gemeten verschillen in het wateropnamepatroon van de wortels van rode kool geteeld op klei, gedurende vier opeenvolgende weken. De grondwaterspiegel bevond zich tussen 90 en 110 cm-m.v. (naar FEDDES, 1971)

Bij het begin van een uitdrogingsperiode vindt de wateronttrekking voornamelijk boven in het profiel plaats. Als na enige tijd de bovenste lagen van het proefiel uitdrogen verschuift de zone waarin de grootste onttrekking optreedt naar diepere lagen. De opname uit

de bovenste lagen van het profiel wordt dan relatief minder belangrijk. Als er zich een grondwaterspiegel tussen bijvoorbeeld 1 à 1,5 meter diepte in het profiel bevindt kan het gedeelte van het wortelstelsel gelegen nabij het grondwater een groot deel van de wateropname verzorgen.

Volgens REICOSKY (1972) kan soms 20 à 25% van het wortelstelsel dat dicht boven de grondwaterspiegel is gelegen ca. 80 à 90% van de totale wateropname voor zijn rekening nemen.

Het bovengenoemde wateropnamepatroon geldt niet alleen voor een groeiend wortelstelsel, maar ook voor wortelstelsels die min of meer homogeen over het bodemprofiel zijn verdeeld. Dit werd reeds door DAVIS (1940) aangetoond, die maaisplanten liet groeien op het uiteinde van een langwerpige, relatief ondiepe bak (fig. 3). Nadat de wortels over de gehele lengte van de bak aanwezig waren bevochtigde hij de bak gelijkmatig.

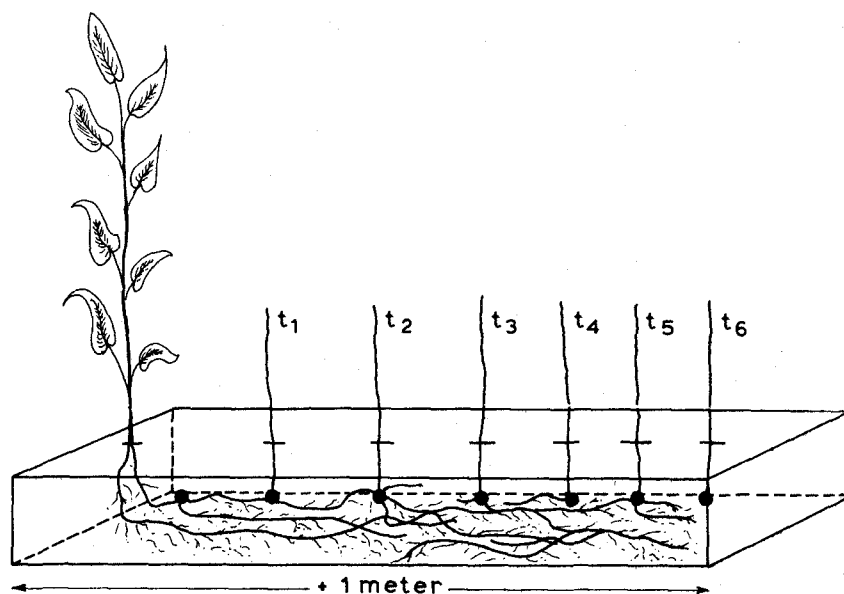


Fig. 3. Schematische weergave van de proefopstelling van DAVIS (1940) met behulp van tensiometers (t_1 t/m t_6) volgde Davis de uitdroging van de grond tengevolge van wateronttrekking door de wortels van een maaisplant. Tekening gemaakt aan de hand van beschrijving door NEWMAN (1974)

Door middel van een aantal tensiometers op een onderlinge afstand van 10 cm volgde Davis de uitdroging van de grond op verschillende afstanden tot de stam van de plant. In het begin bleek de wateropname dicht bij de stam het grootst te zijn. De zone waarin de grootste onttrekking plaats vond verplaatste zich steeds verder van de stambasis van de plant. Merkwaardig was dat de grond het dichtst bij de stambasis van de plant uitdroogde tot ongeveer verwelkingspunt, terwijl bijna een meter verder de grond nog steeds op nagenoeg veldcapaciteit was.

HERKELRATH (1975) deed laboratoriumproeven met wintertarwe op grondkolommen in perspex buizen. De kolommen waren 0,56 m hoog en verdeeld in 5 compartimenten welke gescheiden waren door middel van waslagen. Deze waslagen waren ondoorlatend voor water maar konden door de tarweplant wel doorworteld worden. Nadat alle compartimenten goed doorworteld waren en het gehele profiel gelijkmatig was bevochtigd, werd een uitdrogingsperiode gestart.

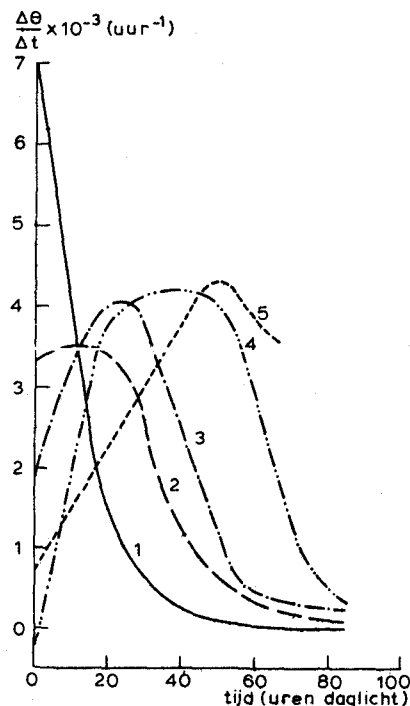


Fig. 4. Verloop van de wateropnamesnelheid ($\frac{\Delta\theta}{\Delta t} \cdot 10^{-3}$) door plantewortels met de tijd. De nummers 1 tot en met 5 zijn de nummers van de compartimenten (vertrekkend vanaf maaiveld). Deze compartimenten waren gescheiden door waslagen (naar BELMANS, 1978)

Aangezien waterstroming tussen de bodemcompartimenten niet mogelijk is komt de verandering van het vochtgehalte ($\frac{d\theta}{dt}$) in fig. 4 overeen met de opnamesnelheid van de wortels in een bepaald compartiment. Uit fig. 4 blijkt nog eens duidelijk dat het water eerst uit de bovenste lagen van het profiel wordt onttrokken. Als de opnamesnelheid door uitdroging van de grond bovenin het profiel terugloopt gaat de plant vervolgens het water uit diepere lagen onttrekken. De maximale opnamesnelheid in de verschillende compartimenten ligt voor de vier onderste compartimenten op ongeveer hetzelfde niveau, namelijk $4,2 \times 10^{-3} \text{ .uur}^{-1}$. Voor het bovenste compartiment is een sink gemeten die ruwweg twee keer zo groot is.

3. MODELLEN VOOR WATEROPNAME

3.1. I n l e i d i n g

Voor de beschrijving van het ingewikkelde proces van de wateropname door plantewortels zijn de laatste jaren diverse modellen ontwikkeld. Deze modellen kunnen op grond van hun uitgangspunten in drie groepen worden verdeeld:

- Modellen analoog aan de Wet van Ohm. Bij deze modellen wordt de opname en het transport van water door de plant beschreven met een stelsel weerstanden die door het water overwonnen moeten worden om vanuit de bodem het blad van de plant te bereiken. De drijvende kracht in deze modellen is het verschil in onderdruk (uitgedrukt in cm waterkolom) tussen het water in het wortelstelsel en het blad, welke laatste ontstaat door verdamping.
- Modellen die de wateropname evenredig stellen met een bepaalde maat voor de hoeveelheid wortels (lengte, gewicht), gecombineerd met de diffusiviteit van de bodem.
- Een model dat de wateropname berekent uit de potentiële verdamping, de bewortelingsdiepte en de drukhoogte in de bodem.

Deze drie soorten modellen zullen nu nader worden toegelicht.

3.2. Modellen analoog aan de Wet van Ohm

VAN DEN HONERT (1948) is de eerste geweest die de wateropname van planten beschrijft analoog aan de Wet van Ohm:

$$T = \frac{h_{\text{soil}} - h_{\text{root}}}{R_{\text{soil}}} = \frac{h_{\text{root}} - h_{\text{leaf}}}{R_{\text{plant}}} \quad (5)$$

waarin: T = transpiratie ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)

h_{soil} = drukhoogte in de bodem (cm)

h_{root} = drukhoogte op het oppervlak van de wortel (cm)

h_{leaf} = drukhoogte in de bladeren (cm)

R_{soil} = weerstand in de bodem (d)

R_{plant} = weerstand in de plant (d)

De snelheid waarmee water stroomt door de bodem naar de wortels en vervolgens van de wortels door de plant naar de huidmondjes in de bladeren is dus evenredig met de drijvende kracht ($h_{\text{soil}} - h_{\text{root}}$ en $h_{\text{root}} - h_{\text{leaf}}$) en omgekeerd evenredig met de weerstanden die in de bodem en de plant overwonnen moeten worden. Omdat de drukhoogte op het grensvlak tussen bodem en wortel moeilijk of niet gemeten kan worden, wordt vergelijking (1) meestal herschreven tot:

$$T = \frac{h_{\text{soil}} - h_{\text{leaf}}}{R_{\text{soil}} + R_{\text{plant}}} \quad (6)$$

De grootte van de som van de weerstanden $R_{\text{soil}} + R_{\text{plant}}$ kan gevonden worden door T , h_{soil} en h_{leaf} te meten. T kan worden gemeten met een lysimeter, h_{leaf} met een pressure bomb en h_{soil} met een tensiometer.

De plantweerstand, R_{plant} , kan worden bepaald door de waterspanning in het xyleem van de wortels en in het blad te meten. Bij een gegeven verdamping kan R_{plant} hieruit worden berekend. Over de grootte van R_{plant} lopen in de literatuur de meningen uiteen. HANSEN (1974) vond dat R_{plant} afnam met toenemende verdampingssnelheid. Andere onderzoekers veronderstellen dat R_{plant} niet afhangt van de verdampingssnelheid of van het vochtgehalte in de bodem.

De bodemweerstand, R_{soil} , kan worden berekend door de stroming naar één enkele wortel te beschouwen. De wortel wordt voorgesteld als een rechte cilinder met een bepaalde straal r_1 . In de hydrologie kent men oplossingen voor dit stromingsprobleem, omdat het vergelijkbaar is met de stroming naar een put. Voor een wortel met een bepaalde lengte L in een laagje grond met een dikte Δz luidt de oplossing (GARDNER, 1960):

$$\Delta q_r = B \cdot L \cdot K \cdot (h_{\text{soil}} - h_{\text{root}} - z) \cdot \Delta z \quad (7)$$

waarin: $B = 2\pi/\ln(r_2/r_1)$ een dimensieloze geometrische constante van het wortelstelsel voorstelt.

Uit vergelijking (7) volgt voor de bodemweerstand:

$$R_{\text{soil}} = \frac{1}{B \cdot L \cdot K} \quad (8)$$

waarin: L is de wortellengte per volume-eenheid grond ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$).

De overeenkomst tussen de som van de weerstanden afgeleid uit vergelijking (6) en de som van de afzonderlijke plantweerstand gemeten in het xyleem en bodemweerstand berekend met vergelijking (8) is vaak gering. Dit wordt toegeschreven aan het optreden van een extra weerstand op het contactvlak van wortel en bodem. Bij uitdroging van de grond neemt het aantal met water gevulde poriën af. Daardoor vermindert ook het contact tussen wortel en bodemvocht. Bovendien kan door uitdroging de wortel gaan krimpen waardoor het contact tussen de wortel en de bodem aanzienlijk vermindert. Door deze twee verschijnselen kan de weerstand op het grensvlak bodem-wortel bij uitdroging zeer sterk toenemen.

NNYAMAH (1977) vermeldt dat de contactweerstand meer dan de helft kan bedragen van de totale weerstand. Het is waarschijnlijk dat de aard van de bodem (textuur en structuur) bij deze verschijnselen een rol speelt.

In veel Ohmse modellen wordt door de sinkterm S_z een uitdrukking gebruikt die overeenkomst vertoont met vergelijking (7) van Gardner, welke kan worden beschreven als:

$$S_z = \frac{\Delta q_{\text{root}}}{\Delta z} = (h_{\text{soil}} - h_{\text{root}} - z) \cdot K \cdot B \cdot L(z) \quad (9)$$

waarin: S_z , q_{root} , h_{soil} , h_{root} en L van de diepte afhangen en K een functie is van de drukhoogte in de bodem.

WHISLER et al. (1968) schrijven de sinkterm als:

$$S_z = K \cdot (h_{\text{soil}} - h_{\text{root}}) \cdot A(z) \quad (10)$$

Met $A(z) = k[a(z)/L_e]$, waarin k een evenredigheidsconstante is, $a(z)$ de oppervlakte waarover water wordt opgenomen per volume-eenheid grond ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$) en L_e een effectieve afstand die het water aflegt door de bodem naar de wortels.

De factoren B , L en k worden door respectievelijk Gardner en Whisler et al. beschouwd als een soort wortelactiviteitsconstante die de oppervlakte van de wortels in de grond en de afstand tussen de afzonderlijke wortels weergeeft.

FEDDES (1971) en FEDDES et al. (1974) gebruiken de vergelijking:

$$S_z = K \cdot (h_{\text{soil}} - h_{\text{root}}) \cdot b'(z) \quad (11)$$

waarin: $b'(z)$ een uitdrukking is voor de ruimtelijke verdeling en de lengte van de wortels. FEDDES et al. (1974) toonden aan dat $b'(z)$ evenredig is met de wortelmassa, waarbij de laatste als een exponentiële functie van de diepte kan worden beschreven. Door calibratie kan de juiste parameter c worden gevonden uit $b'(z) = c \cdot w(z)$, waarin $w(z)$ de verdeling van de wortelmassa in het profiel voorstelt.

VAN BAVEL en AHMED (1976) beschrijven de wateropname uit een bepaald bodemlaagje met:

$$S_z = \frac{\Delta q_{\text{root}}}{\Delta z} = (h_{\text{soil}} - h_{\text{leaf}} - z) \cdot L' \cdot R_{\text{plant}}^{-1} \quad (12)$$

waarin ψ_{leaf} een effectieve drukhoogte in de bladeren is, L' de bewortelingsdichtheid in $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ en R_{plant} de plantweerstand. In vergelijking (12) wordt de bodemweerstand buiten beschouwing gelaten, waaruit blijkt dat volgens de auteurs de voornaamste weerstand in de plant ligt.

De transpiratie (= de totale wateropname) wordt in de bovengenoemde modellen berekend door de sink S_z over de diepte te integreren volgens vergelijking (4). De hierboven genoemde voorbeelden van Ohmse modellen (verg. 9, 10, 11 en 12) maken duidelijk dat deze modellen zeer gedetailleerde informatie vragen wat betreft het wortelsysteem. Alle veranderingen gedurende een groeiseizoen in de lengte en verdeling van de wortels moeten bij de berekeningen bekend zijn. Vaak kunnen bepaalde modelparameters alleen door calibratie worden gevonden. Het is duidelijk dat deze gecompliceerde modellen niet geschikt zijn voor de bestudering van de effecten van bodemtechnische ingrepen op het vocht leverend vermogen van een grond.

3.3. Modellen op grond van de wortelverdeling

MOLZ and REMSON (1971) gaan er in hun model voor wateropname van uit dat de sink, S_z , evenredig is met een wortelverdelingsfunctie en de diffusiviteit, D , van de bodem ($D = K \cdot dh/d\theta$). De wortelverdelingsfunctie kan zowel betrekking hebben op de lengte als op het gewicht van de wortels.

De sink, S_z , wordt berekend met:

$$S_z = T \left[\frac{R(z) \cdot D(\theta)}{\int_0^{z_r} R(z) \cdot D(\theta) \cdot dz} \right]$$

waarin T de transpiratie is, $D(\theta)$ de diffusiviteit van de bodem als functie van het vochtgehalte en $R(z)$ de wortelverdelingsfunctie. Met deze benadering kan volgens AFSHAR and MORINO (1978) het onttrekkingspatroon redelijk nagebootst worden. Uit vergelijking (13) blijkt dat met deze formulering een optredende reductie in verdamping bij uitdrogende grond niet kan worden berekend.

VAN KEULEN (1975) beschrijft de wateropname in een bepaald laagje grond als:

$$S_z = \frac{\Delta q_r}{\Delta z} = T'_m \cdot L' \cdot \alpha \cdot \beta \quad (14)$$

waarin T'_m de maximale wateropname per lengte-eenheid wortel in natte grond is, L' de actuele wortellengte, α een reductiefactor voor de heersende temperatuur en β een reductiefactor voor de uitdroging van de grond.

Vergeleken met de Ohmse modellen zijn de twee hier genoemde modellen eenvoudiger. De modellen hebben echter beide bezwaren voor toepassing bij de evaluatie van bodemtechnische en waterhuishoudkundige ingrepen. In het eerste model ontbreekt een reductie voor de verdamping bij uitdrogende grond en in het tweede model is de reductiefactor voor de temperatuur in de praktijk een moeilijk te bepalen coëfficiënt.

3.4. Model waarin de opname afhangt van de drukhoogte van het bodemvocht

FEDDES et al. (1978) stellen voor de sink, S_z , van de wortels te laten afhangen van de drukhoogte in de bodem. Ze introduceren een dimensieloze sinkterm-variabele $\alpha(h_{\text{soil}})$ zodanig dat:

$$S_z = \alpha(h_{\text{soil}}) \cdot S_{\text{max}} \quad (15)$$

waarin S_z de actuele sink voorstelt, $\alpha(h_{\text{soil}})$ een functie is van de drukhoogte van het bodemvocht en S_{max} de maximale wateropname is. De laatste wordt berekend uit:

$$S_{\text{max}} = \frac{T_m}{L_{\text{root}}} \quad (16)$$

waarin T_m de potentiële verdamping is en L_{root} de diepte van de worteling. Uit vergelijking (16) volgt dat de auteurs er van uitgaan dat, als de grond overal even vochtig is, alle wortels in dezelfde mate bijdragen aan de verdamping. De grootte van $\alpha(h_{\text{soil}})$ als functie van de drukhoogte staat weergegeven in fig. 5.

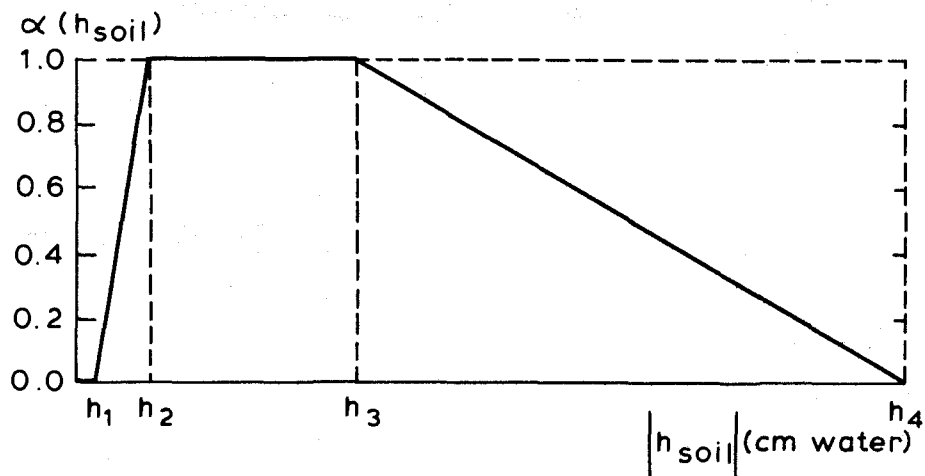


Fig. 5. Het verloop van de dimensieloze sinkterm-variabele $\alpha(h_{\text{soil}})$ als functie van de absolute waarde van de drukhoogte van het bodemvocht h_{soil} (naar FEDDES et al., 1978)

De veronderstellingen die aan de vorm van de $\alpha(h_{\text{soil}})$ functie ten grondslag liggen zijn de volgende:

- Als de grond natter is dan een bepaald vochtgehalte zijn de wortels niet meer in staat water op te nemen, doordat de gasuitwisseling met de atmosfeer in de bijna verzadigde grond te beperkt wordt. Dit komt tot uitdrukking door $\alpha(h_{\text{soil}}) = 0$ te stellen voor $|h_{\text{soil}}| < h_1$. In het traject $h_1 < |h_{\text{soil}}| < h_2$ loopt de $\alpha(h_{\text{soil}})$ op tot 1. Bij de drukhoogte h_2 is het luchtgehalte van de grond niet meer beperkend voor de wortelactiviteit.
- In het traject $h_2 < |h_{\text{soil}}| < h_3$ treedt geen beperking op in de wateropname tengevolge van de heersende drukhoogte. Boven een bepaalde grens (b.v. $h_3 = 500$ of $pF = 2,7$) vermindert de opnamesnelheid van de wortels.
- Als de grond uitgedroogd is tot verwelkingspunt (b.v. $h_4 = 16\ 000$ of $pF = 4,2$) kunnen de wortels geen water meer opnemen. Tussen h_3 en h_4 neemt $\alpha(h_{\text{soil}})$ lineair af met de zuigspanning van 1,0 tot 0,0.

Door de sink op deze wijze van de drukhoogte van het bodemvocht af te laten hangen kan eenvoudig de reductie van de opname in een

uitdrogende grond worden berekend. De beworteling wordt in dit model uitsluitend gekarakteriseerd door de bewortelingsdiepte. Deze is in de praktijk relatief gemakkelijk te bepalen, waardoor dit model eenvoudig toepasbaar is bij simulaties van de wateropname.

De eenvoudige benadering in het model van FEDDES et al. (1978) brengt met zich mee dat in bepaalde gevallen de wateropname niet goed wordt gesimuleerd. Bij een geringe bewortelingsdiepte en een hoge potentiële verdamping kan de opnamesnelheid S_{\max} in principe te hoog worden berekend. Bij een simulatie van de droge zomer van 1976 werd bijvoorbeeld voor grasland met een bewortelingsdiepte van 40 cm een sink berekend van $0,03 \text{ d}^{-1}$. Vergelijking van deze waarde met literatuurgegevens liet zien dat genoemde waarde onwaarschijnlijk hoog is, vooral voor de wortels aan de onderzijde van de wortelzone. Dit is een gevolg van het feit dat de sink rechtstreeks uit de potentiële verdamping en de bewortelingsdiepte wordt berekend (verg. (16)). Door deze berekeningsmethode komen de onttrekkingspatronen in de simulaties ook niet helemaal overeen met die in de praktijk. In het model onttrekken de wortels aan de onderkant van de wortelzone ook water als er boven in het profiel nog volop water aanwezig is. Het is in het model niet mogelijk dat een deel van het wortelstelsel de totale wateropname voor zijn rekening neemt. Er treedt reductie van de opname op zodra ergens in het profiel de grond begint uit te drogen. Gevallen waarbij een deel van het wortelstelsel, gelegen nabij het grondwater het grootste deel van de wateropname verzorgt kunnen niet juist worden gesimuleerd.

4. VERBETERD MODEL VOOR DE WATEROPNAME

4.1. Beschrijving van het model

Uit het vorige hoofdstuk is duidelijk geworden dat het model van FEDDES et al. (1978) het gemakkelijkst toegepast kan worden bij de simulatie van de wateropname door een gewas. Het model vraagt veel minder informatie over de aard van de beworteling dan de andere onderscheiden typen modellen. Om de wateronttrekkingspatronen gedu-

rende een groeizeizoen nauwkeuriger te kunnen simuleren is een verbeterde versie van het model ontworpen.

In de nieuwe versie van het model wordt S_{\max} niet meer berekend uit de potentiële verdamping en de bewortelingsdiepte, maar opgegeven als functie van de diepte (fig. 6).

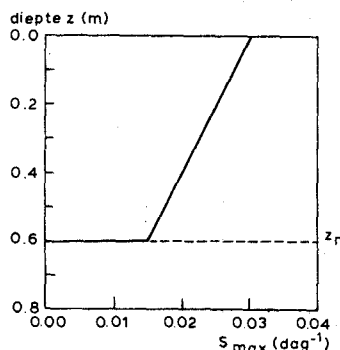


Fig. 6. Het verloop van de maximale opnamesnelheid S_{\max} als functie van de diepte z . Het symbool z_r vertegenwoordigt de bewortelingsdiepte

De grootte van S_{\max} en de diepte waarop deze werd gemeten kan voor enkele gewassen gevonden worden in tabel 1. Uit deze tabel blijkt dat er voor bepaalde gewassen aanzienlijke verschillen bestaan tussen de waargenomen maximale onttrekkingssnelheden. Men vindt steeds dat de S_{\max} gemeten in het laboratorium groter is dan die gemeten in het veld. De reden hiervan ligt waarschijnlijk in een verschil in temperatuur. De laboratoriumexperimenten worden meestal uitgevoerd met een grondkolom die ongeveer op kamertemperatuur is (20 à 25°C), en dat is hoger dan de temperatuur van het grootste deel van de bodem in het veld.

De invloed van de temperatuur op de opnamesnelheid van de wortels is erg groot, want volgens BROUWER en KUIPER (1972) is de Q_{10} van dit opnameproces 4. Daardoor wordt ook duidelijk dat S_{\max} varieert met de diepte en niet voor alle diepten in de wortelzone gelijk kan worden gesteld. Naast het verschil in temperatuur in de wortelzone heeft ook de aanwezige hoeveelheid wortels invloed op de opnamesnelheid. Bij numerieke experimenten met dit model is aangenomen dat S_{\max} lineair verloopt met de diepte. De twee waarden van S_{\max} aan de boven- en onderzijde van de wortelzone worden aan het model opgegeven.

Tabel 1. Waarden voor de maximale onttrekkingsnelheid van wortels.
 S_{\max} ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \text{cm}^{-3} \text{grond} \cdot \text{d}^{-1}$), op een bepaalde diepte (cm),
 zoals gevonden in de literatuur

Gewas	Auteur		S_{\max}	Diepte z	Opmerking
Gras	BELMANS	(1978)	0,03	10	lab. proef T = + 21°C
			0,015	30	
	FLÜHLER et al.	(1975)	0,033	10	veldproef
			0,025	45	
			0,010	90	
Tarwe	EHLERS	(1976)	0,030	10	veldproef
			0,015	20	
			0,005	40	
	HERKELRATH	(1977)	0,084	7	lab. proef T = 25°C
			0,048	30	
			0,048	50	
	GREGORY et al.	(1978)	0,024	10	veldproef
			0,012	20	
			0,0075	30	
			0,003	80	
STREBEL	(1975)	0,012	25	veldproef	
		0,006	40		
		0,002	80		
Bieten	STREBEL	(1975)	0,007	20	veldproef
			0,004	40	
			0,002	120	
Sorghum	STONE et al.	(1973)	0,022	5	irrigatie- proef in het veld
			0,010	20	
			0,003		
	REICOSKY et al.	(1976)	0,008	50	veldproef
			0,007	75	
			0,002	100	
Soja	SO	(1978)	0,035	30	lab. proeven
			0,020	65	
	STONE et al.	(1976)	0,011	20	veldproef
			0,008	70	
			0,003	100	
	ALLMARAS et al.	(1975)	0,010	20	veldproef
			0,018	75	
	ARYA et al.	(1975)	0,018	20	veldproef
		0,013	40		
		0,010	55		
		0,005	90		

Tabel 1 vervolg

Gewas	Auteur		S_{\max}	Diepte z	Opmerking
Soja	REICOSKY et al.	(1972)	0,005	55	veldproef
			0,012	75	
Mais	ALLMARAS et al.	(1975)	0,013	40	veldproef
			0,013	75	
			0,013	100	
			0,005	130	
Bermuda grass	RICE	(1975)	0,025	10	veldproef begin van het groeiseizoen
			0,045	10	
Katoen	JORDAN et al.	(1971)	0,0035	75	veldproef
Rode kool	FEDDES et al.	(1972)	0,0075	20	veldproef
			0,008	32	
			0,006	50	
			0,005	70	

Als de grond begint uit te drogen zal de snelheid van de wateropname teruglopen. De reductie van de opname wordt in de verbeterde versie op dezelfde manier berekend als in de oorspronkelijke versie, namelijk met een dimensieloze sinkterm-variabele:

$$S_z = \alpha(h_{\text{soil}}) \cdot S_{\max}(z) \quad (17)$$

Door sink S_z van vergelijking (17) vanaf het maaiveld naar beneden toe over de diepte te integreren kan worden nagegaan aan hoeveel lagen de plant water gaat onttrekken om in de potentiële waterbehoefte te kunnen voorzien.

$$T = \int_0^z S_z \cdot dz \leq E_{\text{pot}} \quad \text{waarbij } z \leq z_r \quad (18)$$

waarin: E_{pot} = potentiële verdamping
 T = actuele verdamping
 z = diepte
 z_r = bewortelingsdiepte

Doordat van boven naar beneden geïntegreerd wordt zal in een vochtig profiel alleen uit de bovenste lagen water worden onttrokken. Met het uitdrogen van de grond wordt de sink boven in het profiel kleiner en gaat de plant ook water uit diepere lagen onttrekken. Zolang de plant nog niet aan alle lagen water hoeft te onttrekken kan hij potentieel verdampen.

4.2. Toetsing van het verbeterde model

Het verbeterde wateropname model werd getoetst aan experimenten met potproeven die uitgevoerd zijn door BELMANS (1979). De potten waren 60 cm hoog en hadden een diameter van 10 cm. Ze waren gevuld met zand met een bekende pF-curve en een bekende doorlatendheid. Als functie van de drukhoogte op de potten werd Italiaans raaigras ingezaaid en vervolgens werd gewacht tot de potten goed doorworteld waren. De temperatuur in de ruimte waarin de potten stonden opgesteld bedroeg 21°C en de relatieve luchtvochtigheid was 38%. De belichting bestond uit hoge druk kwikdamplampen van 400 Watt. De potentiële verdamping onder deze omstandigheden bedroeg $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$.

Na een bevochtiging en een daarop volgende vrije drainage werd de kolom aan de onderzijde afgesloten en volgde een uitdrogingsperiode van 21 dagen. Het verloop van het vochtgehalte op verschillende diepten met de tijd werd gemeten met behulp van 'gamma scanning'.

De uitdrogingsperiode werd gesimuleerd met het programma SWATRS waarin het vernieuwde opnamemodel was opgenomen als subroutine. Het programma SWATRS is ontwikkeld op het ICW en wordt gebruikt voor de simulatie van onverzadigde grondwaterstroming. Een afdruk van de subroutine voor de wortelopname (subroutine RER = root extraction rate) is beschikbaar. De bewortelingsdiepte in de simulatie was 60 cm. S_{max} werd voor de bovenzijde van de wortelzone gesteld op $0,03 \text{ d}^{-1}$ op grond van gegevens uit tabel 1. Voor de onderzijde van de wortelzone werd domweg aangenomen dat S_{max} de helft bedroeg van S_{max} aan de bovenzijde dus $0,015 \text{ d}^{-1}$.

In fig. 7 zijn de gemeten potentiële en actuele evapotranspiraties uitgezet naast de gesimuleerde evapotranspiraties van het oude en nieuwe model. Na 10 dagen treedt er een afwijking op tussen de

gesimuleerde en de gemeten evapotranspiratie. Dit kan een gevolg zijn van een foutieve schatting van de fractie bodemverdamping. De verhouding tussen de potentiële gewasverdamping en de potentiële bodemverdamping was gesteld op 4:1 ($8 \text{ mm.d}^{-1} : 2 \text{ mm.d}^{-1}$).

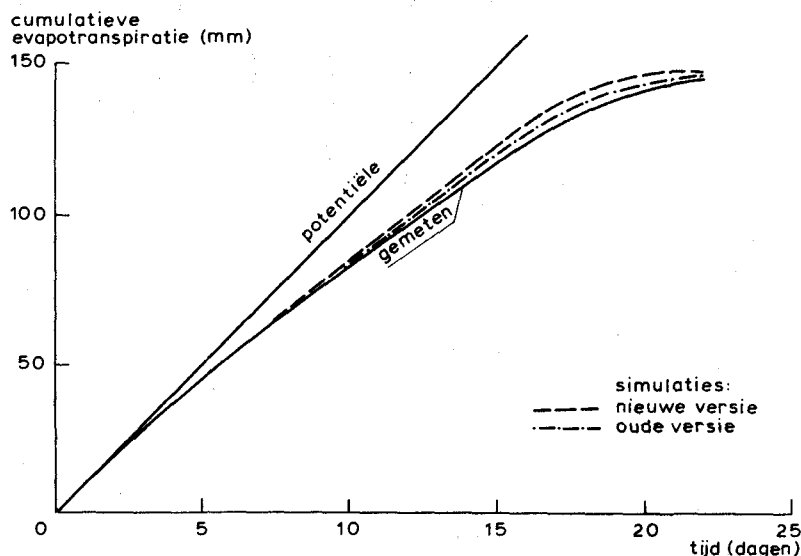


Fig. 7. Resultaten van de simulaties van de potproeven met de oude en nieuwe versie van het opnamemodel. De gesimuleerde cumulatieve evapotranspiratie is uitgezet naast de potentiële en de gemeten cumulatieve evapotranspiratie (mm)

Uit fig. 7 blijkt ook dat de oude versie van het model de gecumuleerde evapotranspiratie nauwkeuriger voorspelt dan de nieuwe versie, tenminste voor dit particuliere experiment. Dit komt doordat de vermoedelijk overschatte gewasverdamping al snel gereduceerd wordt vanwege de redenen beschreven in III-3.

In fig. 8 staan de gemeten en de met de beide versies gesimuleerde vochtgehalteprofielen naast elkaar weergegeven, voor verschillende tijdstippen. Het blijkt dat het nieuwe model de profielen beter simuleert dan de oude versie.

Het oude model onttrekt in het begin te weinig water bovenin de wortelzone en te veel onderin. De kleine dwarsstreepjes in de vochtprofielen van de nieuwe versie geven aan tot welke diepte de wortels in het nieuwe model water opnemen. Na 9 dagen onttrekt het gewas het water volgens fig. 8 uit de bovenste 45 cm.

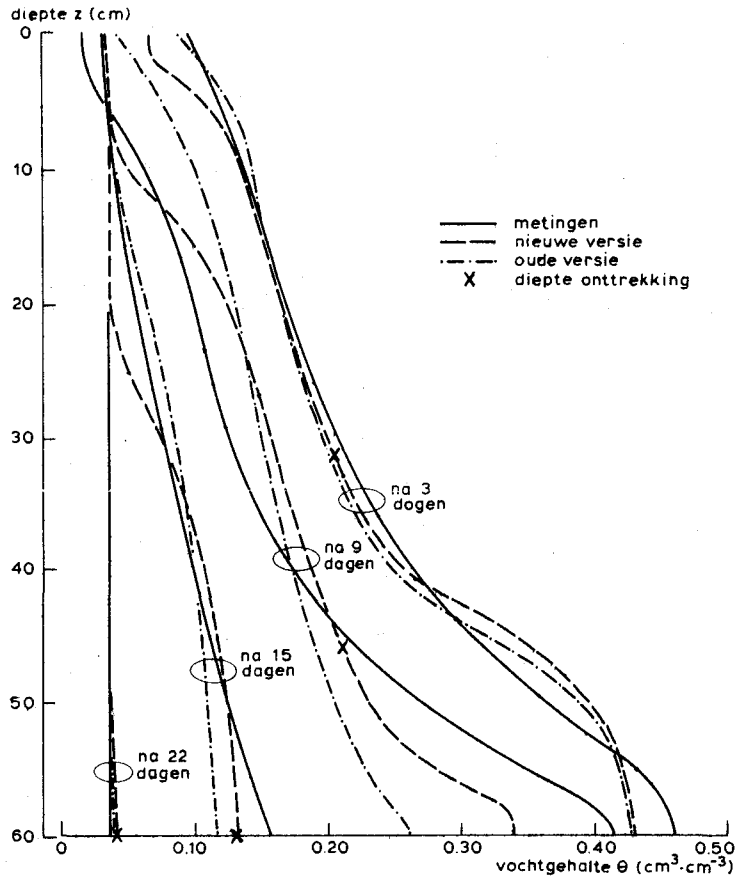


Fig. 8. De gesimuleerde vochtgehalteprofielen in de potten op vier verschillende tijdstippen uitgezet naast de vochtwaarnemingen. Kleine dwarsstreepjes geven aan tot welke diepte de wortels water onttrekken in het nieuwe model

De grond is onder in de pot de eerste 9 dagen veel natter dan werd gesimuleerd. Dit kan het gevolg zijn van een onjuist verband tussen de drukhoogte en het vochtgehalte of tussen de drukhoogte en de doorlatendheid van de grond.

Na 21 dagen zijn de verschillen tussen de gemeten en de gesimuleerde profielen weer teniet gedaan. Dit spreekt vanzelf omdat de potten dan uitgedroogd zijn tot verwelkingspunt ($pF = 4,4$ of $h_{soil} = 25\ 000$).

5. CONCLUSIES

- De wateronttrekkingspatronen in de potten werden door het vernieuwde wateropnamemodel beter gesimuleerd dan door de oude versie. Waarschijnlijk zullen de verschillen tussen de uitkomsten van de beide modellen groter zijn, wanneer een situatie wordt gesimuleerd waarbij op geringe diepte een grondwaterspiegel voorkomt.
- Reductie van de verdamping bij het uitdrogen van de grond kwam in de berekeningen goed overeen met de gemeten toestand.
- Voor een simulatie van de waterextractie en de reductie van de verdamping met het vernieuwde model is het noodzakelijk dat de potentiële verdamping van het gewas bekend is.
- Over de in dit model gebruikte S_{\max} is nog weinig bekend. Wel zijn in de literatuur voor verschillende gewassen enkele waarden gevonden. Hoe de S_{\max} afhangt van de diepte is niet duidelijk. Bij de simulatie van de potproeven is een arbitraire keuze gedaan voor een lineair afnemend verloop met de diepte.
- Bij het gebruik van S_{\max} -waarden uit potproeven dient men te bedenken dat deze veelal te hoog zijn voor gebruik bij veldstudies door het aanzienlijke verschil in temperatuur. Bij potproeven wordt vaak gewerkt met een constante temperatuur over de gehele diepte terwijl in het veld de temperatuur afneemt met de diepte.
- Potproeven zoals beschreven door HERKELRATH (1975) zouden, mits in de pot een temperatuurverloop kan worden ingesteld zoals die in het veld voorkomt, veel informatie over de grootte van S_{\max} kunnen verschaffen.

6. DISCUSSIE

Bij de toetsing van het nieuwe model is een vrij arbitrair verloop van S_{\max} als functie van de diepte gekozen. Verder onderzoek naar het verloop van S_{\max} is noodzakelijk omdat hierover in de literatuur nog onvoldoende bekend is. Het onderzoek zou uitgevoerd kunnen worden met behulp van potproeven zoals die ook gedaan zijn

door HERKELRATH (1975). Hij gebruikte potten waarin compartimenten waren gescheiden door horizontale waslagen. De waslagen kunnen wel doorworteld worden, maar zijn ondoorlatend voor water. De opnamesnelheid van de wortels op een bepaalde diepte kan met deze proef nauwkeurig worden bepaald omdat er geen stroming door de bodem plaats vindt. Bij de uitvoering van de proef moet het mogelijk zijn de temperatuur op verschillende waarden in te stellen. De proef heeft alleen zin als het verloop van de temperatuur in de pot overeenkomt met die van de bodem onder veldomstandigheden. De S_{\max} is immers sterk afhankelijk van de temperatuur.

Bij een dergelijke proef zou bovendien kunnen worden onderzocht hoe S_{\max} op een bepaalde diepte afhangt van de aanwezige wortels.

Als dit verband voor een bepaald gewas bekend is kan uit de wortelverdelingsfunctie van het gewas in het veld het verloop van S_{\max} worden bepaald.

LITERATUUR

- AFSHAR, A. and M.A. MARINO, 1978. Model for simulating soil water content considering evapotranspiration. *Hydrol.* 37: 309-322.
- ALLMARAS, R.R., W.W. NELSON and W.B. VOORHEES, 1975. Soybean and corn rooting in SW. Minnesota:
- I. Water uptake sink
 - II. Root distributions and related water inflow. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 764-777.
- ARYA, L.M., G.R. BLAKE and D.A. FARRELL, 1975. A field study of soil water depletion patterns in precense of growing soybean root extraction of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 437-444.
- BAVEL, C.H.M. VAN and J. AHMED, 1976. Dynamic simulation of water depletion in the root zone. *Ecol. Modelling* 2: 189-212.
- BELMANS, C., 1979. Waterstromingen in het systeem bodem-plantatmosfeer: benadering door middel van simulatie. Doctoraal proefschrift. Katholieke Universiteit Leuven.
- BROUWER, R. and P.J.C. KUIPER, 1972. Leerboek der plantenfysiologie 3. Oecofysiologische relaties. Academische paperbacks. A. Oosthoek's, Utrecht.

- DAVIS, C.H., 1940. Absorption of soil moisture by maize roots.
Bot. Gar. 101: 791-805.
- EHLERS, W., 1976. Evapotranspiration and drainage in tilled and
untilled loess soil with winter wheat and sugar beet.
Z. Acker und Pflanzen bau 142: 285-303.
- FEDDES, R.A., 1971. Water, heat and crop growth. Thesis Comm. Agric.
Univ. Wageningen. 71-12, 184 p.
- and P.E. RIJTEMA, 1972. Water withdrawel by plant roots.
J. Hydrol. 17: 33-59.
- , E. BRESLER and S.P. NEUMAN, 1974. Field test of a modified
numerical model for water uptake by root systems. Water
Resour. Res. 10(6): 1199-1206.
- , P.J. KOWALIK and H. ZARADNY, 1978. Simulation of field
water use and crop yield. Simulation monograph. Pudoc,
Wageningen, 189 p.
- FLÜHLER, H., F. RICHARD, K. THALMANN und F. BORER. Einfluss der
Saugspannung auf den Wasser entzug durch die Wurzeln einer
Grasvegetation. Z. Pflanzenern. Bodenk. 6: 583-593.
- GARDNER, W.R., 1960. Dynamic aspects of water availability to plants.
Soil Sci. 84: 63-73.
- GREGORY, P.J., M. McGOWAN and .V. BISCOE, 1978. Water relations of
winter wheat z: Soil water relations. J. Agric. Sci, Comb.
(1978), 91: 103-116.
- HANSEN, G.K., 1974. Resistance to water flow in soil and plant, plant
water status, stomatal resistance and transpiration of Italian
rye grass, as influenced by transpiration demand and soil
water depletion. Acta. Agric. Scand. 24: 83-92.
- HERKELRATH, W.N., 1975. Water uptake by plant roots. Doctoraal
Dissertation. University of Wasconsin, Madison, W.I.
- , F.E. MILLER and W.R. GARDNER, 1977. Water uptake by plants:
I. Divided root experiments
II. The root contact model
Soil Sci. Soc. Am. 41: 1033-1053.
- HONERT, T.H. VAN DEN, 1948. Water transport in plants as catenary
process. Discuss. Faraday Soc. 3: 146-153.

- JORDAN, W.R. and J.T. RITCHIE, 1971. Influence of soil water stress on evaporating root absorption, and internal status of cotton. *Plant Physiol.* (1971) 48: 783-788.
- KEULEN, H. VAN, 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation Monograph Pudoc, Wageningen*, 176 p.
- MOLZ, F.J. and I. REMSON, 1971. Application of an extraction term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agron. J.* 63: 72-77.
- NEWMAN, E.I., 1974. Root and soil water relations. In: *the plant and its Environment* (F.W. Carson, ed.). The University Press of Virginia, Charlottesville, pp. 363-440.
- NNYAMAH, J.U., 1977. Root water uptake in a Douglas fir forest. Thesis University of British Columbia, Vancouver, 154 p.
- REICOSKY, D.C., R.J. MILLINGTON, A. KLUTE and D.B. PETERS, 1972. Patterns of water uptake and root distribution of soybeans in the presence of a water table. *Agron. J.* 64: 292-297.
- D.C. and J.T. RITCHIE, 1976. Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 40: 293-297.
- RICE, R.C., 1975. Diurnal and seasonal soil water uptake and flux within a Bermuda grass root zone. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 394-398.
- SO, H.B., 1978. Water potential gradients and resistance of a soil-root system measured with the root and soil psychrometer. *The soil-root interface symposium, Oxford, England.*
- STONE, L.R., M.L. HORTON and T.C. OLSON, 1973. Water loss from an irrigated sorghum field:
II. Evaporation and root extraction
Agronomy Journal Vol. 65: 495-497.
- , I.D. TEARE, C.D. NICKELL and W.C. MAYAKI, 1976. Soybean root development and soil water depletion. *Agron. J.* 68: 677-680.
- STREBEL, O. M. RENGER und W. GIESEL, 1975. Bestimmung des Wasserentzuges aus dem Boden durch die Pflanzenwurzeln im Gelände als Funktion der Tiefe und der Zeit. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 1:61-72.
- WHISLER, F.D., A. KLUTE and R.J. MILLINGTON, 1968. Analysis of steady state evapotranspiration from a soil column. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32: 167-174.