

V
1563

september 1984

NN31545.1563

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

MODEL SWATRE

Simulatie van de waterbalans van grasland in het
Hupselse beekgebied over de periode 1976 t/m 1982

ir. M. de Graaf

dr. R.A. Feddes

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

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

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

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0072 1288

I N H O U D

	blz.
I. INLEIDING	1
II. BESCHRIJVING MODEL SWATRE	3
III. CALIBRATIE: 1976 t/m 1978	12
III.1. Invoer	12
III.2. Resultaten	14
IV. VERIFICATIE: 1979 t/m 1982	23
V. FLUX DOOR DE ONDERRANDEN VAN RESPECTIEVELIJK HET PROFIEL EN DE WORTELZONE EN DE RELATIE MET DE GRONDWATERSTANDSDIEPTE	30
V.1. Inleiding	30
V.2. Berekening $Q(\phi)$ -relatie	30
V.3. Berekening $Q_r(\phi)$ -relatie	32
VI. LITERATUUR	34

I. INLEIDING

Om de waterbalans van een begroeide grond te kunnen simuleren is door FEDDES, KOWALIK and ZARADNY (1978) het model SWATR (Soil Water Actual TRanspiration) ontwikkeld. Het SWATR model is gebaseerd op de continuïteitsvergelijking voor waterstroming in de onverzadigde zone, waarin de stroomsnelheid wordt beschreven met 'Darcy'. Aan deze continuïteitsvergelijking is een sink term toegevoegd om de wateropname door de plantenwortels te beschrijven. Het model berekent met 24-uurs invoer gegevens de termen van de waterbalans voor een bodemprofiel met maximaal 2 lagen met de grondwaterstand (drukhoogte is nul) als onderrandvoorwaarde.

Een nieuwe versie van het model is ontwikkeld door BELMANS, WESSELING and FEDDES (1983), genaamd SWATRE (Extended). Deze versie past een ander numeriek oplossingschema toe en heeft de mogelijkheid tot het gebruik van verschillende typen randvoorwaarden aan de onderzijde van het systeem (drukhoogte of flux). Het gebruik van de flux, opgelegd danwel berekend, als onderrandvoorwaarde biedt in geval van de aanwezigheid van een verzadigde zone onder andere de mogelijkheid SWATRE te koppelen aan een regionaal verzadigd grondwatermodel. Verder is in SWATRE een alternatieve uitdrukking voor de sink term ingevoerd en kunnen maximaal 5 bodemlagen, die ieder verschillende bodemfysische eigenschappen hebben, worden onderscheiden. Een zeer gedetailleerde beschrijving van het SWATRE model wordt gegeven in hoofdstuk II.

In Nederland zijn bij diverse diensten en instellingen verschillende 1-dimensionale modellen voor de onverzadigde zone ontwikkeld.

Dit betreft onder andere de modellen:

- DEMGEN (DEMAND GENERator), Rijkswaterstaat, Arnhem
- MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water Table).
International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering,
Delft
- ONZAT, Rijksinstituut voor de Volksgezondheid en Milieuhygiëne,
Leidschendam
- SOMOF (SOil MOisture Flow), Waterloopkundig Laboratorium - De
Vorst, Emmeloord.

Afhankelijk van het doel waarvoor bovengenoemde modellen ontwikkeld zijn, zijn verschillende oplossingsmethodieken gebruikt. Tot nu toe is niet duidelijk:

- in hoeverre de werkelijkheid door de modellen betrouwbaar wordt gesimuleerd
- hoe de modellen zich onderling verhouden.

Door de studiegroep Hupselse Beek is het initiatief genomen nader op deze vragen in te gaan. De unieke reeks meetgegevens van het proefgebied Hupselse Beek, die resulteerde uit het verdampingsonderzoek van de vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie van de Landbouwhogeschool gaf hiertoe goede mogelijkheden. Deze reeks betreft alle termen van de waterbalans over de periode 1 maart 1976 tot en met 31 december 1982.

Bovengenoemde modellen en SWATRE zijn gecalibreerd aan meetdata van grasland over de periode 1 maart 1976 tot en met 31 december 1978.

De modellen zijn vervolgens geverifieerd voor de periode 1 januari 1979 tot en met 31 december 1982. De resultaten worden op een CHO-studie-bijeenkomst, getiteld: 'Vergelijking van modellen voor het onverzadigde grondwatersysteem en verdamping,' op 24 oktober 1984 gepresenteerd.

In deze nota worden de simulatie resultaten van het model SWATRE betrekking hebbend op de calibratie fase in hoofdstuk III en op de verificatie fase in hoofdstuk IV besproken.

II. BESCHRIJVING MODEI SWATRE

1. NAAM: SWATRE (Soil Water Actual TRanspiration Extended)

2. LABEL:

- a. Milieu-aspect Transport van water in de onverzadigde zone.
- b. Oorzaak Gradiënten in hydraulische drukhoogte als gevolg van veranderingen:
aan de bovenrand van het systeem - neerslag, bodemevaporatie en evaporatie van interceptiewater;
in het systeem - wateropname door de plantenwortels;
onder aan het systeem - drukhoogte of flux.
- c. Effect Er vindt een herverdeling van vocht plaats waardoor de bodemevaporatie, transpiratie en de drukhoogte aan de onderzijde van het bodemprofiel worden beïnvloed.
- d. Type methode Fysisch-mathematisch procesbeschrijvend model.

3. SAMENVATTING:

Naam	SWATRE
Methode	De waterstroming in een heterogeen bodemsysteem wordt beschreven volgens Darcy en de continuïteitsvergelijking waarin de onttrekking door plantenwortels via een sink-term is opgenomen. De hieruit voortvloeiende partiële differentiaalvergelijking wordt benaderd door een eindige differentievergelijking die met behulp van de boven- en onderrandvoorwaarden voor de afzonderlijke bodemcompartimenten impliciet wordt opgelost volgens het Thomas algoritme.
Invoer	Initiële drukhoogte/vochtgehalte met de diepte Meteorologische gegevens per dag Vochtkarakteristiek en hydraulisch geleidingsvermogen van de diverse bodemlagen Worteldiepte Kritieke waarden van de sink term Flux of drukhoogte aan de onderzijde van het systeem
Uitvoer	Algemene kenmerken van het systeem Verdeling van bodemvocht, drukhoogte, fluxen en wateropname door de wortels met de diepte

	Alle termen van de waterbalans per dag
	Grondwaterstand (indien voorkomend)
Beperkingen	Hysteresis
	Zwel/krimp
Referenties	FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK en H. ZARADNY, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, Simulation Monograph PUDOC, pp. 188
	BELMANS, C., J.G. WESSELING en R.A. FEDDES, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J. Hydrol. 63: 271-286

4. ONDERDEEL NETWERK: Niet van toepassing

5. GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING

a. Algemene inleiding

SWATRE is ontwikkeld op het ICW (Feddes et al., 1978; Belmans et al., 1983) om in detail het watertransport in een heterogeen bodem - plant systeem te simuleren. Het is een algemeen model dat voor een groot scala van toepassingen kan worden aangewend. Het model is algemeen omdat diverse opties in het computerprogramma beschikbaar zijn voor de beschrijving van de randvoorwaarden aan de boven- en onderzijde van het systeem.

Voor wat betreft de bovenrandvoorwaarden dienen 24-hr waarden voor de neerslag, de potentiële bodemevaporatie en potentiële transpiratie te worden ingevoerd. Afhankelijk van de ter beschikking staande gegevens kan een keuze worden gedaan uit verschillende typen verdampingsformules.

Voor wat betreft de onderrandvoorwaarden zijn er de volgende mogelijkheden. Wanneer het bodemsysteem onverzadigd blijft, kunnen worden gebruikt: drukhoogte, flux nul of vrije drainage (hydraulische gradiënt is 1). Wanneer het bodemsysteem gedeeltelijk verzadigd is, kan of de grondwaterstandsdiepte of de flux als input worden opgegeven. Deze flux kan worden opgegeven als 24 hr-input of per tijdstap worden berekend. Hiervoor zijn in het programma 2 mogelijkheden opgenomen: - volgens een bekende flux - grondwaterstand relatie, - volgens een combinatie van fluxen van/naar sloten (infiltratie/drainage) en van/naar de diepe ondergrond (kwel/wegzijging).

Het model kan worden toegepast om allerlei effecten van veranderingen in de waterhuishouding en de bodem op de waterbalans te evalueren. Vooral de koppeling met het open water en verzadigde grondwatersysteem biedt voor simulatie ruime mogelijkheden.

SWATRE is volledig operationeel en wordt voor diverse doeleinden in zowel humiede als ariede gebieden (irrigatiestudies) toegepast.

Het model is in principe voor iedereen beschikbaar.

b. De methode

De basisvergelijkingen voor SWATRE zijn de wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking, welke in dit geval is uitgebreid met een term, die de wateropname door de wortels representeert ('sink'-term). Beide vergelijkingen worden gecombineerd tot de volgende niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking:

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

- waarin h = drukhoogte (cm)
 t = tijd (d)
 C = differentiële vochtcapaciteit (= $d\theta/dh$) (cm⁻¹)
 z = verticale afstand tot het maaiveld, positief in opwaartse richting (cm)
 K = hydraulisch geleidingsvermogen (cm·d⁻¹)
 S = de hoeveelheid bodemvocht, die door de wortels per volume-eenheid van de bodem per eenheid van tijd wordt opgenomen (cm³·cm⁻³·d⁻¹)
 θ = volume vocht per volume bodem (cm³·cm⁻³)

Voor de oplossing van verg. (1) dient de $S(h)$ -functie bekend te zijn. Deze wordt gedefinieerd als (Feddes et al., 1978):

$$S(h) = \alpha(h) S_{\max} \quad (2)$$

waarin $\alpha(h)$ = dimensieloze functie van de drukhoogte

S_{\max} = maximaal mogelijke wateronttrekking door de wortels (d⁻¹)

gedefinieerd als

$$S_{\max} = \frac{T_p}{|z_r|} \quad (3)$$

waarin T_p = potentiële transpiratiesnelheid ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)
 z_r = onderkant wortelzone (cm)

Een alternatieve uitdrukking voor de waarde van S_{\max} is voorgesteld door Hoogland et al. (1981):

$$S_{\max} = a - b|z| \quad (4)$$

waarin a en b constanten zijn.

In de $\alpha(h)$ -functie (Fig. 1) wordt de wateropname door de wortels bij een drukhoogte boven h_1 (punt waar beneden door zuurstofgebrek geen wateropname plaatsvindt) en beneden h_4 (verwelkingspunt) op nul gesteld. Tussen h_2 en h_3 (reductiepunt) is de wateropname maximaal. Tussen h_1 en h_2 is een lineair en van h_3 tot h_4 een lineair danwel een hyperbolisch verloop aangenomen. De waarde van h_3 wordt verder afhankelijk gesteld van de verdampingsvraag van de atmosfeer, en varieert dus met de potentiële transpiratiesnelheid, T_p .

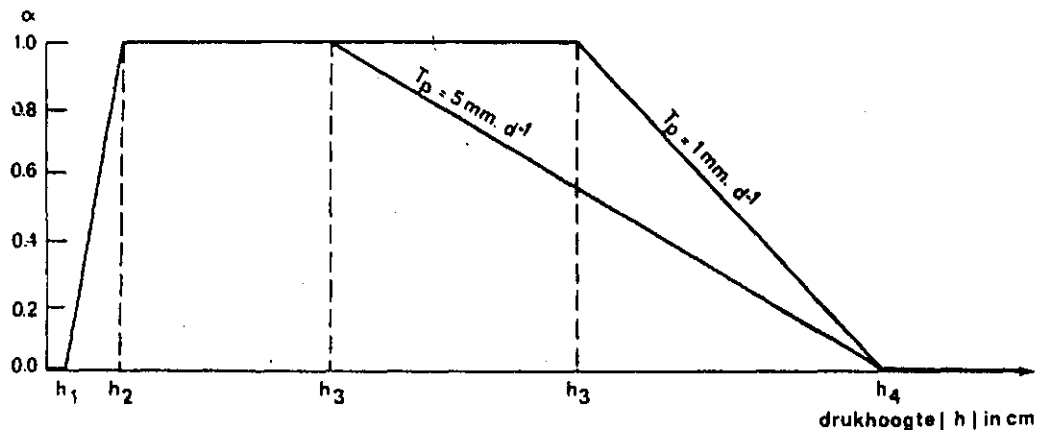


Fig. 1. Het verloop van de dimensieloze sink-term variabele α als functie van de absolute waarde van de drukhoogte van het bodemvocht, $|h|$ (naar Feddes et al., 1978)

Verg. (1) wordt opgelost door middel van een impliciet eindig differentieschema. Het systeem van vergelijkingen voor de afzonderlijke bodemcompartimenten wordt per tijdstap opgelost met behulp van het Thomas (drie-diagonale) algoritme. De tijdstaplengte is variabel en wordt in afhankelijkheid van de verandering van het vochtgehalte vastgesteld volgens:

$$\Delta t^{j+1} = \frac{\Delta\theta_{\max}}{(\Delta\theta/\Delta t)_{\max}^j} \quad (5)$$

waarin j is index voor de tijd t , $\Delta\theta_{\max}$ is een op te geven waarde ($\Delta\theta_{\max} \approx 0,005$, i.e. 0,5 vol.%) en

$$(\Delta\theta/\Delta t)_{\max}^j = \text{Max}_{i=1, \dots, n} S_i^j + |(\Delta q/\Delta z)_i^j| \quad (6)$$

waarin S_i^j is de sink term in compartiment i , q_i^j is de flux door de grens van compartiment i en n is het aantal compartimenten.

Wanneer de flux door de onderrand van het gedeeltelijk verzadigde systeem bekend is, wordt de grondwaterstand door het model op basis van de waterbalans berekend (zie Belmans et al., 1983). Dit biedt goede mogelijkheden tot koppeling met een regionaal verzadigd grondwaterstromingsmodel.

c. Invoer

Eénmalige invoergegevens

Geometrie bodemsysteem: - diepte bodemprofiel

- afstand tussen de knooppunten

- aantal en afgrenzing bodemlagen met verschillende fysische eigenschappen

Fysische eigenschappen - vochtkarakteristiek, $h(\theta)$

per bodemlaag: - hydraulisch geleidingsvermogen, $K(\theta)$

Wateropname door gewas: - keuze van uitdrukking voor S_{\max} , verg. (3) of (4)

- waarden van h_1 t/m h_4 voor vastlegging van $\alpha(h)$ functie (Fig. 1)

- keuze van lineair of hyperbolisch verloop voor $\alpha(h)$ voor het traject h_3-h_4

- Interceptie: - functie van neerslag en graad van bodembedekking
- Tijdstap: - maximaal toegestane lengte
 - maximaal toegestane verandering van het vochtgehalte binnen één tijdstap
 - maximaal toegestane verandering van de grondwaterstandsdiepte binnen één tijdstap (alleen gebruikt indien grondwaterstand wordt berekend)
- Uitvoer: - tijdstippen van gewenste uitvoer
- Beginvoorwaarde: - drukhoogte of vochtgehalte als functie van de diepte
- Gewas: - leaf area index als functie van bodembedekking
 - windfunctie } afhankelijk van gebruik
 - gewasweerstand } verdampingsformule
- Invoergegevens per dag
- Bovenrandvoorwaarde: - neerslag
 - potentiële evapotranspiratie of de meteorologische grootheden die benodigd zijn voor de berekening hiervan volgens b.v. Penman, Rijtema, Priestley en Taylor, of Thom en Oliver
 - bodembedekkingsgraad
 - gewashoogte afhankelijk van type verdampingsformule
- Onderrandvoorwaarde bij onverzadigd systeem: - drukhoogte van het onderste compartiment (bij flux-opties geen aanvullende invoer nodig)
- Onderrandvoorwaarde bij verzadigd systeem volgens vier opties: a) - grondwaterstandsdiepte
 b) - flux vanuit de verzadigde zone - begingrondwaterstand (éénmalig)
 c) fluxberekening volgens Ernst met opgave van:

- open waterpeil
 - drainageweerstand (éénmalig)
 - stijghoogte van diepe grondwater (éénmalig)
 - verticale weerstand van slecht doorlatende laag (éénmalig)
 - begingrondwaterstand (éénmalig)
- d) flux q volgens $q = ae^{b\phi}$, waarin ϕ de diepte van het freatisch vlak is met een eenmalige opgave van:
- constanten a en b
 - begingrondwaterstand

d. Uitvoer

Eénmalig

- gebruikte opties
- geometrie bodemsysteem
- fysische eigenschappen per bodemlaag
- sink term variabelen
- interceptie functie
- tijdstaplengte bepalende grootheden
- potentiële bodemevaporatie en transpiratie per dag

Op gewenste tijdstippen als functie van de diepte:

- vochtgehalte
- drukhoogte
- wateropname door de wortels
- fluxen

Voor iedere dag:

- alle waterbalanstermen
- grondwaterstand (indien voorkomend)

6. BENODIGDE INSPANNING

Het verkrijgen van de invoergegevens en de interpretatie van de uitkomsten vereist agro-hydrologische deskundigheid. Eventueel is laboratorium- en veldonderzoek noodzakelijk.

SWATRE is geschreven in FORTRAN 77 en is geschikt voor computersystemen met een intern geheugen van tenminste 70 K. De benodigde rekentijd is sterk afhankelijk van de grootte van de optre-

dende vochtveranderingen in het profiel, welke worden bepaald door zowel de bodemfysische eigenschappen als de randvoorwaarden opgelegd aan het systeem. Zo bedraagt de rekentijd op een VAX 11/750 systeem voor het simuleren van een volledig kalenderjaar van het Hupselse beek onderzoek maximaal 150 cpu-seconden. Dit wordt met name veroorzaakt door de optredende grote neerslagoverschotten en hoge grondwaterstanden gedurende de eerste en laatste 3 maanden. Voor het simuleren van een groeiseizoen met een geheel onverzadigd bodemprofiel kan de rekentijd een factor 10 minder zijn.

7. AANNAMEN/
BEPERKINGEN

Er wordt geen rekening gehouden met het mogelijk optreden van hysteresis en zwel/krimp.

Voor percelen met evenwijdige ontwaterings/infiltratiemiddelen zijn de resultaten van toepassing midden op het perceel.

8. BETROUWBAARHEID/
GEVOELIGHEID

SWATRE is geverifieerd aan verschillende veldexperimenten met verschillende gewassen op diverse bodemprofielen hetgeen redelijke tot goede resultaten opleverde.

Eveneens zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. De conclusie hiervan is dat de $h(\theta)$ -relatie en de dikte van de wortelzone, en de $K(\theta)$ -relatie van de ondergrond in belangrijke mate bepalend zijn voor de uitkomsten. Wat de sink term betreft geldt dat voor situaties met hoge grondwaterstanden een nauwkeurige definiëring van h_1 en h_2 in Fig. 1 noodzakelijk is. In het algemeen zijn de uitkomsten van het model minder gevoelig voor kleine veranderingen in de h_3 -waarden.

9. RELATIE MET
ANDERE METHODEN

SWATRE kan goed gekoppeld worden met een regionaal verzadigd grondwaterstromingsmodel dan wel met een grondwaterkwaliteitsmodel voor de onverzadigde zone.

Koppeling aan het gewasproductiemodel CROPR waarbij het groeiverloop zelf gegenereerd wordt door het model (SWACRO) is operationeel (Feddes en Wesseling, 1984).

10. VOORBEELDEN VAN
TOEPASSINGEN

SWATRE is tot nu toe gebruikt voor de berekening van:

- werkelijke verdamping
- gewasproductie
- relatie waterhuishouding - gewasopbrengst (HELP)
- effect sub-infiltratie op de gewasopbrengst
- effect bodemverdichting op de opbrengst van aardappelen
- vochtleverend vermogen van gronden in het kader van bodemclassificatie
- waterhuishouding van micro-catchments in ariede gebieden ('water harvesting')

11. ACHTERGROND-
INFORMATIE

BAKEL, P.J.T. VAN en P.E.V. VAN WALSUM Berekening van de effecten van infiltratie op de gewasverdamping in het herinrichtingsgebied, met een aangepaste versie van het model SWATRE. Nota ICW 1434 (1983).

BELMANS, C., J. BOUMA, R.A. FEDDES, J. DE GRAAF, L.W. DEKKER and J.W.M. JEURISSEN. Simulating soil water regimes in the context of land evaluation. EC-Seminar on Soil Survey and Land Evaluation, 26-29 September 1983, Wageningen (1983).

BELMANS, C., J.G. WESSELING and R.A. FEDDES. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J. Hydrol. 63, 3/4: 271-286 (1983).

FEDDES, R.A. Simulation of field water use and crop yield. In: F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (eds.). Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen: 159-174 (1982).

FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARADNY. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen. pp. 189 (1978).

FEDDES, R.A. and J.G. WESSELING. Simulation of water use and dry matter yield of potatoes and summer wheat by the SWACRO-model (in preparation) (1984).

FEDDES, R.A., M. DE GRAAF, J. BOUMA and C.D. VAN LOON. Simulation of potato production as affected by water management and soil compaction (in preparation) (1984).

HOOGLAND, J., C. BELMANS and R.A. FEDDES. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. Acta Hortic. 119: 123-136 (1981).

Instellingen die ervaring hebben opgedaan met SWATRE zijn o.a. Stiboka, Landbouwhogeschool (meerdere vakgroepen), CABO, ITC, Rijks Universiteit Utrecht (Fysische Geografie), Technische Hogeschool Delft (Civiele Techniek), Provinciale Waterstaat Drenthe. Verder wordt het model op diverse plaatsen in het buitenland gebruikt.

III. CALIBRATIE: 1976 t/m 1978

III.1. I n v o e r

Voor de calibratie zijn de volgende 24-uurs waarden van het meteorologisch station Assink gebruikt: neerslag; netto straling; bodemwarmteflux aan maaiveld; luchttemperatuur; luchtvochtigheid en windsnelheid; grondwaterstandsdiepte.

Als diepte voor het bodemprofiel is 200 cm aangehouden, aangezien de laagste grondwaterstand nooit beneden deze diepte kwam. Het bodemprofiel is opgedeeld in 40 compartimenten, zodat de onderlinge afstand tussen de knooppunten 5 cm bedraagt.

De vocht karakteristiek en het hydraulisch geleidingsvermogen van de 4 te onderscheiden bodemlagen zijn ontleend aan WOSTEN e.a. (1983) en weergegeven in respectievelijk fig. 2A en 2B.

Voor de kritieke waarden van de drukhoogte h voor de wateropname van de wortels van het gras (zie fig. 1), is van de volgende waarden uitgegaan: $h_1 = -10$ cm, $h_2 = -25$ cm, $h_3 = -200$ cm (bij $T_p = 5 \text{ mm.d}^{-1}$), $h_3 = -800$ cm (bij $T_p = 1 \text{ mm.d}^{-1}$) en $h_4 = -8000$ cm. De waarden van h_3 benaderen die van TAYLOR et al. (1972). Er is gekozen voor een lineair verloop tussen h_3 en h_4 .

Interceptie en bodemevaporatie zijn niet in beschouwing genomen omdat het verloop van de leaf area index in de tijd niet bekend is.

Als maximale toegestane lengte van de tijdstap is 0,5 d aangehouden. De maximaal toegestane verandering van het vochtgehalte binnen 1 tijdstap $\Delta\theta_{\max} = 0,005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (zie ook verg. 5).

Als initieel vochtgehalteprofiel is evenwicht met de grondwaterstand verondersteld.

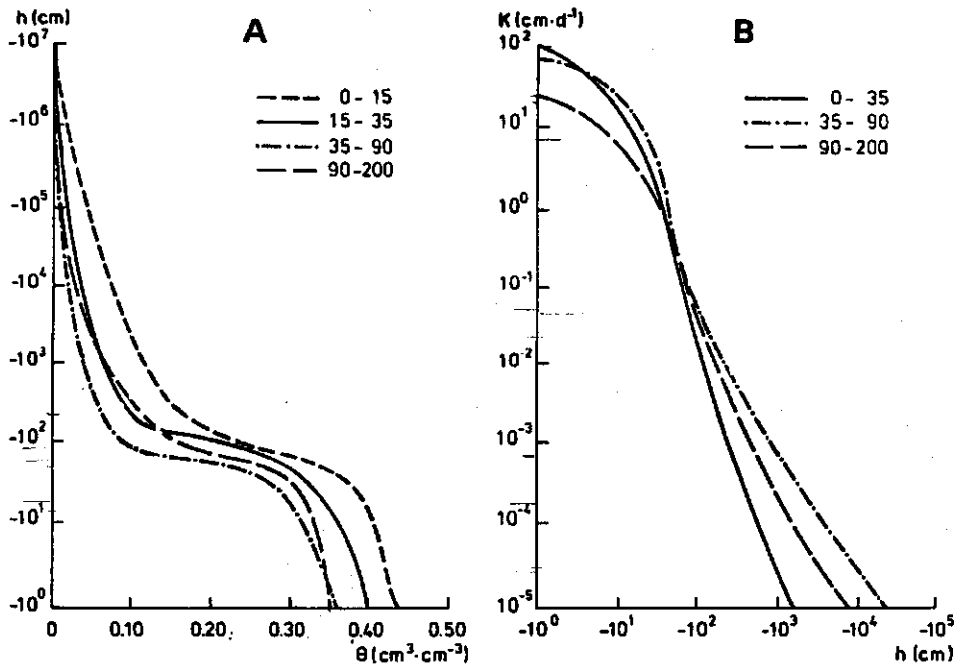


Fig. 2. A: Drukhoogte h als functie van de volumefractie bodemvocht van de bodemlagen 0-15, 15-35, 35-90 en 90-200 cm -maaiveld; B: hydraulisch geleidingsvermogen K als functie van de drukhoogte h (naar WÖSTEN e.a., 1983)

De potentiële evapotranspiratie E_p ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) is berekend volgens THOM en OLIVER (1977):

$$\lambda E_p = \frac{s(Q^* - G) + \rho_v c_p (e_s - e)/r_a}{s + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (7)$$

waarin:

λ = specifieke verdampingswarmte van water: $\lambda = 2.4518 \times 10^6$ (J.kg^{-1})

s = afgeleide van de verzadigingsdampdruk e_s naar de temperatuur: $s = de_s/dT$ (mbar.K^{-1})

Q^* = netto stralingsstroombichtheid (W.m^{-2})

G = bodemwarmte stroomdichtheid (W.m^{-2})

ρ_v = dichtheid van vochtige lucht: $\rho_v = 1.2047$ (kg.m^{-3})

c_p = specifieke warmte bij constante druk: $c_p = 1004$ ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

- e_s = verzadigingsdampdruk (mbar)
 e = dampdruk (mbar)
 r_a = aerodynamische weerstand voor waterdamptransport ($s.m^{-1}$)
 γ = psychrometerconstante: $\gamma = 0,67$ ($mbar.K^{-1}$)
 r_c = gewasweerstand ($s.m^{-1}$)

In verg. (7) luidt de uitdrukking voor r_a voor zowel neutrale als niet-neutrale omstandigheden:

$$r_a = 4,72 \frac{\left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right\}^2}{1 + 0,54 u_2} \quad (s.m^{-1}) \quad (8)$$

waarin:

- z_0 = ruwheidslengte (m)
 u_2 = windsnelheid op 2 meter hoogte ($m.s^{-1}$)

Voor z_0 is de waarde van 0,01 m aangenomen geldend voor het gehele jaar.

Als worteldiepte is 30 cm ingevoerd, aangezien door Stiboka gesteld is dat 80% van de wortels zich binnen een diepte van 25 cm bevindt.

III.2. R e s u l t a t e n

Voor de periode 15 april t/m 15 september is de actuele verdamping λE door STRICKER (1984) bepaald als restterm uit de energiebalans:

$$\lambda E = Q^* - H - G \quad (W.m^{-2}) \quad (9)$$

waarin:

- H = voelbare warmtestroomdichtheid ($W.m^{-2}$)
 G = bodemwarmtestroomdichtheid ($W.m^{-2}$)

G is deels berekend uit bodemtemperatuurprofielen en deels gemeten met warmtestroomplaten. H is berekend uit temperatuurverschillen en windsnelheidsverschillen volgens de profielmethode. Voor de periode 6 september t/m 4 april is de actuele verdamping gelijkgesteld aan de potentiële.

De waterbalans van het bodemprofiel kan over een zekere tijdsperiode worden weergegeven als:

$$\Delta W = IN - UIT \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

waarin:

ΔW = toename van de vochtinhoud van het beschouwde bodemprofiel

IN = infiltratie door het maaiveld I en opwaartse stroming

door de onderrand Q (Q is negatief in geval van uitstroming)

UIT = verdamping E

Verg. (10) luidt dan:

$$\Delta W = I + Q - E \quad (\text{mm}) \quad (11)$$

In het model SWATRE wordt voor deze studie de termen berekend als volgt:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^m \theta_i^{j+1} \Delta z_i^{j+1} - \sum_{i=1}^m \theta_i^j \Delta z_i^j \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

waarin de index i het nummer van het compartiment is, m het aantal compartimenten aangeeft en j een index voor de tijd is.

$$I = P - E_i \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

waarin P is de gemeten neerslag en E_i de interceptieverdamping. E_i is in dit geval gelijk aan nul gesteld.

Q wordt als restterm van de waterbalansvergelijking (11) bepaald.

$$E = \int_0^t \int_{z_r}^0 \alpha(h) S_{\max} dz dt \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

(zie ook verg. 2 t/m 4; fig. 1). Bedenk dat in deze studie de bodem-
evaporatie gelijk aan nul is gesteld en dat de verdamping dus gelijk
is aan de transpiratie T .

Voor de bepaling van de nauwkeurigheid van de uitkomsten van SWATRE zal de berekende verdamping worden vergeleken met de gemeten waarden. In tabel 1 zijn achtereenvolgens de potentiële verdamping, de gemeten verdamping en alle met SWATRE berekende termen van de waterbalans van het gehele profiel voor de 3 zomerhalfjaren weergegeven. De vergelijking tussen de gemeten en berekende verdamping gedurende het winterhalfjaar is niet zinvol omdat in die periode de actuele verdamping telkens gelijk is aan de potentiële verdamping.

Tabel 1. Potentiële verdamping berekend volgens verg. (7) E_p , gemeten verdamping E_{gem} en de volgens SWATRE berekende verdamping E_{ber} , infiltratie I, vochtinhoudsverandering ΔW , opwaartse stroming door de onderrand Q voor het gehele profiel voor de zomerhalfjaren 1976 t/m 1978

Periode	SWATRE							$\frac{E_{gem} - E_{ber}}{E_{gem}} \cdot 100$ %
	E_p	E_{gem}	E_{ber}	I	ΔW	Q		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
31/3-26/9 1976	502	365	361	197	-262	-99	+1	
5/4-1/10 1977	361	357	361	384	-59	-82	-1	
31/3-26/9 1978	371	<381	371	312	-113	-54	+3 (0) *	

* $E_p < E_{gem}$ waaruit volgt $E_{gem} \approx E_p$

Uit tabel 1 volgt duidelijk dat de verschillen tussen E_{gem} en E_{ber} zeer gering zijn. Zelfs voor het droge jaar 1976 waarin een reductie in de verdamping van 137 mm ($E_p - E_{gem}$) optrad, blijkt een goede overeenkomst tussen gemeten en berekende verdamping. Uit vergelijking van E_p en E_{ber} in tabel 1 blijkt, dat in de zomerhalfjaren 1977 en 1978 de verdamping potentieel was. Dit wordt met de berekeningen van SWATRE bevestigd. In het zomerhalfjaar 1978 blijkt dat de potentiële verdamping 10 mm lager ligt dan de gemeten verdamping. Deze fout is te verklaren door de optredende onnauwkeurigheden in de bepaling van zowel de potentiële als de gemeten verdamping.

In fig. 3a, 3b en 3c is achtereenvolgens voor de afzonderlijke jaren 1976, 1977 en 1978 de over decaden gecumuleerde gemeten verdamping en de met SWATRE berekende dag voor dagverdamping weergegeven.

Uit de fig. 3a, 3b en 3c blijkt, dat ook het verloop in de tijd van de cumulatieve berekende verdamping goed overeenkomt met de gemeten verdamping. Verder volgt uit fig. 3a dat in de decaden 10 tot en met 13 van 1976 E_{ber} enigszins groter is dan E_{gem} . Deze afwijking wordt later in het seizoen gecompenseerd.

Om ons eer beeld te vormen van de verschillen die op decadebasis optreden is in fig. 4a, 4b en 4c de 10-daagse som van gemeten en met SWATRE berekende verdamping uitgezet tegen de tijd voor respectievelijk 1976, 1977 en 1978. Bij deze vergelijking dient er op te worden gelet dat in de potentiële verdamping volgens verg. (7) en in de meting van de actuele verdamping via energiebalans en profielmethode (verg. 9), de optredende toevallige fouten relatief groter zijn dan bij een vergelijking op halfjaarlijkse basis.

Uit de fig. 4a, 4b en 4c volgt dat alleen in decade nr. 13 van het jaar 1976 een aanzienlijk verschil optreedt tussen de gemeten en berekende verdamping. De gemeten verdamping bedraagt 28,2 mm, terwijl 12,1 mm werd berekend. Nadere analyse van de afzonderlijk gemeten dagverdamping in relatie tot de dagelijkse potentiële verdamping in de decaden 12 en 13 gaf aanleiding tot onzekerheden omtrent de juistheid van de gemeten dagverdamping in decade 13. Op basis hiervan leek het niet raadzaam veranderingen aan te brengen in de calibratie grootheden zoals bijvoorbeeld in de kritieke waarden van de drukhoogte (fig. 1).

In fig. 5 is op decade basis de met SWATRE berekende verdamping uitgezet tegen de gemeten verdamping voor de periode 1 maart 1976 t/m 25 december 1978. Ook weergegeven is de 45° lijn. In fig. 5 is de al eerder besproken afwijkende decade 13 van het jaar 1976 nog eens aangegeven.

Vervolgens is een lineaire regressie tussen de gemeten en berekende verdamping uitgevoerd. In tabel 2 zijn enige statistische parameters behorende bij deze lineaire regressie vermeld.

Uit de waarde voor de helling van de regressielijn ($a = 0,98$) die de waarde van 1 dicht benadert, de kleine waarde voor het intercept ($b = 0,17$ mm) en de hoge correlatiecoëfficiënt ($r = 0,95$) volgt weer de goede overeenkomst tussen gemeten en berekende waarden.

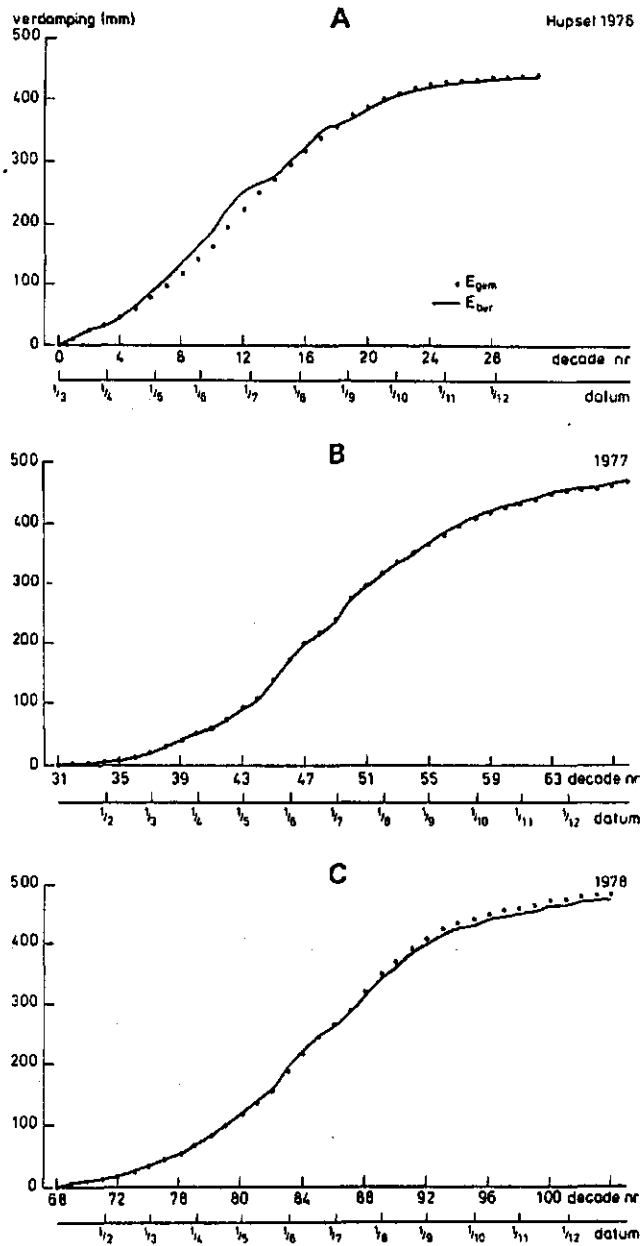


Fig. 3. a. De over decaden gecumuleerde gemeten verdamping E_{gem} en de met SWATRE berekende dag voor dagverdamping E_{ber} gedurende het jaar 1976; b. Als a maar nu voor het jaar 1977; c. Als a maar nu voor het jaar 1978

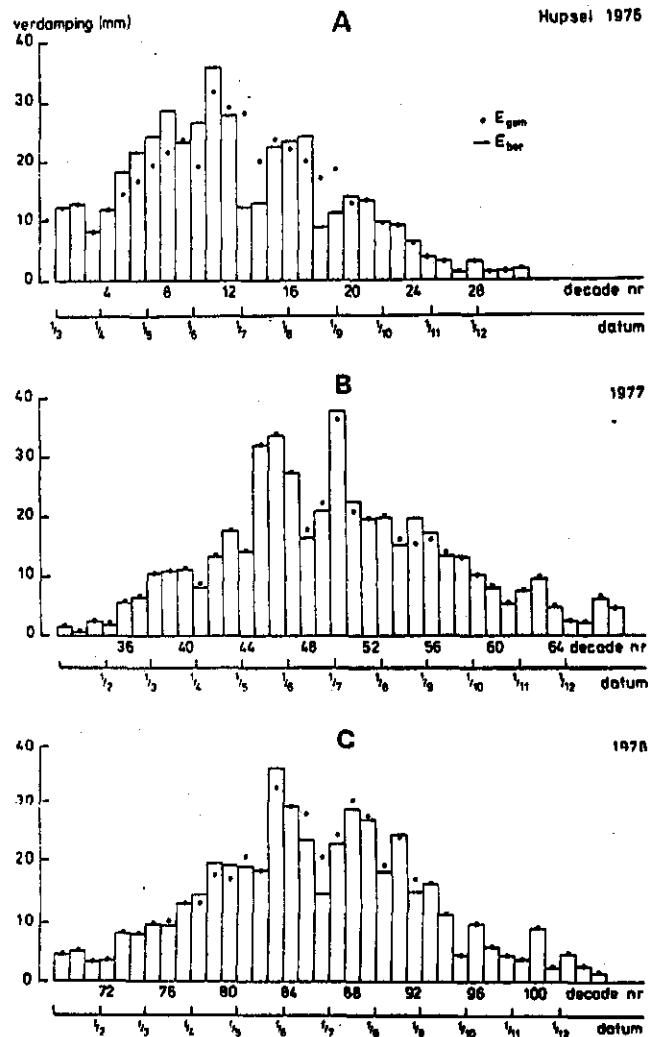


Fig. 4. a. De gemeten verdamping E_{gem} en de met SWATRE berekende verdamping E_{ber} op decadebasis gedurende het jaar 1976; b. Als a maar nu voor het jaar 1977; c. Als a maar nu voor het jaar 1978

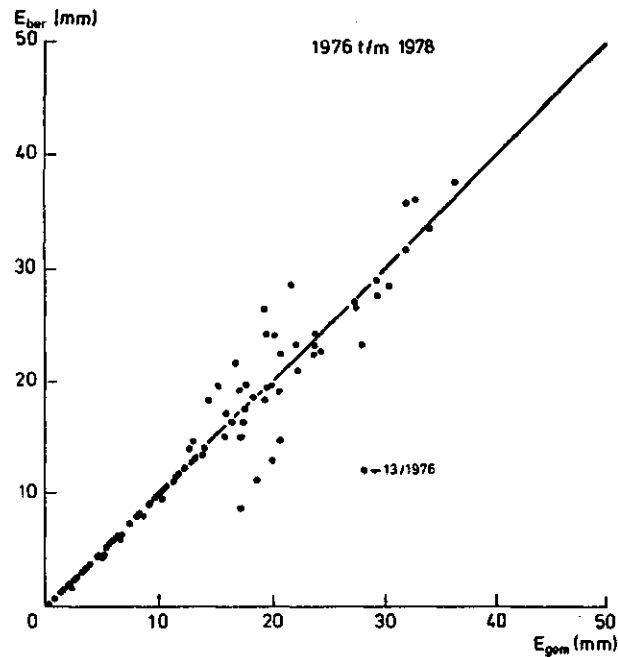


Fig. 5. De met SWATRE berekende verdamping E_{ber} uitgezet tegen de gemeten verdamping E_{gem} op decadebasis voor de periode 1 maart 1976 t/m 25 december 1978

Tabel 2. Lineaire regressie van E_{ber} op E_{gem} op decadebasis over de aaneengesloten periode 1 maart 1976 t/m 25 december 1978

Gemiddelde van E_{gem} (\bar{E}_{gem})	: 13,5 mm
" " E_{ber} (\bar{E}_{ber})	: 13,4 mm
Standaard deviatie van E_{gem} (σ_{gem})	: 8,94 mm
" " " E_{ber} (σ_{ber})	: 9,15 mm
Helling (a)	: 0,98
Intercept (b)	: 0,17 mm
Correlatiecoëfficiënt (r)	: 0,95
Residuele standaardafwijking (σ_r)	: 2,71 mm

De keuze van de ingevoerde worteldiepte van 30 cm wordt nu toegelicht. Volgens de Stiboka bedraagt de worteldiepte voor 80% (!) van de wortels 25 cm. In SWATRE wordt van een uniforme wortelverdeling over de wortelzone uitgegaan. Om niet de invloed van de overige 20%

van de wortels te verwaarlozen, is de worteldiepte met 5 cm vergroot tot een diepte van 30 cm. De invloed van de diepte van de wortelzone op de verdamping in het zomerhalfjaar blijkt uit tabel 3, waarin de berekende verdamping over 31/3 - 26/9/1976 staat vermeld bij invoer van worteldiepten van respectievelijk 25, 30 en 35 cm.

Tabel 3. De berekende verdamping E_{ber} voor de periode 31 maart t/m 26 september 1976 bij invoer van worteldiepten van respectievelijk 25, 30 en 35 cm

	Worteldiepte (cm)		
	25	30	35
E_{ber} (mm)	343	361	388

Tabel 3 maakt duidelijk dat in dit geval een vergroting van de worteldiepte van 25 cm met 5 en 10 cm, een verhoging van de verdamping geeft met respectievelijk 18 (= 5%) en 45 mm (= 13%).

Tot slot wordt in tabel 4 nog een overzicht van de door SWATRE berekende waterbalans van de wortelzone gegeven.

Tabel 4. Termen van de waterbalans voor de wortelzone (30 cm diep) voor de zomerhalfjaren 1976, 1977 en 1978, zoals berekend met SWATRE (ΔW_r is de verandering van de vochtinhoud van de wortelzone, Q_r is de opwaartse stroming door de onderzijde van de wortelzone, i.e. 30 cm -mv)

Periode	E_{ber} (mm)	I (mm)	ΔW_r (mm)	Q_r (mm)
31/3 t/m 26/9 1976	361	197	-56	107
5/4 t/m 1/10 1977	361	384	-20	- 43
31/3 t/m 26/9 1978	371	312	-24	36

De resultaten die vermeld staan in tabel 1 en tabel 4 zijn in fig. 6 schematisch weergegeven.

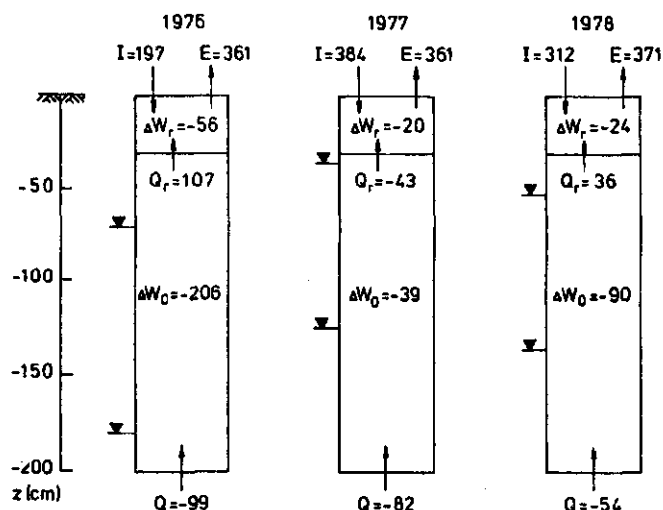


Fig. 6. Schematische weergave van de met SWATRE berekende waterbalans in mm van de wortelzone (0-30 cm) en de ondergrond (30-200 cm) voor de zomerhalfjaren 1976, 1977 en 1978 (ΔW_o is de toename van de vochtinhoud van de ondergrond)

Fig. 6 geeft aanleiding tot de volgende opmerkingen:

- de opwaartse stroming door de onderrand van het profiel is voor de beschouwde zomerhalfjaren telkens negatief. Er is dus sprake van drainage en/of wegzuiging naar diepere lagen. Opmerkelijk is verder dat voor het droge jaar 1976, waarin relatief lage grondwaterstanden optraden, Q het meest negatief is;
- de opwaartse stroming door de onderzijde van de wortelzone Q_r over een periode van t_o tot t_1 kan worden gedefinieerd als:

$$Q_r = \int_{t_o}^{t_1} q_r dt \quad (\text{mm}) \quad (15)$$

waarin q_r is de dagelijkse opwaartse flux ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) door de onderrand van de wortelzone.

In het zomerhalfjaar van 1976 blijkt dat 30% van het verdampte water door capillaire opstijging wordt geleverd en 16% door de wortelzone. Door de grote neerslaghoeveelheid in 1977 is deze opstijging negatief, hetgeen impliceert dat de cumulatieve neerwaartse stroming groter is dan de cumulatieve opwaartse stroming.

- Uit met name het droge zomerhalfjaar 1976 blijkt dat de verandering van de vochtinhoud van de wortelzone slechts in beperkte mate kan bijdragen aan de verdamping. De oorzaak hiervan is de vorm van de vocht karakteristiek in het voor de wateropname van het gewas belangrijke traject alsmede de beperkte worteldiepte.

IV. VERIFICATIE: 1979 t/m 1982

Voor de verificatieperiode 1979 t/m 1982 zijn slechts de meteorologische data en het verloop van de grondwaterstand ter beschikking gesteld. De invoer van de tijdsonafhankelijke grootheden is exact gelijk gehouden aan die van de verificatieperiode.

De uitkomsten van de termen van de waterbalans van het gehele profiel zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5. Potentiële verdamping E_p berekend volgens verg. (7), gemeten verdamping E_{gem} en de volgens SWATRE berekende verdamping E_{ber} , infiltratie I , vochtinhoudsverandering ΔW en opwaartse stroming door de onderrand Q voor het gehele profiel voor de zomerhalfjaren 1979 t/m 1982

Periode	E_p	E_{gem}	SWATRE				Q	$\frac{E_{gem} - E_{ber}}{E_{gem}} \cdot 100$
			E_{ber}	I	ΔW			
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	%	
5/4-1/10 1979	382	<393	382	355	-104	-77	+3 → 0*	
30/3-25/9 1980	411	394	394	410	-63	-80	0	
4/4-30/9 1981	396	<406	396	313	-113	-30	+2 → 0*	
30/3-25/9 1982	441	416	395	238	-244	-89	+5	

* $E_p < E_{gem}$ zodat: $E_{gem} \cong E_p$

Voor de zomerhalfjaren 1979 en 1981 blijkt $E_{gem} > E_p$, hetgeen weer veroorzaakt wordt door toevallige fouten in E_{gem} en/of E_p . Duidelijk is dat in deze zomerhalfjaren het grasland potentieel verdampt. SWATRE berekent dit correct. In het zomerhalfjaar 1980 wordt de optredende reductie in verdamping door SWATRE exact berekend. Voor het zomerhalfjaar 1982 wordt door SWATRE de werkelijke verdamping met 5% onderschat. Door STRICKER (1984, persoonlijke mededeling) is voor de periode 9 juli t/m 15 september 1982 een vergelijking tussen de dagverdamping gemeten volgens de in tabel 5 toegepaste profiel/energiebalans methode (E_H) en die gemeten volgens de Bowen ratio (E_B) methode. Lineaire regressie leverde de volgende relatie op:

$$E_B = 0,987 E_H - 0,109 \quad (\text{mm.d}^{-1}) \quad (16)$$

Indien verg. (16) voor het gehele zomerhalfjaar van 1982 geldig is, zou de actuele verdamping E_{gem} 391 mm bedragen, hetgeen een verschil met de berekende verdamping E_{ber} van slechts -1% betekent. Gezien de verschillen in uitkomsten tussen de 2 berekeningswijzen voor de actuele verdamping, kan worden gesteld dat de berekende verdamping niet significant afwijkt van de gemeten verdamping.

In de fig. 7a, b, c en d is het verloop van de cumulatieve gemeten en berekende verdamping voor de volledige jaren 1979, 1980, 1981 en 1982 met de tijd weergegeven. Voor de eerste 3 jaren is de overeenkomst tussen het verloop van de berekende en gemeten verdamping goed. Voor 1982 treedt een geringe afwijking tussen E_{gem} en E_{ber} op in de decaden 130 en 131. Daarna treedt nagenoeg geen verschil meer op tussen E_{gem} en E_{ber} : het verloop van E_{gem} en E_{ber} is praktisch evenwijdig!

In de fig. 8a, b, c en d zijn de 10-daagse sommen van gemeten en berekende verdamping uitgezet tegen de tijd voor respectievelijk 1979, 1980, 1981 en 1982. Uit fig. 8a en c blijkt dat er geen relevante verschillen tussen E_{gem} en E_{ber} op decadebasis optreden voor de jaren 1979 en 1981 respectievelijk. In fig. 8d is de overeenkomst in decaden 130 en 131 iets minder goed. In decade 49 van het jaar 1980 (zie fig. 8b) treedt wel een significant verschil ($E_{gem} - E_{ber}$) op van -12,3 mm.

Om de oorzaak van dit optredende verschil na te gaan is in tabel 6 de infiltratie, potentiële verdamping, gemeten verdamping en de met SWATRE berekende verdamping voor de decaden 48 t/m 51 weergegeven.

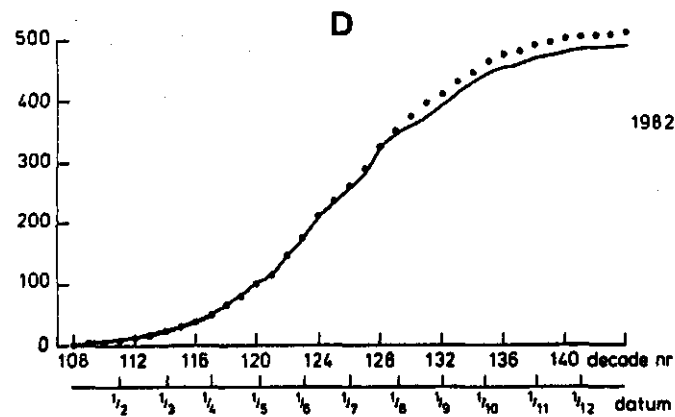
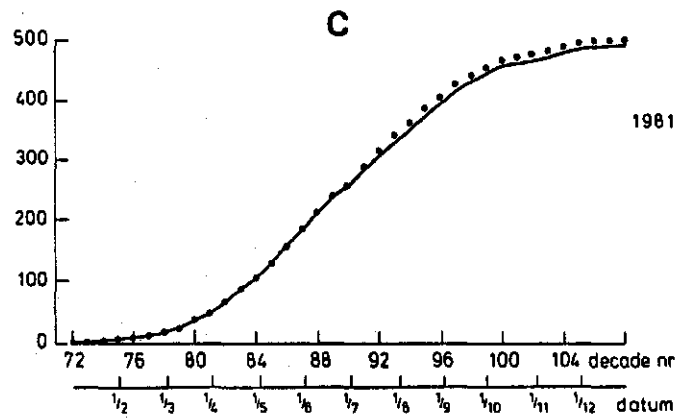
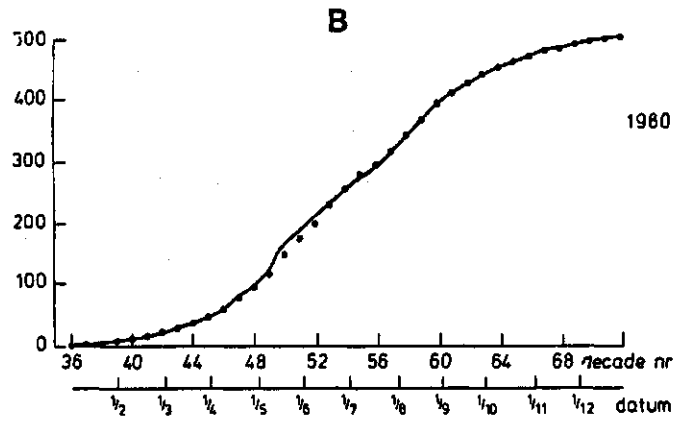
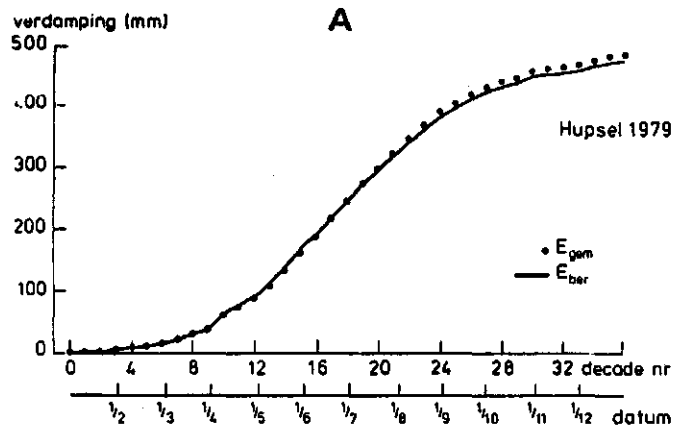


Fig. 7. a. De over decaden gecumuleerde gemeten verdamping E_{gem} en de met SWATRE berekende dag voor dag verdamping E_{ber} gedurende het jaar 1979; b. Als a maar nu voor het jaar 1980; c. Als a maar nu voor het jaar 1981; d. Als a maar nu voor het jaar 1982

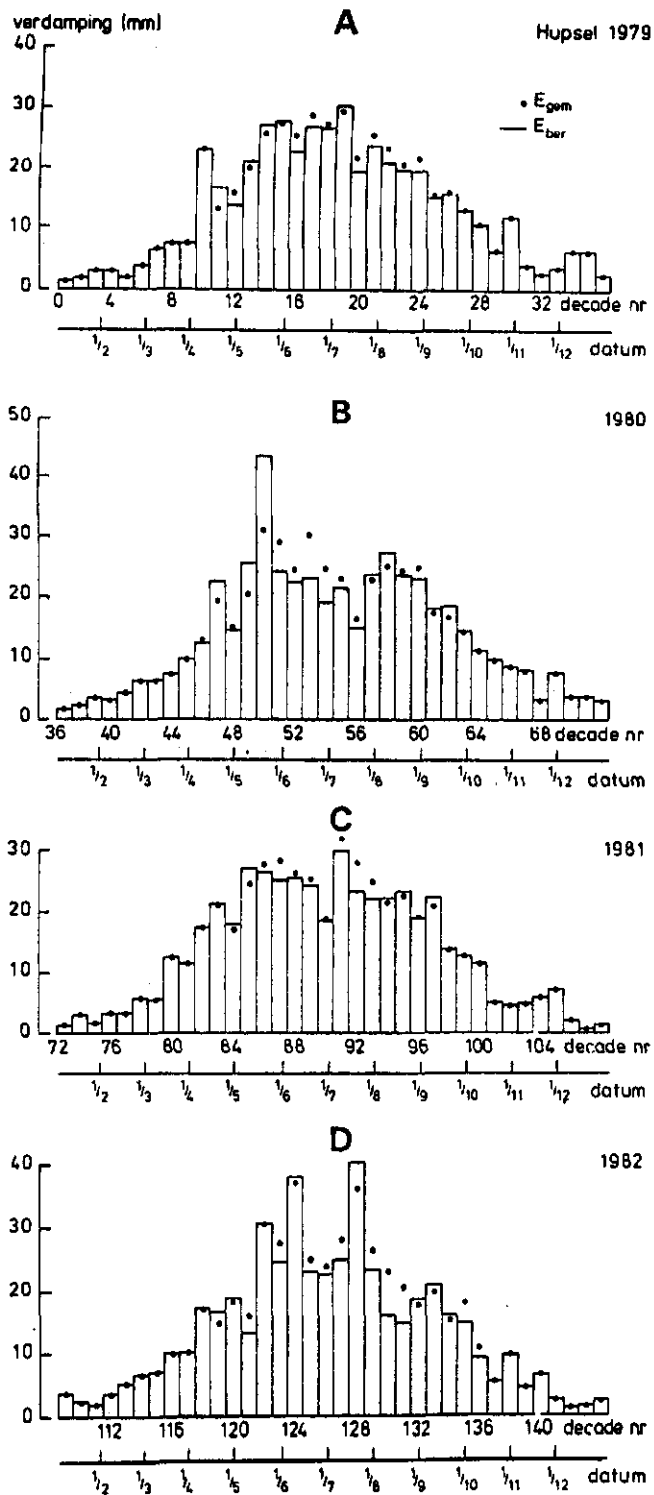


Fig. 8. a. De gemeten verdamping E_{gem} en de met SWATRE berekende verdamping E_{ber} op decadebasis gedurende het jaar 1979; b. Als a maar nu voor het jaar 1980; c. Als a maar nu voor het jaar 1981; d. Als a maar nu voor het jaar 1982

Tabel 6. De infiltratie I, potentiële verdamping E_p , gemeten verdamping E_{gem} en met SWATRE berekende verdamping E_{ber} gecumuleerd weergegeven voor de decaden 48 t/m 51 overeenkomend met de periode 9/4 1980 t/m 18/5 1980

Decade	Periode	I (mm)	E_p (mm)	E_{gem} (mm)	E_{ber} (mm)	$E_{gem} - E_{ber}$ (mm)	$E_p - E_{gem}$ (mm)
48	9/4-18/4 1980	4,1	25,7	20,5	25,7	- 5,2	5,2
49	19/4-23/4 1980	0,0	43,7	31,2	43,5	-12,3	12,5
50	29/4- 8/5 1980	2,0	29,4	29,1	24,2	4,9	0,3
51	9/5-18/5 1980	17,6	23,8	24,5	22,4	2,1	- 0,7

Door het vergelijken van E_p en E_{gem} in tabel 6 volgt, dat in decade 48 een lichte reductie in de verdamping optreedt ($E_{gem} < E_p$). In decade 49 loopt de reductie op tot 29% ($= 1 - E_{gem}/E_p$). In de daaropvolgende decade 50, waarin de neerslag slechts 2 mm bedraagt, is de gemeten verdamping desondanks gelijk aan de potentiële verdamping. Dit kan onmogelijk het gevolg zijn van de neerslag van 2 mm. Terecht kan ons inziens aan E_p en/of E_{gem} in decade 49 worden getwijfeld.

In fig. 9 is de op decadebasis met SWATRE berekende verdamping uitgezet tegen de gemeten verdamping voor de periode 5 januari 1979 t/m 24 december 1982. Bovendien is de 45° lijn weergegeven. Op basis van deze gegevens is een lineaire regressie uitgevoerd. De resultaten hiervan staan in tabel 7.

Tabel 7. Lineaire regressie van E_{ber} op E_{gem} op decadebasis over de periode 5 januari 1979 t/m 24 december 1982

Gemiddelde van E_{gem} (\bar{E}_{gem})	:	13,9 mm
" " E_{ber} (\bar{E}_{ber})	:	13,6 mm
Standaard deviatie van E_{gem} (σ_{gem})	:	9,62 mm
" " " E_{ber} (σ_{ber})	:	9,49 mm
Helling (a)	:	0,96
Intercept (b)	:	0,18 mm
Correlatiecoëfficiënt (r)	:	0,98
Residuele standaardafwijking (σ_r)	:	1,99 mm

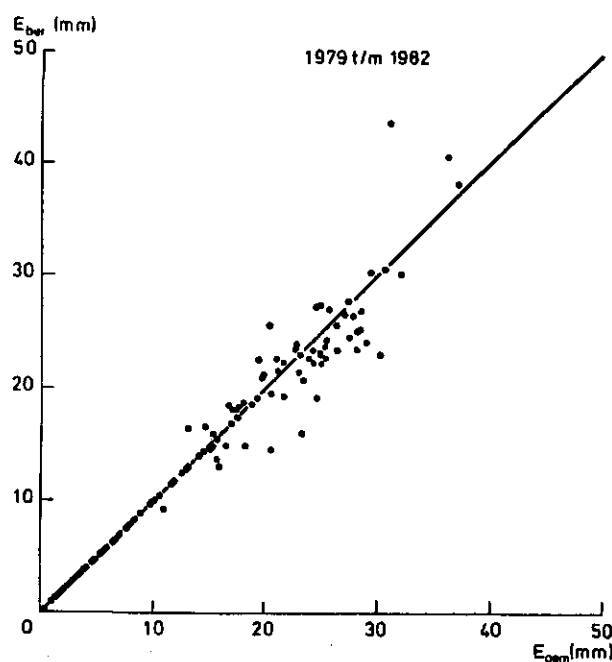


Fig. 9. De met SWATRE berekende verdamping E_{ber} uitgezet tegen de gemeten verdamping E_{gem} op decadebasis voor de periode 5 januari 1979 t/m 24 december 1982

Uit tabel 7 is weer een goede overeenkomst tussen gemeten en berekende waarden af te leiden. Het geringe verschil in helling tussen de regressielijn ($a = 0,96$) en de 45° lijn ($a = 1$) van 0,04 wordt in belangrijke mate veroorzaakt door die decaden waarin $E_{gem} > E_p$ en $E_{ber} = E_p$.

In tabel 8 is een overzicht van de met SWATRE berekende waterbalanstermen van de wortelzone gegeven.

Tabel 8. Termen van de waterbalans voor de wortelzone (30 cm diep) voor de zomerhalfjaren 1979, 1980, 1981 en 1982 zoals berekend met SWATRE

Periode	E_{ber} (mm)	I (mm)	ΔW_r (mm)	Q_r (mm)
4/5-1/10 1979	382	355	-29	- 2
30/3-25/9 1980	394	410	-18	-35
4/4-30/9 1981	396	313	-26	57
30/3-25/9 1982	395	238	-66	91

Indien tabel 8 gecombineerd wordt met tabel 5 kan fig. 10 worden samengesteld, waarin schematisch de waterbalans van zowel de wortelzone als het profiel voor de zomerhalfjaren 1979, 1980, 1981 en 1982 is weergegeven.

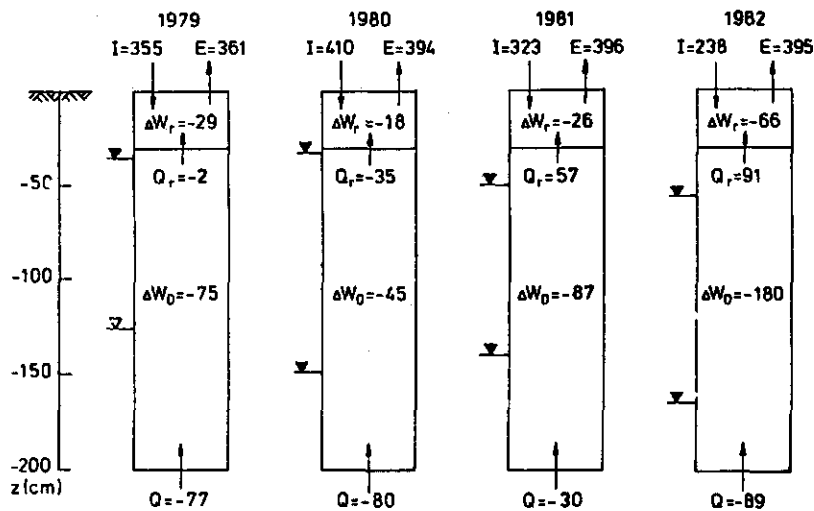


Fig. 10. Schematische weergave van de met SWATRE berekende waterbalans in mm van de wortelzone (0-30 cm) en de ondergrond (30-200 cm) voor de zomerhalfjaren 1979, 1980, 1981 en 1982

Fig. 10 geeft aanleiding tot de volgende opmerkingen:

- de opwaartse stroming door de onderrand van het profiel Q is (net als in fig. 6) voor alle zomerhalfjaren negatief;
- de opwaartse stroming door de onderrand van de wortelzone Q_r vertoont een duidelijk verband met het verdampingsoverschot $E_p - I$;
- in 1982 is de vochttoename van de ondergrond $\Delta W_o = -180$ mm (is dus afname). Ruwweg de helft hiervan gaat naar de wortelzone, de andere helft verdwijnt via drainage/wegzijging.

V. FLUX DOOR DE ONDERRANDEN VAN RESPECTIEVELIJK HET PROFIEL EN DE WORTELZONE EN DE RELATIE MET DE GRONDWATERSTANDSDIEPTE

V.1. I n l e i d i n g

Als onderrandvoorwaarde voor het model SWATRE zijn in zowel de calibratie als de verificatieperiode de dagelijks gemeten grondwaterstanden gebruikt. Indien deze grondwaterstand niet bekend is kan in het model SWATRE met een op te geven flux (Q) - grondwaterstand (ϕ) relatie gerekend worden. De flux door de onderrand van het profiel (Q) is samengesteld uit een flux naar het open water systeem Q_o en een flux naar de diepe ondergrond Q_d :

$$Q = Q_o + Q_d \quad (17)$$

Q_o kan in principe worden vastgesteld met behulp van afvoer/ grondwaterstandsmetingen. Q_o is de afvoer van het gehele gebied dat stroomopwaarts is gelegen. Deze flux wordt vaak gekoppeld aan een soort 'gemiddelde' grondwaterstand in het betreffende gebied.

Voor SWATRE die een 1-dimensionale situatie simuleert in 1 afzonderlijk punt dient in feite de afvoer uit het profiel gekoppeld te worden aan de grondwaterstand in dit punt. De $Q(\phi)$ -relatie geldend voor dit bepaalde punt kan dus afwijken van de $Q(\phi)$ -relatie voor het gehele gebied.

V.2. B e r e k e n i n g $Q(\phi)$ - r e l a t i e

Indien over een periode van bijvoorbeeld 1 jaar dagelijkse grondwaterstanden gemeten zijn, is het ook mogelijk met het model SWATRE zelf de voor het simulatiepunt geldende $Q(\phi)$ -relatie af te leiden.

Als onderrandvoorwaarde worden steeds de gemeten grondwaterstanden in het model ingevoerd. De flux Q door de onderrand wordt in deze optie van SWATRE als restterm uit de waterbalans berekend als:

$$Q = E + W - I \quad (\text{cm}) \quad (18)$$

In fig. 11 is de over 10 dagen gecumuleerde Q voor de periode 30/3 - 26/9 1976 en voor de maanden maart in de jaren 1977 t/m 1982

uitgezet tegen de over 10 dagen gemiddelde grondwaterstand. Voor de periode in 1976 is gekozen omdat de grondwaterstand langzaam maar continu dalend was. In de zomermaanden in de overige jaren veroorzaken lichte schommelingen in de grondwaterstand relatief grote onnauwkeurigheden in de toch al kleine waarde van Q . De wintermaanden oktober t/m februari zijn ongeschikt daar in deze maanden soms lang voortdurende vorstperiodes voorkomen. In fig. 10 is bovendien de $Q(\phi)$ -relatie voor de Achterhoek volgens ERNST en FEDDES (1979) aangegeven.

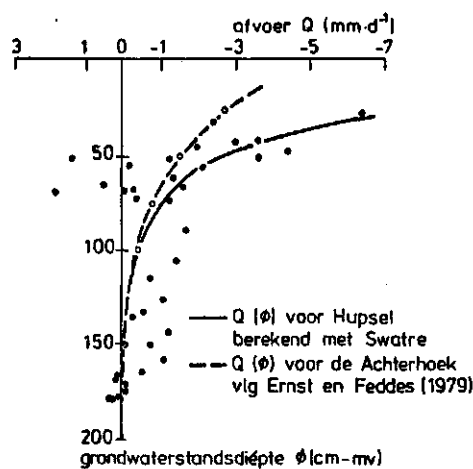


Fig. 11. De over 10 dagen gecumuleerde Q (zie verg. (18)) voor de periode 30/3 - 26/9 1976 en voor de maanden maart in de jaren 1977 t/m 1982, alsmede de $Q(\phi)$ voor de Achterhoek volgens ERNST en FEDDES (1979)

Uit fig. 11 blijkt, dat bij lage grondwaterstanden de $Q(\phi)$ -relatie voor de Achterhoek overeenkomt met de $Q(\phi)$ -relatie die met SWATRE is afgeleid voor het punt in het Hupselse beekgebied.

V.3. Berekening $Q_r(\phi)$ -relatie

In gecompliceerde studies als in het Zuidelijk Peelproject, waarin op regionale schaal de belangen van de verschillende verbruikers van water worden afgewogen, bestaat veelal behoefte aan lineaire hydrologische relaties.

Een voorbeeld hiervan is de relatie tussen de stroming door de onderrand van de wortelzone Q en de grondwaterstandsdiepte (ϕ). Om de geldigheid van een lineaire relatie tussen Q_r en ϕ na te gaan, is voor de putsimulatie in het Hupselse beekgebied, deze relatie bekeken.

In fig. 12 is de over het zomerhalfjaar (april t/m september) gecumuleerde Q_r uitgezet tegen de gemiddelde grondwaterstand ϕ voor de jaren 1976 t/m 1982. Voor de bepaling van de gemiddelde grondwaterstand zijn 2 methoden gebruikt:

- 1) het gemiddelde van alle in het zomerhalfjaar opgetreden dagelijkse grondwaterstanden (in fig. 12 aangegeven met o);
- 2) het gemiddelde van de grondwaterstand op 1 april en 30 september (in fig. 12 aangegeven met +).

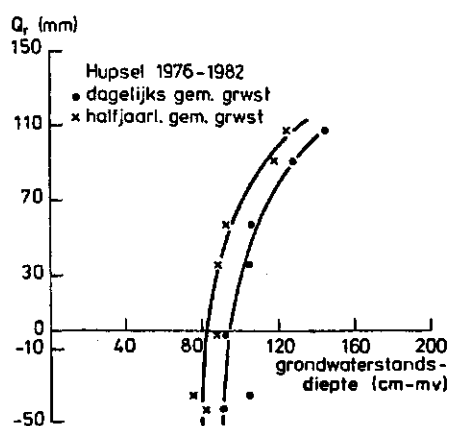


Fig. 12. De over het zomerhalfjaar gecumuleerde Q_r uitgezet tegen de gemiddelde grondwaterstand ϕ voor de jaren 1976 t/m 1982

Uit fig. 12 is af te leiden dat bij beide methoden de correlatie tussen Q_r en ϕ hoog is. Er treedt wel een systematische verschuiving naar rechts op indien de grondwaterstand een gemiddelde is van alle dagelijkse metingen gedurende het groeiseizoen.

Uit fig. 12 volgt duidelijk dat de relatie tussen Q_r en \emptyset niet-lineair is. Tenslotte blijkt dat een diepere grondwaterstand correspondeert met een hogere waarde voor Q_r . Anders gezegd: een diepere grondwaterstand is het gevolg van een grotere capillaire opstijging.

VI. LITERATUUR

- BELMANS, C., J.G. WESSELING and R.A. FEDDES, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, 63, 3/4 : 271-286
- ERNST, L.F. en R.A. FEDDES, 1979. Invloed van grondwateronttrekking voor beregening en drinkwater op de grondwaterstand. ICW nota 1116, Wageningen
- FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARADNY, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs Series. Pudoc, Wageningen
- STRICKER, J.N.M., 1984. Verdampingsonderzoek in de jaren 1976 t/m 1982 te Hupsel (in voorbereiding)
- TAYLOR, S.A. and G.L. ASHCROFT, 1972. *Physical Edaphology: The physics of irrigated and non-irrigated soils*. Freeman, San Francisco CA
- THOM, A.S. and H.R. OLIVER, 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart Journ. Roy. Met. Soc.*, 103: 345-357
- WOSTEN, J.H.M., G.H. STOFFELSEN, J.W.M. JEURISSEN, A.E. VAN HOLST, J. BOLMA, 1983. Proefgebied Hupselse Beek. Regionaal bodemkundig- en bodemfysisch onderzoek. Stiboka-rapport 1706, Wageningen