organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk
onderzoek

TNO

VERGELIJKING VAN MODELLEN VOOR HET ONVERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM EN DE VERDAMPING

Verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst
in samenwerking met de Studiegroep
Hupselse Beek

24 oktober 1984

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO
SERIE: RAPPORTEN EN NOTA'S

model 168

VERGELIJKING VAN MODELLEN VOOR HET ONVERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM EN DE VERDAMPING

Verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst
in samenwerking met de Studiegroep
Hupselse Beek

24 oktober 1984

Samengesteld door J.C. Hooghart

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

Serie: Rapporten en Nota's no. 13

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

4e CHO-STUDIEBIJEENKOMST
in samenwerking met
STUDIEGROEP HUPSELSE BEEK

VERGELIJKING VAN MODELLEN VOOR HET ONVERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM EN DE VERDAMPING

24 oktober 1984

Samengesteld door J.C. Hooghart

Den Haag, maart 1985

Contactadres:

Secretariaatsbureau CHO-TNO,
Postbus 297, 2501 BD DEN HAAG

INHOUD

CONCLUSIES/AANBEVELINGEN i

AUTEURS iii

1. INLEIDING 1
P.M.M. Warmerdam

2. HET STUDIESTROOMGEBIED VAN DE HUPSELSE BEEK 3
P.M.M. Warmerdam
1 Inleiding 3
2 Doelstellingen van het onderzoek in het Hupselse Beekgebied 4
3 Beschrijving van het gebied 5
4 Het meetprogramma 6
5 Gegevens t.b.v. modellen voor onverzadigde grondwaterbeweging 9
6 Enkele conclusies m.b.t. het onderzoek in het Hupselse Beekgebied 10

3. MODELLEN VOOR HET ONVERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM EN DE VERDAMPING 13
R.W.R. Koopmans
1 Inleiding 13
2 Het fysisch systeem 16
3 Numerieke methoden voor de onverzadigde stromingsvergelijking 18
3.1 De eindige differentiemodellen 18
3.2 De "pseudo-stationaire" modellen 22
4 De berekening van de gewasverdamping 25
Literatuur 29

4. GEGEVENS 31
J.N.M. Stricker, W. Jongerius en W.E. van Vuuren
1 Neerslag 31
2 Grondwaterstand 31
3 Potentiele verdamping 32
4 Actuele verdamping 33
5 Bodemvochtcijfers 35

6 Dikte van wortelzone 36
7 Bodemfysische gegevens 36
Referenties 40

5. MODELBESCHRIJVINGEN/CALIBRATIE/BEREKENINGSRESULTATEN 41

A DEMGEN 43
W.E. van Vuuren

B MUST 63
P.J.M. de Laat

C ONZAT 81
G. van Drecht

D SOMOF 93
J.H.A. Driessen en B.H. Gilding

E SWATRE 105
R.A. Feddes en M. de Graaf

F MUST 2
Th.J. van de Nes 119

6. EVALUATIE VAN DE BEREKENINGSRESULTATEN 129
R.W.R. Koopmans
1 Inleiding 129
2 Statistische kenmerken 130
3 Vergelijking van de modeluitkomsten 132
3.1 Actuele verdamping 132
3.2 Verdampingsreductie 134
4 Waterbalans van de wortelzone 139
Samenvatting 139

7. DISCUSSIE 143
samengevat door J.C. Hooghart

8. BIJLAGEN 155

A Programma studiebijeenkomst 156
B Deelnemerslijst studiebijeenkomst 157
C Lijst van gebruikte afkortingen 159

CONCLUSIES/AANBEVELINGEN

4e CHO-studiebijeenkomst in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek: "Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping".

1. De in het kader van deze studiedag met vijf verschillende modellen uitgevoerde puntsimulaties voor het profiel Assink leveren, met name voor de verdamping, vergelijkbare en betrouwbare resultaten op.

2. De beperking bij conclusie 1. is dat het slechts een simulatie van één bodemprofiel betreft. Dit wijst op de wenselijkheid een vergelijking van onverzadigde modellen voor meerdere, bij voorkeur niet-homogene, profielen uit te voeren.

3. Ten behoeve van deze vergelijking werd een stringente onderrand-voorwaarde opgelegd, namelijk de grondwaterstand. Hierdoor kan de interactie tussen het onverzadigde systeem en het grondwater niet worden bestudeerd. Het uitvoeren van een vergelijking van modellen voor de onverzadigde zone gekoppeld aan de verzadigde zone en oppervlaktewater kan deze beperking ondervangen.

4. Voor de bepaling van de verdampingsreductie in de droge zomerperioden zijn vanwege de grote lengte van de tijdstap voor simulatie de pseudo-stationaire modellen in het bijzonder geschikt voor toepassing op regionale schaal en/of voor meerjarige perioden.

5. Indien een gedetailleerde bodemvochtverdeling, -beweging en in de tijd sterk wisselende meteorologische omstandigheden beschreven dienen te worden, verdient het voorkeur om niet-stationaire modellen toe te passen. De onderhavige modelvergelijking geeft geen uitsluitsel in gevallen met diepere grondwaterstand. Nader onderzoek hieromtrent is gewenst.

6. De definitie van de wortelzone en de wijze waarop de wortels in de grond zijn verdeeld dient beter beschreven te worden.

7. Bij toepassing van de modellen verdient onderbouwing van het vaststellen van de bodemfysische parameters meer aandacht te krijgen, dan de beschrijving van de wateropname in het wortelsysteem.

8. Een klein goed bemeten stroomgebied als het Hupselse Beekgebied is onontbeerlijk voor hydrologische modelstudies en modelvergelijkingen.

9. Een belangrijk resultaat van de voorbereidingsactiviteiten ten behoeve van deze vergelijking is dat de betrokken diensten hun inzicht in de modellen en de gesimuleerde fysische processen aanmerkelijk hebben verdiept.
Bovendien werd hiermede het onderlinge contact tussen de onderzoekers/diensten versterkt, waardoor in de toekomst doublures in de werkzaamheden kunnen worden voorkomen.

AUTEURS

G. VAN DRECHT	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne , Leidschendam
R.A. FEDDES	Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen
B.H. GILDING	Waterloopkundig Laboratorium, De Voorst
M. DE GRAAF	Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen
W. JONGERIUS	Landbouw Hogeschool, Wageningen
R.W.R. KOOPMANS	Landbouw Hogeschool, Wageningen
P.J.M. DE LAAT	Internationaal Instituut voor Waterbouwkunde en Milieubeheer, Delft
Th.J. VAN DE NES	Dienst Waterbeheer, Provincie Gelderland, Arnhem
J.N.M. STRICKER	Landbouw Hogeschool, Wageningen
W.E. VAN VUUREN	Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuid-Oost, Arnhem
P.M.M. WARMERDAM	Landbouw Hogeschool, Wageningen

De voorbereidingsgroep van de studiebijeenkomst bestond naast bovengenoemde auteurs uit:

B. WESSELING	Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuid-Oost, Arnhem (secretaris voorbereidingsgroep)
J.C. Hooghart	Secretariaatsbureau van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Den Haag.

TNO

INLEIDING

P.M.M. Warmerdam, voorzitter Studiegroep Hupselse Beek

De studiegroep Hupselse Beek heeft in 1982 het plan opgevat om een studiedag te organiseren betreffende het vergelijken van modellen voor het onverzadigde grondwatersysteem met behulp van de gegevens van het hydrologische onderzoekgebied van de Hupselse Beek.
Aanleiding voor dit initiatief is:

- In de afgelopen jaren zijn door diverse diensten en instituten hydrologische modellen ontwikkeld voor de simulatie van de onverzadigde grondwaterbeweging en verdamping. Deze modellen worden toegepast in landelijke gebieden t.b.v. het waterbeheer.
- Enkele instituten hebben voor de ijking en verificatie van de door hen ontwikkelde modellen verzocht om van de gegevens van het Hupselse Beekgebied gebruik te kunnen maken.
- Mede door het verdampingsonderzoek van de Landbouwhogeschool is een unieke reeks meetgegevens van het Hupselse Beekgebied beschikbaar. Deze reeks betreft alle relevante termen van de waterbalans voor de periode 1 maart 1976 - 31 december 1982.

Doel

Het doel van de studiedag is als volgt geformuleerd:

Het toetsen van de onderlinge vergelijkbaarheid en toepassingsmogelijkheden van de modellen SWATRE, DEMGEN, MUST, ONZAT en SOMOF met behulp van de gegevens van het hydrologische onderzoekgebied van de Hupselse Beek.

Hierbij staat de simulatie van de processen in de onverzadigde zone van het meteoveld bij Assink centraal. De modellen worden geijkt aan de hand van de beschikbare gegevens over de periode 1 maart 1976 tot en met 31 december 1978, terwijl verificatie van de modellen plaats vindt met behulp van de gegevens uit de periode 1 januari 1979 tot en met 31 december 1982.

Het belang van de vergelijking van modellen

Hoewel de belangen van de deelnemende instituten en instellingen enigszins verschillen, staan kennisvermeerdering en het vergroten van het inzicht in de mogelijkheden van de betrokken modellen centraal.

Voorts kunnen de volgende belangen genoemd worden:

- vergelijking van de diverse modelconcepten van de processen in de onverzadigde zone
- meer inzicht verkrijgen in de noodzaak van meer gedetailleerde modellen
- het op een zodanige wijze beschikbaar komen van modelconcepties en inzichten, dat deze tot gesystematiseerde kennis t.b.v. het onderwijs verwerkt worden
- het stimuleren van het gebruik van de verkregen waarnemingsreeksen in het Hupselse Beekgebied
- het opwekken van de interesse van meerdere instituten om in het onderzoek van de Hupselse Beek te participeren.

HET STUDIESTROOMGEBIED VAN DE HUPSELSE BEEK

P.M.M. Warmerdam

1. INLEIDING

Door de commissie ter Bestudering van de Waterbehoefte van de Gelderse Landbouwgrond is van 1961 tot 1967 een hydrologisch onderzoek uitgevoerd in het Leerinkbeekgebied. De doelstelling van deze studie was het bepalen van de waterbehoefte van de landbouw in dit gebied. In 1968 werd besloten het hydrologisch onderzoek, in een andere samenstelling en met andere doelstellingen voort te zetten in een kleiner gebied. Om diverse redenen werd gekozen voor het bovenstroomse deel van de Leerinkbeek, het Hupselse Beekgebied. Dit gebied werd opgezet als een "representative basin" en bij UNESCO ingediend als een Nederlandse bijdrage van de IHD, thans IHP.

De IHD, ingesteld door UNESCO, beoogt de bevordering van internationale samenwerking in hydrologisch onderzoek en onderwijs en de uitwisseling van onderzoeksresultaten. De achterliggende gedachte hiervan is dat alle landen in staat gesteld moeten worden om, met het oog op het toenemend watergebruik door landbouw, bevolking en industrie, een rationeler beheer van het water te kunnen uitoefenen. Een van de onderdelen van het programma van de IHP houdt in het bevorderen en verbeteren van het hydrologisch onderzoek in zogenaamde "representative" en "experimental basins".

De kringloop van het water is een dynamisch systeem dat zich afspeelt in de compartimenten lucht, bodem en water. De circulatie van het water varieërt van plaats tot plaats en de kwantificering ervan vindt plaats in een waterbalans van een begrensd gebied. De hydrologische eigenschappen, de geologische gesteldheid en het landgebruik bepalen hoe de neerslag verdeeld wordt over verdamping, afvoer en berging. Om de kennis van hydrologische processen in stroomgebieden te vergroten is het onontbeerlijk dat voldoende gegevens van hoge kwaliteit worden verzameld. Slechts dan kan de interpretatie van deze gegevens leiden tot een dieper inzicht van de werking van het hydrologische systeem. Alleen in een klein studiestroomgebied, zoals het Hupselse Beekgebied, kan de vereiste volledigheid en nauwkeurigheid in een systeem van verwerving en verwerking van de hydrologische gegevens worden bereikt. Het gebeuren in grote stroomgebieden is in beginsel gelijk aan dat van een klein stroomgebied

zodat ook daar de kennis van hydrologische processen zoals die in een klein studiegebied is verworven tot inzicht kan leiden.

Representative stroomgebieden zijn gebieden welke in hydrologisch opzicht kenmerkend zijn voor een groter gebied. Van het Hupselse Beekgebied wordt aangenomen dat het representatief is voor de hoge dekzand gronden in het oosten en zuiden van ons land. Echter de in het studiestroomgebied verkregen fysische kennis van de hydrologische processen is uiteraard ook in andere typen van gebieden bruikbaar.

Tot voor kort richtte het meetprogramma in het Hupselse Beekgebied zich alleen op het kwantitatieve onderzoek van hydrologische processen. In 1983 is een aanvang gemaakt met metingen van kwalitatieve parameters van het oppervlakte- en grondwater. Het hydrologisch onderzoek van het Hupselse Beekgebied is een gezamelijk project van de Rijkswaterstaat district Zuid-Oost, de Dienst Waterbeheer van de Provinciale Waterstaat van Gelderland en de vakgroepen Hydraulica en Afvoerhydrologie en Cultuurtechniek van de Landbouwhogeschool. De studiegroep Hupselse Beek, welke bestaat uit vertegenwoordigers van bovenstaande instellingen, heeft in 1982 het initiatief genomen om op basis van de unieke reeks van meetgegevens van het Hupselse Beekgebied een aantal modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem te vergelijken.

2. DOELSTELLINGEN VAN HET ONDERZOEK IN HET HUPSELSE BEEKGEBIED.

De activiteiten van de studiegroep Hupselse Beek hebben naast het verzamelen van reeksen nauwkeurige gegevens in het Hupselse Beekgebied de volgende doelstellingen:

- het vergroten en verdiepen van de kennis van de hydrologische processen door veld- en modelstudies.
- het ontwikkelen en testen van modellen en het testen van bestaande en nieuwe onderzoektechnieken.
- het testen van bestaande of nieuw-ontwikkelde meet- en verwerkingsapparatuur.
- de opleiding van hydrologen door studenten ervaring te laten opdoen met veldmetingen en veldonderzoek alsmede kennis te laten nemen van hydrometeorologische apparatuur. Voorts het verwerken van gegevens in

modellen om studenten vaardigheden te laten verwerven in het ontwikkelen van- en werken met modellen.
- het opbouwen en in stand houden van kennis ten aanzien van de hydrologie en de waterhuishouding.
- het ontwikkelen van nieuwe inzichten en methodieken om de problemen met betrekking tot de waterhuishouding in andere gebieden en omstandigheden op te kunnen lossen.
- het bevorderen van het hydrologisch onderzoek in ons land.

3. BESCHRIJVING VAN HET GEBIED

Het Hupselse Beekgebied beslaat een oppervlakte van 650 ha. en is gelegen tussen Groenlo en Eibergen en de Duits-Nederlandse grens. De hoogte varieërt van 33 tot 24 meter boven gemiddeld zeeniveau. De gemiddelde helling van het gebied is $8^{o}/oo$. De beek bevindt zich in een breed dal, waar de helling plaatselijk groter kan zijn. De Hupselse Beek heeft een lengte van 4 km., waarop 7 zijbeken met lengten van 300 tot 1500 meter uitmonden.

De gemiddelde helling van de Hupselse Beek is $2^{o}/oo$, welke ter voorkoming van erosie door een vijftal houten overstorten wordt teruggebracht tot $1^{o}/oo$.

Van het gebied is ca. 80% bedekt met gras, 12% is bouwland, terwijl 8% met bos is bedekt.

In het gebied komen twee niveaus van gering waterdoorlatend vermogen voor, te weten: een dik pakket Miocene klei en keileem van geringe dikte. Het Mioceen dat uit fijnzandige blauw-zwarte klei van mariene oorsprong bestaat komt in het oosten tot dicht onder het oppervlak voor en helt in westelijke richting tot een diepte van 10 meter. Over het Mioceen is in het midden Pleistoceen fluviatiel materiaal afgezet, behorend tot de formatie van Sterksel, Enschede. Het komt vooral voor in het noord-westen van het gebied. De keileem die op diepten van 0.40 tot 1.50 meter wordt aangetroffen is in het Saalien gevormd en plaatselijk door smeltwaterafvoer weggeërodeerd. In het Weichselien, onder koude en droge omstandigheden is er dekzand over grote delen van het gebied afgezet.

In het Hupselse Beekgebied komen voornamelijk veldpolzol- en gooreerdgronden voor. De veldpodzolgronden zijn humuspodzolgronden, waarvan de A1-horizont minder dan 30 cm. dik is en uit leemarm en zwak lemig fijn zand bestaat. Plaatselijk komt er veel grind en grof zand in voor. De veldpodzolgronden beslaan het grootste deel van het gebied.

De gooreerdgronden hebben een humeuze bovengrond van 15 tot 30 cm. dikte, terwijl een B-horizont ontbreekt. De bovengrond bestaat uit zwak lemig fijn zand op een weinig gekleurde ondergrond. Komt er op geringe diepte klei voor, dan kan het leemgehalte hoger zijn.

Op enkele plaatsen komen keileem of oude kleigronden voor met een 15 tot 25 cm. dikke minerale eerdlaag.

Het waterbergend vermogen verschilt in het gebied aanzienlijk door ondiepe storende lagen (keileem en mioceen). De berging hangt nauw samen met de bodemgesteldheid en de grondwaterdiepte. De bergingscoëfficiënt μ varieërt bij een grondwaterstandsverlaging van 0 tot 50 cm. van 0.02 tot 0.07; bij een verlaging van 50 tot 100 cm. beneden maaiveld van 0.07 tot 0.15. De kD-waarde varieërt van ca. 10 m^2/dag in het oosten tot 350 m^2/dag in het noord-westen.

4. HET MEETPROGRAMMA

In de periode van 1968 tot 1975 hebben de waarnemingen in het Hupselse Beekgebied vooral betrekking gehad op neerslag, afvoer, grondwater en netto straling. In het begin van de zeventiger jaren werd bij het onderzoek naar neerslag-afvoerrelaties in toenemende mate de noodzaak ingezien om naast de reeksen van neerslag en afvoer ook reeksen van de potentiële en actuele verdamping ter beschikking te hebben. Daartoe is in 1975 op het meteoterrein in Hupsel een mast van drie meter hoogte geplaatst met temperatuurvoelers op drie niveaus, namelijk 0.10, 1.50 en 3.00 meter boven het maaiveld. Deze temperatuurvoelers, halfgeleiders met een hoge resolutie en een lineair respons, bereikten een nauwkeurigheid van $\pm$ 0.18 K. Ook zijn in 1975 temperatuurvoelers op verschillende niveaus beneden het maaiveld aangebracht om het temperatuurverloop in de

in de bodem te meten. Voorts werd de bestaande apparatuur voor het meten van windsnelheid en luchtvochtigheid uitgebreid. De registratie van de waarnemingen met intervallen van 15 minuten is eveneens in 1975 verder geautomatiseerd door een 30-kanaals meerpuntsregistratie-systeem met registratie op cassette-tape. De gegevens welke met bovengenoemde meetapparatuur vanaf het begin van 1976 werden verzameld maakten het mogelijk om de actuele verdamping indirekt te bepalen uit de voelbare warmtestroom in de grenslaag tot drie meter boven maaiveld en de energiebalans.

In 1979 is het meetprogramma ten behoeve van het verdampingsonderzoek aanzienlijk uitgebreid. Daarbij behoort ook de installatie van een nieuwe hogere meetmast om temperatuur-, wind en luchtvochtigheidsprofielen in de grenslaag tot tien meter te meten. De micro-meteoreologische apparatuur wordt, althans in het groeiseizoen, regelmatig gecalibreerd.

In tabel 1 is een overzicht gegeven van het meetprogramma zoals dat met ingang van 1979 wordt uitgevoerd. In de tabel zijn tevens de perioden aangegeven waarover de gegevens beschikbaar zijn.

Per jaar worden zo'n 700.000 gegevens van het Hupselse Beekgebied door de Rijkswaterstaat en de vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie verzameld en bewerkt. Voor een dergelijk omvangrijke gegevenstroom is een goede organisatie onontbeerlijk om de kwaliteit van de gegevens te waarborgen. Het verzamelen van de gegevens en de bewerking, dat de foutencontrole, de conversie en correctie van gegevens omvat is tijdrovend, maar onvermijdelijk voor een empirische wetenschap als de hydrologie.

COMPONENT	MEASUREMENT	TYPE OF INSTRUMENTATION	INTERVAL (RANGE)	DATA COLLECTION	NUMBER OF SITES	DATA AVAILABLE	UNITS
Soil moisture	neutron probe	N.E.A.	2 weeks	form	6	1975-1983	mm
Runoff	water level	HL-flumes, V-Romijn	15 minutes	punched tape	3	1969-1983	mm/hr mm/day
Precipitation	ground level gauges + 40 cm level gauges	several recording and non-recording gauges	15 minutes, hourly	cassette tape, form	3	1969-1983	mm/hr, mm/day
Groundwater	groundwater wells	perforated tubes	15 minutes, 4 times a year	cassette tape, form	130	1969-1983	m NAP
Net radiation balance	net radiation	CSIRO net radiometer	20 minutes	cassette tape	1	1975-1983	W/m^2
	global radiation	Kipp-solarimeter	20 minutes	cassette tape	1	1979-1983	W/m^2
	sunshine duration	Haenni, Campbell Stokes	20 minutes, hourly	cassette tape, sheet	1	1972-1983	LRS
	short wave reflection	Kipp-solarimeter	20 minutes	cassette tape	1	1982-1983	W/m^2
Soil heat flux	soil temperature (6 levels)	Thermistors	20 minutes	cassette tape	1	1976-1981	^oC
	flux plates (3)	T.P.D.-Delft	20 minutes	cassette tape	1	1981-1983	W/m^2
Sensible heat flux	dry bulb temperature (3 levels)	Semi-conductor, TFDL Wageningen	20 minutes	cassette tape	1	1979-1983	^oC
	surface temperature	Heimann-kT16	20 minutes (3 months)	cassette tape	1	1979-1983	^oC
	wind velocity (3 levels)	cup anemometers (K.N.M.I.) Lambrecht	20 minutes hourly	cassette tape graphical chart	1 1	1979-1983 1969-1983	m/sec m/sec
Evapotranspiration	wet bulb temperature (3 levels)	semi-conductors, TFDL Wageningen	20 minutes (6 months)	cassette tape	1	1979-1983	^oC
	relative humidity	hair hygrometer Lambrecht	20 minutes	cassette tape	1	1976-1983	%
	wind direction	wind vane, Lambrecht wind vane, Lambrecht	20 minutes hourly	cassette tape graphical chart	1 1	1979-1983 1969-1983	- -
	temperature relative humidity air pressure	thermo-hygrobarograph	hourly	graphical chart	1	1969-1983	^oC, %, mbar

Tabel 1: Meetprogramma en beschikbaarheid van gegevens van het Hupselse Beekgebied (1984).

5. GEGEVENS T.B.V. MODELLEN VOOR ONVERZADIGDE GRONDWATERBEWEGING

Voor de vergelijking van de modellen welke de onverzadigde grondwaterstroming simuleren zijn gegevens verstrekt voor de calibratie van de modellen over de periode 1976 tot en met 1978.
In tabel 2 zijn de variabelen gegeven waarvan gegevens beschikbaar zijn gesteld op magnetische band.

Tabel 2: Gegevens over de periode 1976 t/m 1978 van het meteoveld te Hupsel t.b.v. de calibratie van de modellen.

Grondwaterstand Assink-weiland	cm-mv
Neerslag	mm/dag
Luchttemperatuur	^{o}C, gemiddeld per dag
Relatieve luchtvochtigheid	%
Windsnelheid	m/sec
Nettostraling	Joules/cm^2 per dag
Bodemwarmte	Joules/cm^2 per dag
Potentiële verdamping	mm/dag
Actuele verdamping	mm/dag
Bodemvocht	mm

De afvoer van het stroomgebied, welke gemeten wordt met behulp van een H-flume in meetpunt 10A zijn eveneens verstrekt in l per sec en mm per dag.

Ten behoeve van de modelberekeningen zijn in het Hupselse Beekgebied bodemfysische karakteristieken bepaald, waarmee een voor modelstudies goed bruikbare bodemfysische kaart van het gebied is samengesteld. Op het meteoveld zijn van de wortelzone (25 cm) en van de ondergrond pF curven en k-$h_p$relaties bepaald. Hieruit zijn pF en $k(h_p)$ waarden bepaald van vier horizonten volgens onderstaand schema:

Horizont		
A_1	0-15 cm	(pF)
B_2	15-35 cm	pF en $k(h_p)$
C_{11}	35-90 cm	"
C_{12}	90- cm	"

De modellen worden geverifieerd over de periode 1979-1982. Hiertoe zijn gegevens van dezelfde variabelen als vermeld in tabel 2 ter beschikking gesteld, behoudens de gegevens van de actuele verdamping en van het bodemvocht. Deze worden door de modellen zelf berekend en worden gebruikt voor de vergelijking van de modelresultaten.

6. ENKELE CONCLUSIES M.B.T. HET ONDERZOEK IN HET HUPSELSE BEEKGEBIED

- Het onderzoek in het Hupselse Beekgebied levert reeksen van hydrologische gegevens van hoge kwaliteit, welke onontbeerlijk zijn voor hydrologisch onderzoek;
- De kennis en het inzicht welke verkregen zijn uit studies van dit gebied, alsmede de beschikbare reeksen van gegevens bieden de mogelijkheid om bestaande en nieuwe hydrologische modellen te testen;
- Het onderzoek heeft sterk bijgedragen tot een vergroting en verdieping van het inzicht in de hydrologische concepten, de bruikbaarheid en de toepasbaarheid van enkele hydrologische modellen. Dit waarborgt een betere kwaliteit van adviezen en voor oplossingen van vragen m.b.t. het waterbeheer;
- Er is een goed inzicht verkregen in de toepasbaarheid en de beperkingen van het model DEMGEN als onderdeel van de waterhuishoudkundige planvorming;
- Het onderzoek in Hupsel heeft een dieper inzicht gegeven in de verdeling van de neerslag over verdamping en afvoer;
- Er is een goed inzicht verkregen in de nauwkeurigheid van meten van meteorologische en hydrologische variabelen, alsmede van het bepalen van bodemfysische factoren;
- Door de stroom aan gegevens van het Hupselse Beekgebied is er een grote ervaring opgedaan met het be- en verwerken van gegevens en de automatisering daarvan;
- Het onderzoek in het Hupselse Beekgebied is van belang geweest voor het standaardiseren van meet- en registratie-apparatuur en van bewerkingsprocedures;
- De kwantitatieve kennis van het Hupselse Beekgebied biedt grote voordelen voor het opzetten en uitvoeren van nieuw onderzoek, zoals de transportprocessen van meegevoerde stoffen in samenhang met de hydrologische eigenschappen;

- Het Hupselse Beekgebied levert een belangrijke bijdrage aan de opleiding van hydrologen, niet alleen door de veldpractica en het verwerken van gegevens in doctoraalstudies, maar ook intern van de participerende instellingen;
- Het Hupselse Beekgebied speelt een belangrijke functie in de bevordering van het hydrologisch onderzoek in ons land, alsmede van de internationale contacten;
- Het Hupselse Beekgebied bevordert de integratie van hydrologisch onderzoek en de samenwerking tussen instituten en instellingen op het terrein van de hydrologie;
- De hydrologie is een jonge wetenschap die nog volop in ontwikkeling is en waarvoor experimenteel onderzoek noodzakelijk is. Door de maatschappelijke ontwikkelingen zullen zich op het terrein van het waterbeheer voortdurend nieuwe probleemvelden voordoen waartoe modellen zullen worden aangepast dan wel nieuwe ontwikkeld worden. Zowel voor de onderbouwing van de voortgang van de hydrologie door het experiment als voor het toetsen van nieuwe modelontwikkelingen in het waterbeheer is de beschikbaarheid van een klein overzichtelijk gebied, als het Hupselse Beekgebied waarin het hele hydrologische systeem goed en over voldoend lange periode is bemeten, onontbeerlijk.

MODELLEN VOOR HET ONVERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM EN DE VERDAMPING

R.W.R. Koopmans

1. Inleiding

Als onderdeel van het regionale waterbeheer en als instrument om de invloed van bijvoorbeeld cultuurtechnische- en civieltechnische werken te voorspellen vormen modellen tegenwoordig een belangrijk hulpmiddel. Bij waterontrekkingen of lozingen, in het bijzonder wanneer deze gepaard gaan met de problematiek van verontreiniging, worden grondwatermodellen veelvuldig gebruikt. Regionale grondwatermodellen incorporeren zowel verzadigde als onverzadigde stroming. Over de plaats en toepassing van modellen in het waterbeheer is een uitvoerig overzicht gegeven door VAN DE NES (1976).
In dit bestek wordt alleen aandacht geschonken aan modellen die ontworpen zijn voor de simulatie van onverzadigde waterbeweging in de bodem. Voorts beperken we ons tot de numerieke modellen, dat zijn modellen die met behulp van wiskundige numerieke methoden vergelijkingen oplossen die het dynamische proces beschrijven. Andere soorten modellen, zoals bijvoorbeeld schaalmodellen en analoge modellen komen nu niet ter sprake.

De simulatie van stroming door de onverzadigde zone, tussen freatisch vlak en met gewas begroeid maaiveld, kent twee hoofdproblemen.
Het eerste probleem is van wiskundige en rekentechnische aard, en wordt veroorzaakt doordat het natuurlijke systeem niet lineair is. In Nederland is de simulatie van stroming in de onverzadigde zone alléén, meestal niet een hoofddoelstelling, maar gaat het om de gecombineerde oplossing van de stroming zowel boven als onder het freatisch vlak. En het is nu juist het sterk niet lineaire karakter van het systeem nabij de grondwaterspiegel, dat voor grote problemen zorgt. Het wordt vnl. veroorzaakt doordat het bergingsvermogen vlak boven de grondwaterspiegel zeer klein is, m.a.w. de vochtkarakteristiek (pF curve) een zeer steil verloop heeft. Het gevolg kan zijn dat zich bij niet-stationaire berekening onrealistische oscillaties van het freatisch vlak voordoen. Onder de z.g. "complete benadering" wordt verstaan de simultane oplossing van de niet-stationaire Richards vergelijking, zowel in de verzadigde als in de onverzadigde zone. Zelfs in eenvoudige tweedimensionale symmetrische gevallen, zoals stroming naar sloten of drains blijkt dit een moeilijke opgave, die in het algemeen zeer veel rekentijd kost. PIKUL et al (1979) kozen daarom een quasi twee-dimensionale benadering, waarbij werd aangenomen dat de stroming in de onverzadigde zone vertikaal verloopt, terwijl de stroming in de verzadigde zone vnl. horizontaal verloopt. In een der-

gelijk schema moet de onverzadigde zone boven elk van de knooppunten in het verzadigde model in iedere tijdstap worden doorgerekend, koppeling vindt plaats door toepassing van het waterbalans-vergelijking op de onverzadigde kolom.
Het tweede probleem is van fysische aard en betreft de onttrekking van water door plantewortels aan de onverzadigde zone. De manier waarop dit gebeurt en de invloed van meteorologische- en bodemfysische processen wordt nog niet geheel begrepen. De simulatie ervan is dus ook nog een probleem.
Uiteraard is de potentiaal van het water in de bodem nabij de wortels van grote invloed, terwijl voorts algemeen werd aangenomen dat de maximale onttrekking gelijk is aan de potentiële verdamping op de traditionele manier gedefinieerd.
FEDDES et al (1978) geven een voorbeeld hoe het ontrekkingsproces kan worden gesimuleerd: het product van een voorgeschreven functie van de drukhoogte vermenigvuldigd met de maximaal mogelijke onttrekking, die gelijk is aan de potentiële verdamping.
Bij de onderhavige modellenvergelijking werd uitgegaan van beschikbare gegevens in het studiegebied Hupsel.
Om een zinvolle eerste vergelijking mogelijk te maken is als onderrandvoorwaarde gekozen voor bekende, gemeten grondwaterstanden (per dag).
De modelbouwers hebben daarnaast de beschikking gekregen over de volgende gegevens:

- beschrijving van de bodemopbouw
- bodemfysische eigenschappen
- meteorologische gegevens (per dag)
- vochtgehalten in de bodem (halfmaandelijkse metingen)
- bodemwarmteflux gegevens (per dag)

Uit de meteorologische- en warmteflux gegevens zijn de potentiële- en werkelijke verdamping bepaald volgens STRICKER (1981). Deze cijfers zijn voor de periode 1976-1978 ook aan de modelbouwers ter hand gesteld om calibratie van de modellen mogelijk te maken.
De werkelijke verdamping die voor alle modellen een cruciale uitkomst is, werd voor de jaren 1979-1982 niet aan de deelnemers ter beschikking gesteld. De verdampingsuitkomsten vormen te zamen met de berekende vochtinhoud en flux van en naar de wortelzone een test voor betrouwbaarheid van de modellen.

Bij dit onderzoek waren een vijftal modellen betrokken te weten in alfabetische volgorde:

- DEMGEN (Demand generator) referentie: VAN VUUREN (1983, 1984)
- MUST (Model for unsaturated flow above a shallow water table) referentie DE LAAT (1980)
- ONZAT referentie: VAN DRECHT (1983)
- SOMOF (Soil moisture flow) referentie: GILDING (1983)
- SWATRE (Soil, Water Actual Transpiration Rate extended) referentie: BELMANS et al (1983)

Bovendien heeft de Dienst Waterbeheer van de Provincie Gelderland een versie van het model MUST uitvoerig getoetst en geoptimaliseerd. Met deze versie die voorheen bekend stond onder de naam UNSAT, zijn parallel aan de andere modelberekeningen dezelfde perioden doorgerekend. De resultaten worden nu gepresenteerd onder de naam MUST 2. In afwijking van de eerste vijf modellen wordt door MUST 2 niet de door Stricker bepaalde potentiële verdamping gebruikt, maar een door het model zelf berekende waarde, op basis van een eigen definitie voor E_{pot}.

De belangrijkste eigenschappen en onderlinge verschillen van genoemde modellen zijn samengevat in tabel 1.

De symbolen die in de volgende paragrafen worden gebruikt, stemmen zoveel mogelijk overeen met de terminologie van de Verklarende hydrologische woordenlijst uitgegeven door de COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO (1982). Zij wijken in een aantal gevallen van de door de modelbouwers gehanteerde symbolen.

2. Het fysisch systeem

Het deel van de fysische werkelijkheid waarover we spreken is de onverzadigde zone en wel in het bijzonder de onverzadigde zone ter plaatse van het waarnemingsstation Assink in Hupsel.

De onverzadigde zone is het gebied tussen het freatisch vlak en maaiveld, waar de poriën behalve water ook lucht bevatten en de waterdruk i.h.a. negatief is.

Bodemkundig is het profiel beschreven door WÖSTEN et al (1983) die ook bodemfysische gegevens hebben bepaald zoals de vochtkarakteristiek (pF curve) en de verzadigde en onverzadigde doorlatendheid. Op de bodemkaart wordt de eenheid op deze proefplek aangeduid als Hn52, een veldpodzol, matig fijn zand, zwak lemig tot leemarm.

De A1-horizont (de aan het oppervlak ontstane bovengrond, 2.9% humus) is 15 cm dik, de B2-horizont (inspoelingslaag, 3.4% humus) volgt daaronder van 15 tot 35 cm. Daarna volgen C11 tot 90 cm en C12 van 90 tot 145 cm (leemarm, matig fijn zand 0.2% respectievelijk 0.1% humus).

De waterbeweging in de onverzadigde zone kan worden beschreven met de bekende relaties die hier vnl. terwille van nomenclatuur en volledigheid nog eens worden gegeven.

Stroming in poreuze media onder invloed van potentiaal-verschillen kan worden beschreven door de fluxdichtheidsvergelijking bekend als de wet van Darcy:

$$\bar{v} = - k \text{ grad } h \qquad (1)$$

waarin $\bar{v}$ is de fluxdichtheid (ℓt^{-1})

k is de doorlatendheid (ℓt^{-1})

grad h is de gradient van de stijghoogte (-)

De stijghoogte, waarvan de dimensie energie per gewicht is (ℓ), is een maat voor de potentiaal, het is de som de drukhoogte h_p en de plaatshoogte z, de twee componenten van de potentiaal die van belang zijn bij de berekening van waterbeweging.

De doorlatendheid k is afhankelijk van het vochtgehalte en daarmede dus een functie van de matrixcomponent van de waterdruk p_m die onder normale omstandigheden gelijk is aan de tensiometerdruk p. De bewegingsvergelijking die een beschrijving geeft van de potentiaalverdeling naar plaats en tijd wordt verkregen door combinatie van de fluxdichtheidsvergelijking (1) en de continuïteitsvergelijking (2).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = - \text{ div } \bar{v} + S \qquad (2)$$

hierin is θ het volumetrisch vochtgehalte (-) t is de tijd (t), div. $\bar{v}$ is de divergentie van $\bar{v}$ (t^{-1}), dat is de flux in een punt per eenheid van volume, S is een voedingsterm, zij vertegenwoordigt lokale toevoegingen (positief) of onttrekkingen (negatief) (t^{-1}).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = + \text{ div. (k grad h)} + S \qquad (3)$$

Indien de grondwaterspiegel en het maaiveld over een relatief grote oppervlakte evenwijdig zijn mag men de waterbeweging in een kolom binnen dat gebied als een één dimensionale vertikale beweging beschouwen.
Alle te bespreken modellen gaan uit van die veronderstelling; vergelijking (3) krijgt dan de vertrouwde vorm:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h_p)\left(\frac{\partial h_p}{\partial z} + 1\right)\right] + S \qquad (4)$$

waarin z de verticale coördinaat is, positief naar boven, en $k(h_p)$ aangeeft dat de doorlatendheid een functie van drukhoogte is. Zoals bekend, is de drukhoogte in de onverzadigde zone negatief.
Met behulp van de vochtkarakteristiek en de daaruit afgeleide differentiële vochtcapaciteit C_w kan vergelijking (4) ook worden geschreven alleen als functie van de drukhoogte.

$$C_w(h_p)\frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h_p)\left(\frac{\partial h_p}{\partial z} + 1\right)\right] + S \qquad (5)$$

Omgekeerd kan men met behulp van de bodemvochtvereffeningscoëfficiënt de vergelijking ook schrijven met alleen het vochtgehalte θ als afhankelijke variable.
De beschrijving van het fysisch systeem m.b.v. differentiaal vergelijkingen is in feite de constructie van een abstract model, dat wiskundig van aard is.

Simulatie van de waterbeweging in de onverzadigde zone met een wiskundig model kan dus het oplossen van vlg (4) of een equivalente vergelijking zijn. Afhankelijk van de manier van oplossen spreken we van analytische- of numerieke modellen.

Alle modellen die bij deze vergelijkingsoperatie betrokken zijn, behoren tot de numerieke modellen, de wijze van aanpak verschilt echter aanzienlijk. En dat betreft niet alleen de numerieke procedure die wordt gehanteerd om vlg. (5) en de bijbehorende randvoorwaarden op te lossen.
Eén van de randvoorwaarden die grote invloed uitoefent op het gehele proces is de verdampingsvraag van de atmosfeer in combinatie met de plantontwikkeling.
De wijze waarop de gewasverdamping wordt berekend en in het model is geïncorporeerd, is kenmerkend voor elk van de modellen.

3. Numerieke methoden voor de onverzadigde stromingsvergelijking

Vergelijking (5) is een partiële differentiaalvergelijking van de tweede orde en niet-lineair.
Het is vooral dit laatste kenmerk dat de oplossing ervan via een numerieke methode tot een probleem bestempelt.
Het niet lineaire karakter wordt veroorzaakt door de functies $C_w(h_p)$ en $k(h_p)$, welke doorgaans uit metingen worden verkregen.
Numerieke oplossing van de differentiaalvergelijking betekent dat het continu proces van de waterbeweging wordt verdeeld in discrete tijdstappen aan het einde waarvan de drukhoogte c.q. het vochtgehalte in een aantal punten wordt berekend.
In het onderstaande worden in algemene termen alleen die methoden besproken die toegepast worden in de vijf modellen. Details en bijzonderheden staan vermeld bij de beschrijvingen van ieder model afzonderlijk,

3.1 De eindige differentiemodellen.

SWATRE, SOMOF en ONZAT gebruiken een eindige differentietechniek. Daarbij wordt niet alleen gebruik gemaakt van een discretisatie in de tijd, maar ook naar plaats, dit laatste gebeurt door het stroomdomein van vgl. (5) te bedekken met een regelmatig netwerk. In het geval van ééndimensionale stroming, wordt het netwerk gereduceerd tot een rechte lijn, waarop een aantal (j) knooppunten liggen. Een knooppunt kan worden beschouwd als het centrum van een compartiment uit de grondkolom, waardoor men er fysische betekenis aan kan hechten: de waarden van h_p, $k(h_p)$, $C_w(h_p)$ en S in het knooppunt vertegenwoordigen het gemiddelde in het compartiment. (zie figuur 1).

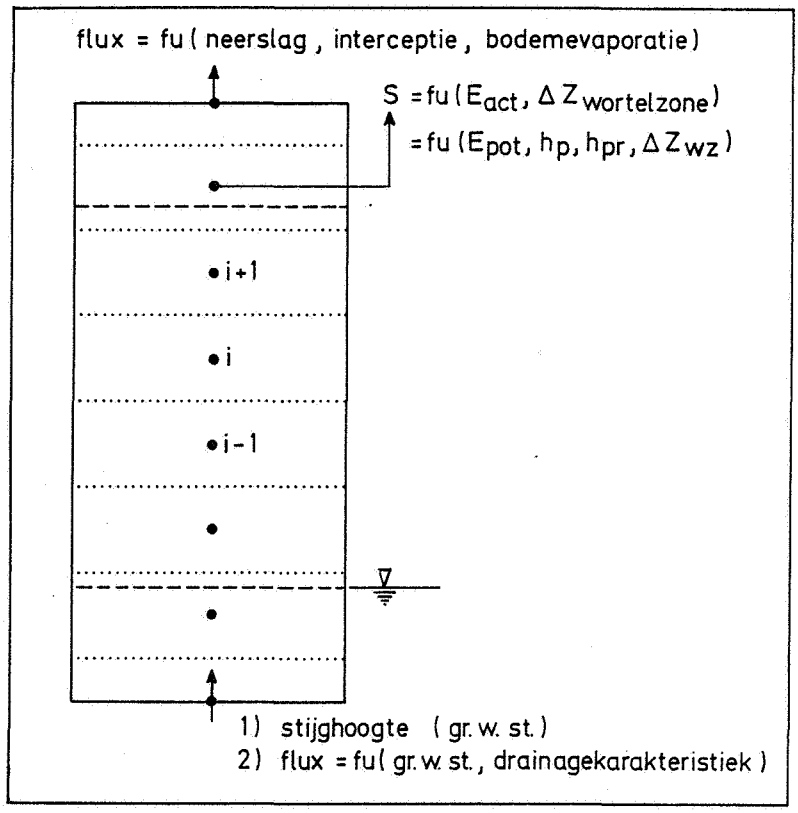


Fig. 1. Indeling v/h systeem volgens differentie modellen.

Een benadering van de oplossing van differentiaalvergelijking (5) wordt nu verkregen, door de afhankelijke variabele h_p, in ieder knooppunt te berekenen met behulp van de z.g. differentievergelijkingen. Equidistantie van de knooppunten (is gelijke dikte van de compartimenten) vereenvoudigt de oplossing, maar is geen voorwaarde.

De differentievergelijkingen worden voor ieder punt verkregen door de afgeleiden uit vgl. (5) ook wel differentiaal operatoren genaamd, te vervangen door zgn. differentie operatoren. De differentie operator is een benadering van de differentiaal operator en wordt verkregen door de waarde van de variabele h_p in een naburig knooppunt uit te schrijven in de vorm van een Taylorreeks. Het resultaat is dan, dat naast de functiewaarde in punt i ook de functiewaarden in de omliggende punten in de vergelijking voorkomen. Punten op of nabij de randen vereisen speciale aandacht in verband met de randvoorwaarden. De eindige differentie modellen passen een z.g. impliciet schema toe, een voorbeeld van een volledig impliciete berekening is:

$$C_{wi}\,\Delta_t h_{pi}^{n+1} = \Delta_z k_i\,(\Delta_z h_{pi}^{n+1} + 1) + k_i \Delta_z^2 h_{pi}^{n+1} + S_i \qquad (6)$$

hierin hebben de symbolen Δ_t en Δ_z de betekenis van een eerste orde differentie operator en Δ_z^2 van een tweede orde differentie operator.

$\Delta_t h_{pi}^{n+1}$ staat dus b.v. voor $\dfrac{h_{pi}^{n+1} - h_{pi}^{n}}{\Delta t}$ en

$\Delta_z^2 h_{pi}^{n+1}$ b.v. voor $\dfrac{h_{pi-1}^{n+1} - 2\,h_{pi}^{n+1} + h_{pi+1}^{n+1}}{(\Delta z)^2}$

C_{wi} en k_i zijn beide een functie van h_{pi}^{n+1} zodat de vergelijking in alle termen niet lineair is.

Aangezien voor ieder knooppunt een vergelijking kan worden opgesteld ontstaat m.b.v. de randvoorwaarden een stelsel van j vergelijkingen met in eerste instantie meer dan j onbekenden, worden echter C_{wi} en k_i als functie van h_{pi}^{n+1}, h_{pi+1}^{n+1} en h_{pi-1}^{n+1} geschreven dan zijn er ook j onbekenden, nl. de waarden van de drukhoogte in alle knooppunten.

Men kan ook, uitgaande van een verdeling van de grondkolom in compartimenten de continuiteitsvergelijking (2) voor ieder compartiment oplossen. Met behulp van vgl. (1) en door gebruik van differentie operatoren ontstaat dan een stelsel vergelijkingen, dat veel overeenkomst vertoont met het stelsel (6).

De kracht van numerieke methoden ligt in de snelheid waarmee grote stelsels vergelijkingen kunnen worden opgelost met tamelijk eenvoudige wiskundige technieken. Indien het stelsel vergelijkingen lineair is, zijn verscheidene technieken voorhanden. (Een bekende methode, die met de hand nog uitvoerbaar is voor 3 à 4 vergelijkingen, staat bekend als de Gauss eliminatie).

Bij grote aantallen knooppunten en dus grote aantallen vergelijkingen is de hulp van rekenmachines onmisbaar, temeer daar voor niet stationaire vergelijkingen, zoals vgl. (5) het gehele stelsel voor iedere tijdstap om een oplossing vraagt. Helaas zijn de differentievergelijkingen voor onverzadigde stroming niet lineair en zijn zulke technieken niet direct toepasbaar.

Om nu toch tot een oplossing te geraken zijn verschillende methoden ontwikkeld die tot doel hebben de vergelijking te lineariseren.

Indien men voor C_{wi} en k_i bekende waarden invult zijn de vergelijkingen lineair en oplosbaar. Bekende waarden zouden kunnen zijn de waarden van C_{wi} en k_i behorend bij de stijghoogte in punt i op tijdstip n. Dit wordt wel een expliciete linearisatie genoemd (SWATRE). De waarden voor C_{wi} en k_i kan men ook benaderen door middel van een iteratieve procedure. Uitgaande van een eerste schatting $h_{pi}^{(0)}$ worden de waarden van $C_{wi}^{(0)}$ en $k_i^{(0)}$ berekend uit de bekende $k(h_p)$ en $C_w(h)_p$ relaties. Met deze waarden ingevuld in de differentievergelijking ontstaat een stelsel lineaire vergelijkingen dat kan worden opgelost. Met de aldus berekende waarden $h_{pi}^{(1)}$ worden $k_i^{(1)}$ en $C_{wi}^{(1)}$ gevonden waaruit een nieuwe waarde van $h_{pi}^{(2)}$ volgt. De iteratie wordt zolang voortgezet totdat de grootste verandering $h_{pi}^{(m+1)}$ $h_{pi}^{(m)}$ kleiner is dan een bepaald gekozen criterium en naar de volgende tijdstap kan worden overgegaan (ONZAT).

Een andere methode is de zgn. predictor-corrector methode, waarbij twee vergelijkingen worden gebruikt, waarvan de eerste de zgn. predictor $\frac{1}{2}\Delta t$ voortschuift in de tijd. De predictor wordt nl. gebruikt om waarden $h_{pi}^{n+\frac{1}{2}}$ te berekenen, waarna de corrector de nieuwe waarden h_{pi}^{n+1} vindt m.b.v. door de predictor geleverde schattingen.

In de predictor worden alle termen gelineariseerd door b.v. alleen in de tijd operator en in de 2e orde plaats operator de functiewaarde $h_{pi}^{n+\frac{1}{2}}$ in te vullen en in de overige termen h_{pi}^{n} (een bekende waarde) te gebruiken. Vervolgens wordt de corrector ook gelineariseerd door gebruik te maken van de zojuist berekende waarde $h_{pi}^{n+\frac{1}{2}}$ (SOMOF).

Een bijzonderheid van het model SOMOF is, dat integenstelling tot de andere modellen de ondergrens niet steeds beneden het freatisch vlak ligt, maar er mee samen valt.

Dit betekent dat de lengte van de te modelleren grondkolom na elke tijdstap moet worden aangepast. Dit probleem wordt ondervangen door een transformatie van de differentiaalvergelijking. Bovendien worden, indien de ondergrond homogeen is, de predictor-corrector vergelijkingen in dit model niet rechtstreeks opgelost maar eerst door middel van een tweede transformatie de z.g. Kirchhoff transformatie, herschreven.

Deze numerieke methoden werken in het algemeen bevredigend, maar in het geval van de onverzadigde stroming kunnen toch moeilijkheden optreden, wanneer het onderhavige traject van de $k(h_p)$ en $C_w(h_p)$ relatie sterk niet lineair is. Dit is het geval bij een scherp vochtfront maar ook vlak boven de waterspiegel. De eerste remedie is dan de ruimte en/of tijdstappen te ver-

kleinen, het blijkt echter dat dit niet altijd tot werkbare resultaten leidt, (tijdstappen in de orde van enkele seconden), zodat speciale technieken moeten worden toegepast om het probleem van té grote computerrekentijden te vermijden bij de simulatie van een praktijkgeval b.v. over een periode van enkele jaren.

In het bijzonder treden zulke problemen op wanneer de onverzadigde zone als onderdeel wordt opgelost in een regionaal grondwatermodel, waarin verzadigde en onverzadigde stroming gekoppeld worden. Het is dan enerzijds nodig de onverzadigde zone voor meerdere bodemprofielen en op meer dan één plaats te modelleren. Anderzijds vereist de oplossing van de onverzadigde simulatie een grote nauwkeurigheid, terwijl voor de verzadigde stroming die nauwkeurigheid juist niet vereist is, maar ook niet haalbaar, doordat zeer nauwkeurige geohydrologische gegevens meestal ontbreken.

3.2 De "pseudo-stationaire" modellen

Deze problematiek heeft ertoe geleid, dat onderzoekers een alternatieve oplossing hebben gezocht door het niet stationaire, niet lineaire stromingsproces te beschouwen als een sequentie van stationaire stappen, DE LAAT (1980).

De modellen DEMGEN en MUST zijn vertegenwoordigers van deze categorie. Ze hebben als kenmerk dat veel grotere tijdstappen (orde van dagen) mogelijk zijn dan bij de differentie modellen, omdat voor stationaire stroming vgl. (4) een eenvoudiger karakter krijgt. Discretisatie van de grondkolom in kleine compartimenten wordt hier niet toegepast, het gehele traject wordt verdeeld in een wortelzone en een ondergrond. De dikte van de wortelzone is afhankelijk van bodemtype en gewas, de ondergrond strekt zich daaronder uit tot juist beneden de laagste grondwaterstand, deze indeling impliceert niet, dat de ondergrond homogeen moet zijn. De beide modellen beschouwen alleen waterbeweging in de ondergrond, van de waterspiegel tot aan de onderzijde van de wortelzone. Daarboven vindt een gelijkmatige onttrekking plaats door de plantewortels, er is daar dus geen waterbeweging anders dan naar de wortels, maar deze speelt in het model verder geen rol. (zie figuur 2)

De flux in de ondergrond wordt berekend als gemiddelde per tijdstip en is afhankelijk van de vochtspanning aan de onderzijde van de wortelzone en de afstand van die onderzijde boven de waterspiegel.

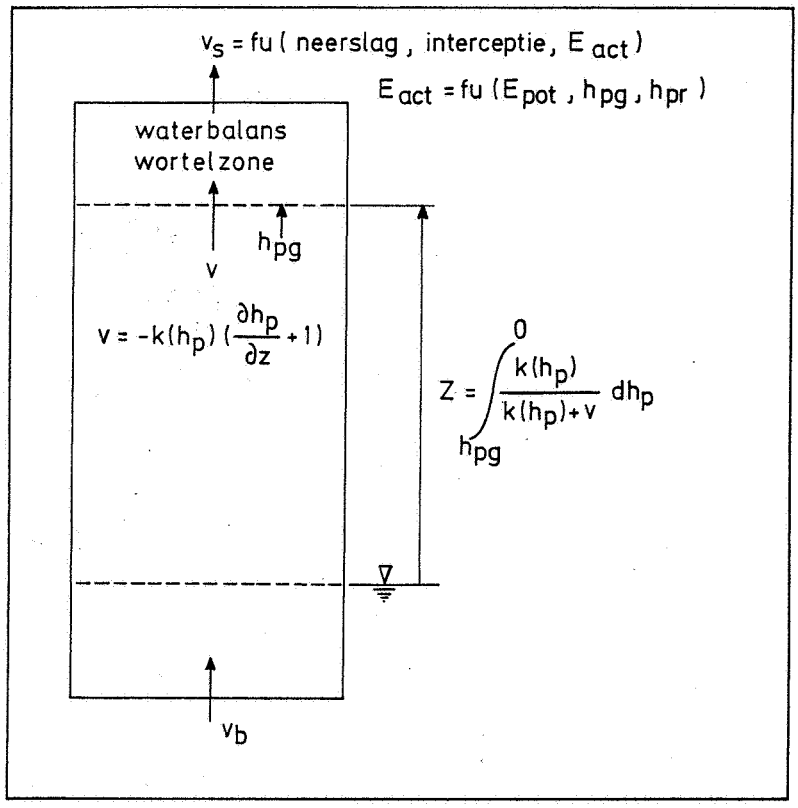


Fig. 2. Indeling v/h systeem volgens pseudo - stationaire modellen.

De flux wordt bepaald door de wet van Darcy:

$$v = - k(h_p) \left(\frac{\partial h_p}{\partial z} + 1 \right) \qquad (7)$$

Integratie levert de hoogste z tot waar een bepaalde stationaire flux v kan opstijgen mits de functie $k(h_p)$ bekend is.

$$z = \int_{h_p}^{0} \frac{k(h_p)}{v + k(h_p)} dh_p \qquad (8)$$

Met behulp van vgl. (8) worden de zg. vochtspanningsprofielen berekend, dat is de vochtspanning als functie van de hoogte z bij een bepaalde stationaire flux v, die via de pF curve kunnen worden omgezet in de vochtgehalteprofielen, dat is het vochtgehalte als functie van de hoogte z bij een bepaalde flux v.

Bij iedere drukhoogte op het grensvlak wortelzone-ondergrond behoort dus een vochtgehalteprofiel in de wortelzone (flux=0) en een vochtgehalteprofiel on de ondergrond (flux=v). Een vochtgehalteprofiel voor een bepaald traject in de bodem kan worden gekarakteriseerd met behulp van de verzadigingstekorten. Het verzadigingstekort van de wortelzone is de hoeveelheid water die nodig is om de wortelzone geheel te verzadigen.
Er bestaat bij elke diepte van de waterspiegel een relatie tussen de flux v in de ondergrond en de verzadigingstekorten in de wortelzone S_r, en in de ondergrond S_s, alsmede het totale verzadigingstekort S_u. Hieruit kan een nieuwe relatie worden gevonden nl. die tussen S_u, S_r, en v.
Voor ieder bodemtype zijn deze relaties uiteraard verschillend.
De oplossingstechniek voor de onverzadigde stroming van MUST gaat in principe als volgt te werk: Uitgaande van de beginsituatie en randvoorwaarden wordt het nieuwe vochttekort S_u berekend aan het einde van de tijdstap.
Voor deze waarde van S_u wordt de relatie tussen S_r en v uitgezet. In dezelfde grafiek wordt ook de waterbalans vergelijking van de wortelzone uitgezet die behoort bij het beginverzadigingstekort en de gegeven bovenrandflux v_s.

$$S_r = (S_r)_{t=0} + \Delta t(v_s - v)$$

Het snijpunt van de twee relaties levert de waarde v, en daarmee een nieuwe waarde S_s. De nieuwe grondwaterstand volgt uit de relatie tussen vochttekort, grondwaterdiepte en stationaire flux.
De hier geschetste procedure geldt alleen voor perioden waarin de flux óf naar boven (verdampingsoverschot) óf naar beneden (neerslagoverschot) is gericht en bovendien veranderingen van de vochtverdeling geleidelijk verlopen.
Het model DEMGEN volgt een procedure die in veel opzichten gelijkenis vertoont met de gang van zaken bij MUST. De berekening wordt opgehangen aan de waterbalansen van de wortelzone en de ondergrond. Beide worden voor iedere tijdstap berekend en gekoppeld via de drukhoogte h_{pg} aan onderzijde van de wortelzone en de capillaire opstijging v. Voor deze wijze van berekening zijn de relaties tussen h_{pg}, v en de grondwaterdiepte z beneden het grensvlak geoptimaliseerd in een capillaire opstijgingsfunctie. Evenzo zijn de relaties tussen v, z en het vochtdeficiet van de ondergrond geoptimaliseerd in de grondwaterstandsfunctie, (zie figuur 3)

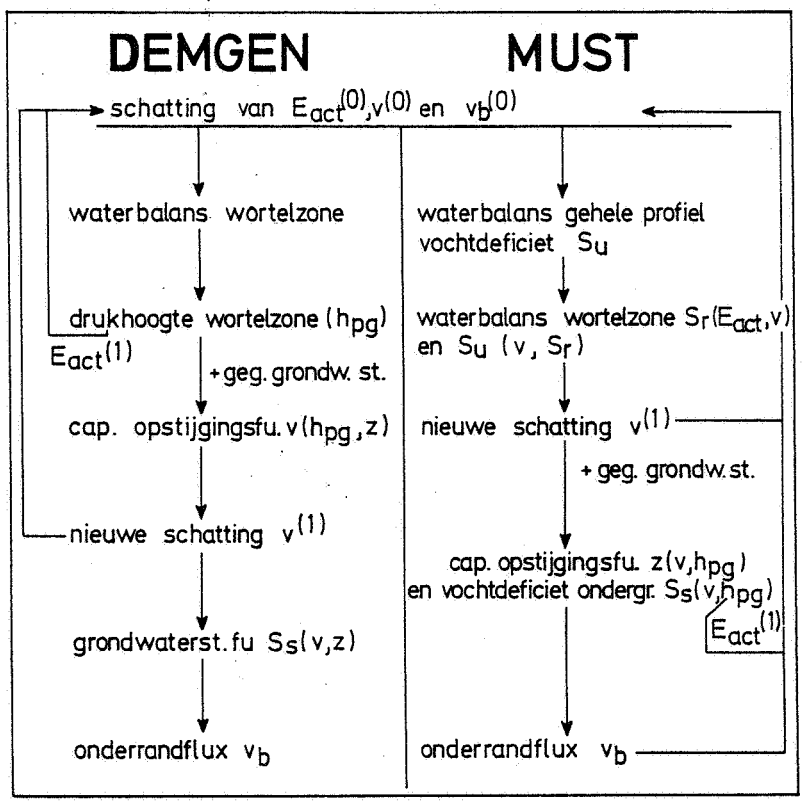


Fig. 3. Schema berekeningsprocedure DEMGEN en MUST.

Speciale procedures zijn ontwikkeld om afwijkende situaties het hoofd te bieden, zij worden hier niet behandeld men zie daarvoor de gedetailleerde beschrijvingen van de modellen.

4. De berekening van de gewasverdamping

Zoals reeds bij de beschrijving van het fysische systeem werd uiteengezet, wordt de waterbeweging in de grondkolom bepaald door de fysische eigenschappen van de bodem en door de condities die aan de randen worden opgelegd, de z.g. randvoorwaarden. Een zeer belangrijke r.v.w. is die aan de bovenzijde van het systeem, waar neerslag, interceptie en verdamping de netto flux beïnvloeden.

De belangrijkste component van de verdamping is echter de gewasverdamping en de onttrekking door het gewas vindt plaats in de gehele wortelzone. Deze onttrekking werd in de differentiaalvergelijking (4) aangeduid door S.

De differentie modellen kunnen per knooppunt een verdampingsflux invoeren die representatief is voor het betreffende compartiment.

De pseudo-stationaire modellen voeren de verdamping in als flux aan de bovenzijde van de wortelzone.
De grootte van de werkelijke verdamping, ook wel actuele verdamping, Eact, genaamd, wordt door de modellen berekend uit de potentiële verdamping, E_{pot}.
Daarbij wordt er van uitgegaan dat de potentiële verdamping de maximaal mogelijke verdamping door het gewas is en dat als gevolg van afnemende drukhoogte (=toenemende vochtspanning) in de wortelzone de werkelijke verdamping achterblijft bij de potentiële verdamping.
Bij deze vergelijkings exercitie werd de potentiële verdamping bepaald volgens de methode Thom en Oliver (STRICKER 1981) alle deelnemers behalve de versie MUST 2 hebben die potentiële verdampingsgegevens in hun berekeningen gebruikt. MUST 2 berekent een eigen E_{pot}, die afwijkt van E_{pot}^{TH+O} doordat er rekening mee wordt gehouden dat de bladweerstand op warme droge dagen aanmerkelijk kan toenemen (als functie van de bladpotentiaal). De reductiefuncties die de modellen gebruiken zijn specifiek voor elk model en worden bij de modelpresentatie besproken.
Algemeen geldt echter dat reductie van de verdamping afhangt van de drukhoogte in de wortelzone, voor de pseudo-stationaire modellen geldt de waarde op het grensvlak tussen wortelzone en de ondergrond, dan wel de gemiddelde waarde in de wortelzone.
Dat betekent dus dat bij een bepaalde waarde van de drukhoogte h_{pr}, reductie begint op te treden.
Het reductiepunt lijkt echter wel afhankelijk te zijn van de verdampingsvraag van de atmosfeer d.w.z. dat bij een hoge verdampingsvraag (E_{pot}) reductie optreedt bij een hogere drukhoogte (=lagere vochtspanning). Een eenvoudige relatie is die waarbij de reductiefactor evenredig is met h_p of log ($-h_p$) d.w.z. met de vochtspanning of met de pF.

Het model SOMOF berekent de actuele verdamping door middel van een worteleffectiviteitsfunctie, die bestaat uit het product van een wortelverdelingsfunctie en een weerstandsfactor.
Als de drukhoogte aan het grond-worteloppervlak gelijk wordt aan de drukhoogte bij verwelkingspunt, is de weerstandsfactor een lineaire functie van de potentiële evapotranspiratie.

De verdamping van het plantendek moet per tijdstap in eerste instantie worden onttrokken aan de wortelzone. De differentiemodellen doen dit door in de compartimenten van de wortelzone de term S van vgl(6) een waarde te geven die overeenstemt met de relatieve dikte van het compartiment en de wor-

telverdeling. De reductie van de potentiële verdamping hangt uiteraard af van de waarde van de drukhoogte in het betreffende compartiment.
In de pseudo stationaire modellen moet bij capillaire opstijging een iteratieve procedure worden toegepast via de waterbalans van de wortelzone. In het model MUST 2 is de actuele verdamping een functie geworden van een varierende stomatale weerstand $r(h_{pblad})$ die op zijn beurt via de bladwaterspanning weer afhangt van de potentiële verdamping en uiteraard de drukhoogte in de wortelzone. E_{act} wordt in eerste instantie via een iteratieve procedure bepaald uit de relaties tussen E_{act}, h_{pblad} en $r(h_{pblad})$.

	DEMGEN	MUST	ONZAT	SOMOF	SWATRE
type model	- 'pseudo-stationair'	- 'pseudo-stationair'	- eindige differentietechniek	- eindige differentietechniek	- eindige differentietechniek
rekenschema	- profiel verdeeld in wortelzone en ondergrond - geen verticale flux in de wortelzone - berekening van de flux v van ondergrond naar wortelzone via waterbalansen van beide zones, koppeling via drukhoogte onderzijde wortelzone - capillaire opstijgingsfunctie $v(z, h_{pg})$ en grondwaterstandsfunctie $z(S_s, v)$ geoptimaliseerd (reprofunctie)	- profiel verdeeld in wortelzone en ondergrond - geen verticale flux in de wortelzone - berekening van de flux v van ondergrond naar wortelzone via verzadigingstekorten van wortelzone en ondergrond - vochtspanningsprofielen en vochtgehalteprofielen spelen centrale rol - getabelleerde relaties tussen S_s, h_{pg} en v en tussen S_s, z en v	- waterbalans per compartiment - impliciet rekenschema met Crank-Nicolson benadering - linearisatie door middel van iteratie voor $k(h_p)$, $C_w(h_p)$ en $S(h_p)$ - $k(h_p)$ en $\theta(h_p)$ relaties moeten bekend zijn voor het gehele profiel	- getransformeerde differentiaalvergelijking i.v.m. wisselende lengte van de onverzadigde zone - predictor-corrector methode $k(h_p)$ en $\theta(h_p)$ moeten worden ingevoerd als analytische fu's voor het gehele profiel	- rechtstreekse oplossing van de differentie vergelijking - impliciet rekenschema met expliciete linearisatie voor $k(h_p)$, $C_w(h_p)$ en $S(h_p)$ - $k(h_p)$ en $\theta(h_p)$ relaties moeten bekend zijn voor het gehele profiel
bovenrandvoorwaarde	- Neerslag - 2.5% interceptie - Eact = fu (Epot, h_{pr}(Epot)	- Neerslag - Eact = fu (Epot, $h_{pr}(t)$)	- Neerslag	- Neerslag	- Neerslag, potentiële evapotranspiratie
onderrandvoorwaarde	- grondwaterdiepte	- grondwaterdiepte	- stijghoogte op onderrand	- drukhoogte bij gr.w.sp. = 0	- drukhoogte of flux
waterontrekking door de plant	- Eact/Epot= lineaire fu van $\log(-h_p)$ en $\log^{-1}(-h_{pr})$ - reductiepunt h_{pr} = fu (Epot) - bovenrandvoorwaarde van het model - wortelontrekking gelijkmatig in gehele wortelzone	- Eact/Epot= lineaire fu van $\log(-h_p)$ en $\log^{-1}(-h_{pr})$, indien $h_p \leq h_{pr}$ - reductiepunt h_{pr} = fu (t) - bovenrandvoorwaarde van het model - wortelontrekking gelijkmatig in gehele wortelzone	- Eact/Epot = exponentiële fu van h_p en h_{pr} - reductiepunt h_{pr} = fu(Epot) - 'sink'term in de diff.vgl. - dikte wortelzone is fu (t) - onttrekking per compartiment	- W = fu(Δh_p, Epot) - alleen reductie als log wortelspanning= 4,2 - weerstandsfactor = lineaire fu van Epot, indien reductie -'sink'term in differentievgl. - analytische wortelverdeling fu	- Sact/Spot= lineaire fu van h_p, indien $h_p < h_{pr}$ - reductiepunt h_{pr} lineaire fu van S_{pot} 'sink' terms in de diff. vgl - wortelonttrekking per compartiment - dikte wortelzone is fu(t) - Δt = 0,1 d
tijdstap	- Δt = 10 d	- Δt = 1 d	- Δt = 0,25 d	- Δt = 0,1 d	
bijzonderheden	- in regionaal model kiest DEMGEN rekeneenheden op basis van combinaties van gewas en bodemfysische karakteristieken - indien Epot niet gegeven, dan berekent het model Epot=f.E_o E_o uit KNMI-gegevens. - gewasschade en benodigde beregening wordt ook berekend - onderrandvoorwaarde ook als flux mogelijk of als relatie tussen grondwaterstand en flux (drainagefunctie)	- Bovenrandvoorwaarde ook als Epot=fu(r'_s/r_a).(Ewet-E_i) E_i= interceptie Ewet = fu (meteogegevens) r'_s = stomatale weerstand = r_b + fu (h_{pblad}) r_a = aerodynamische weerstand Eact = fu ($\frac{r'_s}{r_a}$). Ewet h_{pblad} = fu (r_{plant}, h_p, Eact) - In MUST 2 is r_b = geoptimaliseerde fu (h_{pblad}) - E_i kan als fu van gewas en tijd worden ingevoerd - onderrandvoorwaarde ook als flux mogelijk of als relatie tussen grondwaterstand en flux. - standaardprogramma's voor 7 gewassen.	- interceptiereservoir kan als fu (t) worden ingevoerd - bodemverdamping E_s= fu (t) kan worden ingevoerd, speelt geen rol bij gras - verdampingsreductie fu vlgs. SWATRE of Hoogland ook mogelijk - onderrand model op vaste diepte onder aardoppervlak (in de verzadigde of onverzadigde zone) - niet-lineaire drainage-afvoerrelatie, kan aan ieder knooppunt gekoppeld worden - stoftransport	- differentie vergelijking wordt bij homogene grond verkregen na toepassing van de Kirchhoff transformatie voor linearisatie - interceptie kan worden ingevoerd, fu (t) - bodemverdamping E_s= fu(t) kan worden ingevoerd, speelt geen rol bij gras - oppervlakkige afvoer kan in rekening worden gebracht - onderdeel van gebiedsmodel PREDIS	- in situaties waarbij de fluctuatie van het freatisch vlak door het model wordt berekend wordt voor de eerste 4 knooppunten erboven een speciale vereffeningsprocedure toegepast. - interceptie kan worden berekend, fu (t) - bodemverdamping E_s = fu(t) kan worden berekend - meerdere opties voor de berekening van Epot

Tabel 1: Modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de ver[illegible]ping

LITERATUUR

BELMANS, C., WESSELING, J.G. en FEDDES, R.A. (1983). Simulation model of the waterbalance of a cropped soil: SWATRE, J. of Hydrol., 63: 271-286.

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO (1982). Verklarende hydrologische woordenlijst. Rapporten en Nota's, 8a, 36 pp.

DRECHT, G. VAN (1983). Simulatie van verticaal, niet stationair transport van water en opgeloste stof in de grond. R.I.D. Mededeling 1983-11, 56 pp.

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

GILDING, B.H. (1983). The soil moisture zone in a physically-based hydrologic model. Adv. in Water Res., 6: 36-43.

GRAAF, M. DE (1982). Toepassing van het niet stationaire model SWATRE op enkele veenkoloniale profielen. I.C.W. interne nota 1354. Wageningen, 69 pp.

LAAT, P.J.M. DE (1980). Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to a regional sub-surface flow problem. Agr.Res.Rep. 895, PUDOC, Wageningen, 126 pp.

NES, Th.J. VAN DE (1976) Modelonderzoek 1971-1974 ten behoeve van de waterhuishouding in Gelderland. Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, Deel 2: 6-15.

PIKUL, M.F., STREET, R.L. and REMSON, I. (1974) A numerical model based on coupled one-dimensional Richards and Boussinesq equations. W.R.R., 10,2: 295-302.

STRICKER, J.N.M. (1981). Methods of estimating evapotranspiration from meteorological data and their applicability in hydrology. Comm. voor Hydrol. Onderz. TNO, versl. & meded., 28: 62-77

VUUREN, W.E. VAN (1983). Hydrologisch onderzoek in de proefgebieden Hupsel en Sleen. Deel II, Een eerste toetsing van DEMGEN in Hupsel. Rijkswaterstaat. Dir. W & W, Z.O. Nota 83. 24, 95 pp.

VUUREN, W.E. VAN (1984). Validation of the agrohydrological model DEMGEN (Demand Generator) on point data from the Hupselse Beek area in the Netherlands. Bijdrage aan RIZA-Symposium, München, oktober 1984.

WÖSTEN, J.H.M., STOFFELSEN, G.H. en JEURISSEN, J.W.M. (1983). Proefgebied Hupselse Beek: regionaal bodemkundig- en bodemfysisch onderzoek. Stiboka 2.dl.+ 5 bijl. Wageningen.

GEGEVENS

J.N.M. STRICKER, W. JONGERIUS EN W.E. VAN VUUREN

Ten behoeve van de modelberekeningen waren de volgende gegevens op dagbasis beschikbaar: neerslag, grondwaterstand,potentiële verdamping en actuele verdamping. Laatstgenoemde grootheid is bepaald voor de periode van 15 april t/m 15 september en werd alleen ter beschikking gesteld voor de calibratie periode (maart '76 t/m december '78). De genoemde, tijdsafhankelijke, gegevens zijn alle afkomstig van het meteostation "Assink" te Hupsel. Eveneens kon beschikt worden over bodemvochtcijfers op half-maandelijkse basis.
Afvoergegevens van het Hupselse Beekgebied zijn niet als invoergegevens gebruikt.
De tijdsonafhankelijke gegevens, waarover beschikt kon worden voor de berekeningen, omvatten bodemfysische informatie van het meetpunt "Assink" en de dikte van de wortelbare zone. Voor gedetailleerde informatie over het meetprogramma te Hupsel kan verwezen worden naar Warmerdam (1981).
De verschillende invoer-grootheden zullen hierna beknopt besproken worden.

1. Neerslag

Over de volle periode van calibratie en verificatie respectievelijk maart 1976 t/m december 1978 en januari 1979 t/m december 1982, zijn de waarnemingen gebruikt van de "Recover"-grondregenmeter.
In situaties met sneeuwval werden evenwel de gegevens gebruikt van een tweede "Recover"-regenmeter, welke gedurende het winterhalfjaar is voorzien van een 40-cm hoge opzetring met verwarmingselementen. De dagwaarden omvatten de neerslag van 0.00 uur tot 0.00 uur.

2. Grondwaterstand

Met de 20-min waarnemingen van het grondwaterpeil is in principe een nauwkeurige waarde voor de gemiddelde grondwaterstand per dag te berekenen.
Om een tweetal redenen is evenwel gekozen voor de momentane waarde op een vast tijdstip (0.00 uur).
Ten eerste blijkt het grondwaterpeil tijdens nattere omstandigheden flinke schommelingen te vertonen over de dag (≈20 cm).
Ten tweede rekenen een aantal onverzadigde grondwatermodellen met tijdstappen, welke aanzienlijk geringer zijn dan een dag.
In het laatste geval geeft een momentane waarde een betere calibratiemogelijkheid voor het model dan een daggemiddelde waarde.

3. Potentiële verdamping

Voor berekening van de potentiële gewasverdamping van gras op dagbasis, is gekozen voor de methode van Thom en Oliver (1977)

$$\lambda E_{POT} = \frac{s}{s+\gamma(1+n)} (Q^*-G) + \frac{m.\gamma}{s+\gamma(1+n)} (7.4 + 4.0\ \bar{u}_2) \cdot \overline{\Delta e} \quad (1)$$

met $n = r_c/r_a$ en (2)

$$r_a = 4.72 \left\{ \ln \left(\frac{z}{z_{om}} \right) \right\}^2 \Big/ \left(1+0.54\ \bar{u}_2 \right) \quad (3)$$

λ : latente verdampingswarmte (J/kg)

E_{POT} : potentiële evapotranspiratie van gras (kg/m^2,sec)

s : verandering van de verzadigde dampspanning van lucht per K (mbar/K)

γ : psychrometer constante : 0.66 bij ≈295 K (mbar/K)

Q^* : netto straling (W/m^2)

G : bodemwarmtestroom (W/m^2)

$\bar{u}$: gemid. windsnelheid over 24 uur, gemeten op 2 m hoogte (m/sec)

$\overline{\Delta e}$: gemid. dampdrukdeficiet over 24 uur, eveneens op 2 m hoogte bepaald (mbar)

n : verhouding tussen de hoogte van de gewasweerstand (r_c) en de aerodynamische weerstand (r_a)

r_c : gewasweerstand : 65 sec/m (vast) (sec/m)

r_a : aerodynamische weerstand : variabel (sec/m)

z_{om} : ruwheidslengte van het gras; hier op 0.01 m gesteld (m)

z : 2 meter als meethoogte voor de windsnelheid (m)

m : verhouding tussen de aerodynamische weerstand, zoals in de Penman-formule voor en de aerodynamische weerstand van een grasoppervlak.

Vergelijking (1) is gehanteerd voor de gehele periode om de potentiële gewasverdamping te bepalen.
Ten opzichte van de formulering in Stricker (1981) is één wijziging doorgevoerd. De waarde van n is niet als constante aangenomen (n was gesteld op 1,2 met r_c = 65) maar variabel gemaakt door r_a steeds opnieuw per dag te laten berekenen. Dit is eleganter, maar heeft een beperkte invloed op de resultaten.

Een tweede, belangrijke, wijziging op de resultaten van maart 1976 t/m december 1978 betreft de herberekening van netto straling over genoemde periode. De eerder gepubliceerde cijfers van Q* van Hupsel (Stricker, 1981) dienen met een factor 1,08 te worden vermenigvuldigd. Dit heeft uiteraard ook gevolgen voor daarvan afgeleide grootheden zoals de potentiële verdamping en de actuele verdamping, indirect berekend uit de energiebalans.
Voor de E_{POT}-resultaten heeft e.e.a. tot gevolg dat de dagwaarden veelal ca 5% hoger komen te liggen voor de zomerperiode dan eerder berekend.

Tenslotte is ook nog een aangepaste berekening uitgevoerd voor de bodemwarmtestroom voorzover deze grootheid is berekend uit bodemtemperatuurprofielen.
De invloed van deze aanpassing op de dagwaarden van E_{POT} is uiteraard gering en voor 10-daagse sommen nihil.

De zomerhalfjaar*totalen en jaarsommen zijn vermeld in tabel 1.
De dagcijfers van het zomerhalfjaar zijn voor meerdere perioden van potentiële veldomstandigheden vergeleken met de actuele verdamping. Er blijkt een goede overeenkomst te zijn.
In tabel 1 is ook het totaal van de actuele verdamping per zomerperiode opgenomen van 1976 t/m 1982. In de drogere zomers (1976, 1982) valt uiteraard E_{POT} hoger uit dan E_{act}. In de nattere jaren (1977 t/m 1981) zou in principe de potentiële verdamping gelijk moeten zijn aan de actuele verdamping, maar zeker niet lager. Toch blijkt uit de cijfers in tabel 1 dat E_{ACT} de E_{POT} overschrijdt in 1978, 1979 en 1981.
Oorzaak hiervan is dat beide grootheden op verschillende wijze worden berekend uit deels overeenkomstige, deels ook verschillende metingen (met verschillende foutenbronnen).
Dit leidt zowel op korte tijdsbasis (dag) als ook op langere tijdsbasis tot onderlinge verschillen. In het laatste geval bedraagt het enige procenten van het totaal. Voor het winterhalfjaar ontbreekt feitelijk een directe toets voor de toepasbaarheid van de E_{POT}-formulering, daar de betrouwbaarheid van de methoden voor actuele verdampingsbepalingen snel terugloopt: de energiestromen worden van dezelfde grootte-orde als de foutenbronnen.

* Periode van 5 maanden van 15 april t/m 15 september

Vooralsnog wordt hier aangenomen dat de E_{POT}-formulering volgens Thom en Oliver een aannemelijke schatting oplevert voor de winterhalfjaar-verdamping.

4. Actuele verdamping

Zowel voor de calibratie periode als voor de verificatieperiode is de actuele dagverdamping gedurende het zomerhalfjaar bepaald volgens de aerodynamische profielmethode voor de voelbare warmtestroom in combinatie met de energiebalans:

$$H = - \rho c_p k_H \frac{dT}{dz} \qquad (4)$$

$$E_{ACT} = Q^* - H - G \qquad (5)$$

H	: voelbare warmtestroom	(W/m^2)
ρ	: dichtheid van lucht	(kg/m^3)
C_p	: specifieke warmte van lucht	(J/kg, K)
$\frac{dT}{dz}$	: temperatuur gradiënt	
k_H	: turbulente uitwisselingscoëfficient voor voelbare warmte (variabel).	

De verdamping wordt dus indirect bepaald. H wordt bepaald met behulp van de flux-profielrelaties (Keyman, 1981) en wind- en temperatuurmetingen van een 3-meter mast over de calibratieperiode respectievelijk van een 10-meter mast over de verificatieperiode.

De aanpassingen aan Q* en G, eerder beschreven, zijn ook hier toegepast over de calibratieperiode. Gevolg hiervan is dat de oude E_{ACT}-cijfers van Hupsel (Stricker, 1981) met een factor 0,08 x R_{NET} moeten worden verhoogd. Dit volgt logischerwijze uit vgl. (5).
Voor het winterhalfjaar wordt verondersteld dat de verdamping altijd potentieel is en wordt de E_{ACT} gelijk gesteld aan de E_{POT}. Voor de E_{POT} geldt weer vergelijking (1).
Gedurende de verificatieperiode zijn in het zomerhalfjaar regelmatig natte bol temperaturen gemeten aan de 10-m mast op meerdere nivo's. Dit geeft de mogelijkheid om in combinatie met de droge bol temperaturen de zogenaamde Bowen verhouding-energiebalans methode (Keyman, 1981) toe te passen voor bepaling van de E_{ACT}.

$$E_{ACT} = \frac{Q^* - G}{1 + \beta} \qquad (6)$$

$$\beta = \left\{ \left(1 + \frac{s}{\gamma}\right) \frac{\Delta Tn}{\Delta T_d} - 1 \right\}^{-1} \qquad (7)$$

s en γ te nemen bij T_{nat}

β : Bowen verhouding $\left(\beta = \frac{H}{E_{act}} \right)$

ΔT_n en ΔT_d : natte en droge bol temperatuurverschillen tussen twee meethoogten.
De verschillen zijn 20-min gemiddelden.

De methode eist een grote meetnauwkeurigheid van de temperatuurverschillen ($\leqslant 0{,}02$ K in ΔT_i).
Zij wordt algemeen als betrouwbaar aangemerkt voor verdampingsbepalingen overdag en wordt tevens als minder gevoelig voor locale grenslaagverstoringen beschouwd.
Gedurende zonsopgang en zonsondergang is de methode niet bruikbaar.
In tabel 2 zijn de (voorlopige) resultaten gegeven van een vergelijk tussen E_{act}-bepaling volgens (4) +(5) en (6) + (7).
In Fig. 1 is een scatter-diagram gegeven voor beide met het jaar 1981 als willekeurig genomen ter illustratie.

Uit tabel 2 blijkt dat de variatie coefficiënt voor de twee methoden beneden de 10% blijft. De lineaire correlatie coefficiënten liggen hoog en uit de waarden van de parameters van de lineaire regressie-analyse blijkt dat de lineaire verbanden zeer dicht tegen de 45°-lijn liggen (a = 1), echter met een lichte verschuiving ten opzichte van de oorsprong.

Tenslotte moet nog opgemerkt worden dat de actuele dagverdampingscijfers van de verificatieperiode uiteraard niet vooraf ter hand zijn gesteld voor de modelberekeningen.

5. Bodemvochtcijfers

Door WWZO zijn in hoofdzaak twee soorten bodemvochtcijfers beschikbaar gesteld:
. De vochtinhoud en het (vocht)deficit van de wortelzone;
. Het vochtdeficit van de ondergrond, d.w.z. de grondkolom beneden de wortelzone;
. Geselecteerde vochtgehalteprofielen.

Als basis voor deze cijfers dienden de halfmaandelijks gemeten neutronentellingen ter plaatse van het meteoveld Assink, welke uitgevoerd worden op diepten van 10, 20, 30, 40; 60, 80, . . ., 200 cm beneden maaiveld. Voor het omrekenen van de tellingen naar vochtgehalten is gebruik gemaakt van de in 1983 per laag, toegewezen aan voornoemde meetdiepten, door middel van een veldbemonstering bepaalde ijklijnen. De halfmaandelijkse cijfers zijn middels een interpolatie in de tijd en waar mogelijk met gebruikmaking van de grondwaterstand, geconverteerd naar een 10-daagse reeks.

De vochtgehalteprofielen zijn beschikbaar gesteld voor de dag van meting.

Voor wat betreft de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de cijfers zijn de volgende punten van belang:

. De statistische onnauwkeurigheid van de veldijklijnen bedraagt in het gemiddelde geval ± 0,5 vol %. Binnen het geldigheidsgebied van de ijklijnen (zie verder) volgt hieruit, tezamen met de invloed van tel- en interpolatiefouten, ruw geschat, een onnauwkeurigheid in de vochtinhoud van de wortelzone van 2-3 mm in een individuele tiendaagse waarde. Voor het deficit van de ondergrond is dat 5-8 mm. De onnauwkeurigheid in een individueel vochtgehalte (geselecteerde vochtprofielen) kan gesteld worden op ca ± 1 vol %.

. De (veld)ijklijnen zijn bepaald voor vochtprofielen in een zgn. evenwichtssituatie, d.w.z. dat vochtfronten e.d. uitgezakt zijn.
Het geldigheidsgebied van de ijklijnen is hierdoor bepaald.
Vochtprofielen die afwijkend van vorm zijn, b.v. met vochtfronten na hevige regenval, bezitten dus een grotere onnauwkeurigheid.
Kwantitatieve gegevens hieromtrent ontbreken evenwel.

. Het meetpunt is, door haar ligging van ca 6 m van de locatie waarvoor de door de modellen gebruikte bodemfysische karakteristieken zijn bepaald, misschien niet helemaal representatief voor het simulatiepunt. Grote afwijkingen als gevolg hiervan worden, zeker voor de vochtinhoud van de wortelzone, niet verwacht.

. Er is een verschil vastgesteld tussen de verzadigingsvochtinhoud van de wortelzone, zoals die uit de bodemvochtmetingen volgt en die volgens de door Stiboka bepaalde pF-krommen. De eerste blijkt 27,7 mm hoger te liggen dan de tweede. Aangenomen is dat de aanwezigheid van wijde poriën (wortelgangen, e.d.) hiervan de oorzaak is.
De gemeten cijfers (wortelzone) zijn zodanig aangepast dat het deficit met 27,7 mm verlaagd is om tegemoet te komen aan het in de modellen gehanteerde verzadigingsnivo (pF-kromme).

6. Dikte van wortelzone

Op grond van informatie uit een bodemkundig en bodemfysisch onderzoek, uitgevoerd te Hupsel door Stiboka (1983) in opdracht van R.W.S., is een dikte gekozen van 25 cm. De dikte van een dergelijke zone is nogal arbitrair.

7. Bodemfysische gegevens

De in de modellen gebruikte bodemfysische gegevens staan vermeld in onderstaande tabel. De gegevens zijn ontleend aan het eerdergenoemde Stiboka-rapport.

Voor zover nodig in de modellen is voor de A_1-horizont de $k - h_p$ - relatie gebruikt van de B_2-horizont.

Uit de $k - h_p$ relaties van het meetpunt "Assink" blijkt, dat hier sprake is van een ondergrond met goede capillaire eigenschappen.

pF-waarden en k (h_p)waarden voor meetpunt Assink proefveld.
(afgeleid uit STIBOKA rapport 1706, figuren II-1-1 t/m 5).

Horizont.

A_1	0-15 cm	alleen pF-(k(h_p))waarden van B_2 horizont)
B_2	15-35 cm	pF en k (h_p)
C_{11}	35-90 cm	pF en k (h_p)
C_{12}	90-∞	pF en k (h_p)

h_p (cm)	-1	-10	-20	-31	-50	-100	-250	-500	-1000	-2500	-5000	-10000	-16000
pF (log $-h_p$)	0	1	1.3	1.49	1.7	2	2.4	2.7	3	3.4	3.7	4	4.2
Volume-gehalte													
A_1	.43	.405	.392	.38	.35	.273	.18	.152	.132	.11	.097	.08	.07
B_2	.40	.361	.341	.324	.299	.24	.10	.073	.059	.05	.043	.038	.033
C_{11}	.36	.313	.293	.28	.247	.11	.077	.06	.05	.04	.032	.025	.02
C_{12}	.358	.33	.32	.305	.276	.173	.113	.088	.067	.046	.033	.025	.023
k-(h_p) (cm/Etm)													
B_2	102	22	10	4	.8	.041	2E-3	1.8E-4	2.5E-5	1.9E-6	3.8E-7	6E-8	2.5E-8
C_{11}	60	29	12	2.6	.5	8E-2	1.3E-2	3E-3	9E-4	2E-4	6E-5	2.3E-5	1.2E-5
C_{12}	29	12	4.8	2	.75	.11	6.5E-3	1.4E-3	3.6E-4	5.5E-5	1.4E-5	3.6E-6	2E-6

Tabel 1

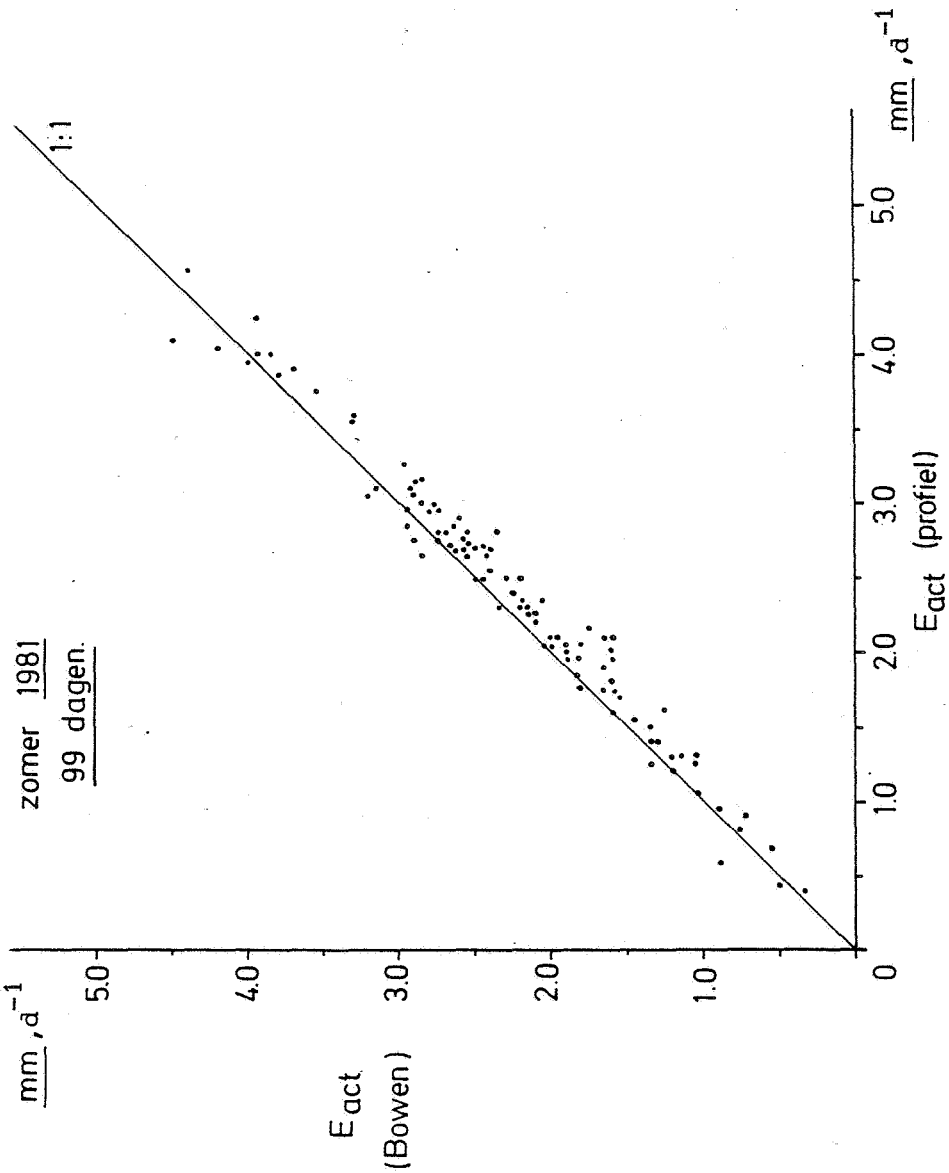
	E_{POT}(15 ap.t/m 15 sept.):mm	E_{POT}(jaartotaal):mm	E_{ACT}(profiel) van 15 ap. t/m 15 sept.)
1976	467	574 (vanaf 1-3)	331
1977	331	467	330
1978	339	477	348
1979	337	474	349
1980	370	520	354
1981	356	490	366
1982	397	534	373

Tabel 2

	E_{ACT}(profiel) Gemid.mm/etm	E_{ACT} Bowen Gemid.mm/etm	Aantal dagen	Variatie coëfficiënt[1] (%)	Correlatie coëfficiënt	Lin regressie[2] coëfficiënten a,b
1979	2,25	2,31	76	8,5	0,974	0,96 0.15
1980	2,09	2,04	88	9,8	0,972	0,982 -0.01
1981	2,38	2,25	99	8,5	0,985	0,992 -0.11
1982	2,50	2,36	49	9,6	0,977	0,987 -0.11

1) Definitie: $S = \frac{\sqrt{\overline{(x-y)^2}}}{\bar{x}}$ met $x = E_{ACT}$(profiel) en $y = E_{ACT}$ (Bowen)

2) E_{ACT} (Bowen) $= a \cdot E_{ACT}$ (profiel) $+ b$


zomer 1981
99 dagen.
1:1
mm ,a⁻¹
Eact (Bowen)
Eact (profiel)
mm ,a⁻¹
0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0

Referenties (bij Hoofdstuk 4)

Keijman, J.Q,: Theoretical background of some methods for the determination of evaporation. Versl. en Med. no. 28 TNO-CHO pag. 12-24, 1981.

Stiboka : Regionaal bodemkundig en bodemfysisch onderzoek, Hupselse Beek. Rapport no. 1706, 1983.

Stricker, J.N.M.: Methods of estimating evapotranspiration from meteorological data and their applicability in hydrology. Versl. en Med. no. 28 TNO-CHO, pag. 59-77, 1981.

Thom, A.S. en H.R. Oliver: On Penman's equation for estimating regional evaporation. Quart. J. Roy. Met. Soc., 103:345-357, 1977.

Vuuren, W.E. van: Problems involved in soil moisture determination by means of a neutron depth probe. Proc. Int. Symp. on Recent Investigations in the zone of aeration. Vol. 1, 271-280, Munich, 1984.

Warmerdam, P.M.M., J.N.M. Stricker en J.W. Kole: Current research and data collection in the experimental catchment Hupselse Beek in the Netherlands. Proc. Symp. Hydrolog. Res. Basins; 209-216 Bern, 1982

MODELBESCHRIJVINGEN/CALIBRATIE/BEREKENINGSRESULTATEN

A DEMGEN
W.E. van Vuuren

B MUST
P.J.M. de Laat

C ONZAT
G. van Drecht

D SOMOF
J.H.A. Driessen en B.H. Gilding

E SWATRE
R.A. Feddes en M. de Graaf

F MUST 2
Th. J. van de Nes

A DEMGEN

W.E. van Vuuren

MODELBESCHRIJVING VAN DE ONVERZADIGDE VERSIE VAN HET MODEL DEMGEN, ZOALS TOEGEPAST IN HET KADER VAN DE STUDIEDAG HUPSEL

1. NAAM : DEMGEN (DEMAND GENERATOR)/ onverzadigde versie

De onverzadigde versie is een optie in het DEMGEN model en heeft als zodanig geen eigen benaming. In deze modelbeschrijving wordt alleen op de onverzadigde versie ingegaan en voorts slechts op het (kwantitatief) hydrologische gedeelte, voorzover van toepassing op de hoge gronden van Nederland. Opties in het model met betrekking to bereging worden wel genoemd maar niet behandeld. Dit geldt ook voor de aan de hydrologische modellering gekoppelde zout(schade) berekening.

2. LABEL

Milieu-aspect: Transport van water en stoffen in de bodem, naar/van het oppervlaktewater en van/naar de atmosfeer in (landbouw) gebieden.

Oorzaak : Vochttransport en het daaraan gekoppelde transport van opgeloste stoffen vindt plaats middels:

- Infiltratie van neerslag en eventuele kunstmatige beregening of bevloeiing in de bodem.
- Oppervlakkige afstroming van niet geïnfiltreerde neerslag naar het oppervlaktewatersysteem.
- Verdamping van bodemvocht rechtstreeks via het bodemoppervlak en indirect via opname door het gewas.
- Capillaire interacties tussen het verzadigd grondwatersysteem en het onverzadigd systeem alsmede binnen het laatstgenoemde systeem.
- Drainage vanuit het verzadigd grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem en naar het verzadigd grondwatersysteem elders.

Effect : Het transport van vocht en opgeloste stof beïnvloedt de momentane hydrologische situatie, die op zijn beurt weer invloed uitoefent op alle bovengenoemde interacties en met name op de volgende voor het waterbeheer van belang zijnde grootheden:

- Verdamping door gewassen.
- Eventuele optredende droogte en zoutschade.
- De hoeveelheid benodigde beregening of bevloeiing ter voorkoming van schade.
- Drainage naar het oppervlaktewatersysteem en de voor het peilbeheer benodigde wateraanvoer.
- Benodigde doorspoeldebieten i.v.m. zoutgehalten.

Type methode : Dynamisch, mathematisch, procesbeschrijvend model; stationair per tijdstap en gebieds-aggregerend.

3. SAMENVATTING :

Naam : DEMGEN / Onverzadigde versie

Methode : De effecten worden bepaald door middel van simulatie in de tijd van de relevante hydrologische processen in de onverzadigde zone. Het model bestaat uit twee deelmodellen:

- Het verdampings- en droogteschadegedeelte op basis van een gewasafhankelijk verband tussen de vochttoestand in de bodem en de verdampingsreductie, met de door de laatste veroorzaakte droogteschade. Optioneel wordt op basis hiervan de beregeningsgift berekend.
- Het onverzadigd stromingsgedeelte op basis van stationaire stroming (Rijtema/de Laat).

De continuïteit wordt in het model verzorgd door het bijhouden van een profiel(water)balans, voor de twee onderscheiden bodemzones (wortelzone en ondergrond) apart.

De simulaties worden uitgevoerd in tijdstappen van ca 10 dagen, voor afzonderlijke, qua eigenschappen homogene rekenoppervlakken (puntniveau) waarna resultaten worden geaggregeerd op gebiedsniveau.

Uitvoer : Het model levert uitvoer op puntniveau (1) en op gebiedsnieveau (2). Belangrijke variabelen die per tijdstap worden geleverd zijn:

- Potentiële en actuele gewasverdamping (1)
- Droogte- (en/of zout-) schade (1)
- De vochttoestand in de bodem (1)
- De capillaire interactie tussen wortelzone en ondergrond (capillaire opstijging/percolatie) (1)
- Interactie tussen onverzadigd en verzadigd grondwatersysteem (drainage/infiltratie) (1)
- Eventueel de benodigde beregeningsgift (1)
- Gebiedswaterbehoefte of -afvoer (2)

Desgewenst kan elke op puntniveau uitgevoerde variabele worden geaggregeerd op gebiedsniveau.

Invoer : In de eerste plaats vergt het model een gebiedsschematisering in rekenoppervlakken. Deze, en de aan elk rekenoppervlak toe te kennen combinatie van fysische karakteristieken, hebben met name betrekking op:

- Bodemeigenschappen
- Gewaseigenschappen

Als tijdsafhankelijke invoer vergt het model:

- Klimatologische invoer, bestaande uit neerslag en open water (Penman) verdamping (decadesommen).
- Grondwaterstanden (decadestanden) op het niveau van het kleinste rekenoppervlak.

Tot slot kunnen in het model diverse van belang zijnde gegevens worden opgegeven, w.o.:

. Een in de tijd constante kwel/wegzijging.
. Beregend/onberegend.
. Onttrekkingen/lozingen t.b.v. andere gebruikers (drinkwater, industrie).
. Een (hydrologische) begintoestand.

Opgemerkt wordt dat in het kader van de PAWN-studie een volledige schematisering van Nederland is gemaakt waarin o.m. 20 standaardgronden (Rijtema), 21 weerstations en 14 gewastypen zijn onderscheiden (Abrahamse et al, 1982). Het gedeelte van deze schematisering m.b.t. de provincies Drenthe, Overijssel en Gelderland is nader toegelicht in Opdam (1981b). Deze basis-schematisering is op flexibele wijze naar eigen inzicht aan te passen.

Beperkingen : Het model is in de eerste plaats bedoeld voor simulatie van de hydrologische ontwikkelingen in droge zomerperioden. De simulatie van andere perioden is slechts correct voor zover deze van belang is als randvoorwaarde voor droge perioden. De simulatie van natte (winter) perioden alsmede van perioden met sterke veranderingen in het hydrologische regime (niet stationaire processen) als zodanig is dus beperkt.

Voorts kent het model in zoverre een beperking voor wat betreft het bepalen van de effecten van ingrepen in het waterbeheer, dat grondwaterstanden bekend moeten zijn, bijvoorbeeld uit een simulatie van de verzadigde grondwaterstroming met een ander model.

De gewasschade-evaluatie is in het huidige model beperkt tot droogte- en zoutschade. In de toekomst zal ook verdrassingsschade worden ingebouwd.

Referenties : DEMGEN is in de vorm van DISTAG (zie hierna) beschreven in Abrahamse et al (1982). Het uitgangspunt voor het berekeningsschema van de stationaire onverzadigde stoming is beschreven in Rijtema (1969). Een handleiding voor het gebruik van DEMGEN wordt gegeven door Waterloopkundig Laboratorium (1983). Op de fysische problematiek rond calibratie en verificatie van het model is ingegaan in Van Vuuren (1982, 1983). De onverzadigde versie van DEMGEN is belicht in Van Vuuren (1984).

4. ONDERDEEL NETWERK

De hier beschreven onverzadigde versie is een optie in het model DEMGEN. De basisversie gebruikt i.p.v. de grondwaterstand als invoer een drainagefunctie, een eenduidig verband tussen grondwaterstand en drainage, die als zodanig de verzadigde stroming vertegenwoordigt. DEMGEN zelf is weer een onafhankelijk draaibare versie van het model DISTAG (District Agricultural Model), dat als subroutine gebruikt wordt in diverse waterverdelingsmodellen. Waterverdelingsmodellen, waarin de hydrologische infrastructuur van gebieden is vertegenwoordigd, zijn met name DM (het PAWN Distribution Model), ARIADNE (Analytical Resource for Integrated Allocation and Distribution problems in Networks) en ABOPOL (Analysis Boezem Polder).

5. GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING

5.1. Algemene inleiding

DEMGEN (DISTAG) is in het kader van de PAWN-studie (Rijkswaterstaat, 1982) in opdracht van RWS ontwikkeld door de Rand Corporation (USA), in samenwerking met het WL Delft. Het model is sedert 1978 operationeel en is reeds op ruime schaal toegepast. Verder is het ten dele getoetst op meetgegevens. Een definitieve toetsing en een uitgebreid gevoeligheidsonderzoek zijn momenteel in uitvoering. Afronding hiervan

wordt eind 1985 verwacht. In het kader hiervan zal tevens een aantal opties aan het model toegevoegd worden, voorzover die nog niet beschikbaar zijn. Dit heeft o.m. betrekking op verdrassingsschade. De belangrijkste uitgangspunten die bij de modellering gekozen werden zijn:

- Het model heeft ten doel het bepalen van de waterbehoefte van landbouwgebieden, alsmede de droogte- en zoutschade in zulke gebieden, ten gevolge van het niet of slechts ten dele voorzien in de berekende waterbehoefte.
- Uitvoer op 10-daagse basis (decaden) en op grond van routinematig verzamelde(-bare) gegevens. Dit houdt met name in dat klimatologische gegevens van KNMI-stations gebruikt zouden moeten worden en fysische karakteristieken, die af te leiden zijn uit literatuurgegevens (bodemkaart, bestaande grondwaterbestanden).
- In de ruimte gezien moet de uitvoer gedifferentieerd blijven naar gewastype, meer dan naar geografische ligging van rekenoppervlakken. Dit is speciaal van belang voor de evaluatie van kosten en baten van watervoorziening t.b.v. in oogstwaarde sterk verschillende gewassen.
- De nadruk moet wat betreft de modellering liggen op de hydrologie van droge zomerperioden. De modellering van de overige perioden moet echter nog wel een voldoende nauwkeurige randvoorwaarde voor droge perioden opleveren.

Hieruit blijken al enige duidelijk modelkeuzes die nodig zijn om bepaalde doelstellingen te halen, maar die tevens beperkingen inhouden voor het gebruik van DEMGEN. Op de consequenties hiervan wordt in het volgende, waar nodig, ingegaan.

5.2. De methode

Het model simuleert de voor genoemde doelstellingen relevante hydrologische processen. Het hydrologisch systeem van de onverzadigde zone is opgesplitst in twee deelmodellen met hun interacties: het verdampingsgedeelte en het onverzadigd stromingsgedeelte.

Het verdampingsgedeelte is gebaseerd op:

. Potentiële gewasverdamping op basis van de (KNMI) open water verdamping en een tijdsafhankelijke gewasfactor.
. Een verdampingsreductiefunctie waarin de actuele gewasverdamping wordt berekend als functie van potentiële verdamping en de bodemvochtspanning in de wortelzone, volgens de functie:

$$Ea = Ep \qquad \text{voor } \psi w < \psi r$$
$$Ea = Ep\ [(4.2 - \log\ \psi w)/(4.2 - \log\ \psi r)] \qquad \text{elders}$$

Hierin is: Ea = actuele gewasverdamping. (mm/dag)
Ep = potentiële gewasverdamping. (mm/dag)
ψw = gemiddelde vochtspanning in wortelzone. (cm)
ψr = reductiepunt. (cm)
(Standaard: log ψr = 2.7)

. Een droogteschadefunctie, waarin de oppervlaktefractie van het gewas dat afsterft wordt berekend op basis van de verdampingsreductie (Ea/Ep) en enige gewas- en tijdsafhankelijke parameters.

Het onverzadigd stromingsgedeelte is gebaseerd op:

. Een profielschematisering bestaande uit een homogene wortelzone waarvan de dikte afhankelijk is van gewas- en bodemtype, maar constant in de tijd, en een ondergrond die reikt tot onder de diepste grondwaterstand in de tijd. De ondergrond mag qua eigenschappen in principe heterogeen zijn in verticale zin.
. Een stationair rekenschema gebaseerd op het principe van Rijtema / de Laat. Hiermee wordt de capillaire opstijging berekend als functie van de tijdstapgemiddelde diepte van het freatisch vlak en vochtspanning op het grensvlak wortelzone/ondergrond, volgens de volgende basisvergelijking:

$$v = k\ (\psi)\ \left[d\psi/dz - 1\right]$$

Hierin is: v = capillaire flux. (mm/dag)
k = locale onverzadigde doorlatendheid. (mm/dag)
ψ = locale zuigspanning. (mm)
z = hoogte boven phreatisch vlak. (mm)

. Een op de grondwaterstandafhankelijke veldcapaciteit gebaseerde berekening van de capillaire flux in neerwaartse richting (percolatie of wortelzoneverlies), zodanig dat het boven veldcapaciteit in de wortelzone aanwezige vocht doorstroomt naar de ondergrond.

De koppeling tussen beide deelmodellen wordt verzorgd door een in elke tijdstap opgemaakte waterbalans voor wortelzone en ondergrond afzonderlijk. De laatste balans levert als restpost de drainage uit het profiel.

Voorts zijn de volgende punten uit het berekeningsschema van speciaal belang:

. De berekeningen worden uitgevoerd voor zgn. PLOTS, het kleinste rekenoppervlak, en de resultaten desgewenst geaggregeerd voor grotere gebieden. Op gebiedsniveau maakt het model tevens een waterbalans op waaraan ook de netto afvoer van verhard (stedelijk) gebied en de netto aanvulling van het open water (neerslag en verdamping) bijdragen. Als eindresultaat berekent het model de voor het handhaven van open waterpeilen benodigde wateraanvoer.
. De potentiële verdamping wordt naar ratio van het afgestorven oppervlak (droogte- en /of zoutschade) gereduceerd in tijdstappen na het optreden van schade. De afgestorven fractie wordt geaccumuleerd en wordt pas weer op nul gesteld bij de start van het volgende rekenjaar. Het niet met gewas bedekte oppervlak verdampt op een lager niveau dan het gewas zelf.
. Er wordt een vaste interceptie van neerslag (2.5%) aangehouden.
. Optioneel bepaalt het model tevens de voor het voorkomen van droogteschade benodigde beregeningsgift. Hiervoor zijn twee verschillende beregeningsmodellen in DEMGEN beschikbaar, beide toepasbaar op zowel grondwater- als oppervlaktewaterberegening.

5.3. Uitvoer

Op PLOT-niveau voert DEMGEN per tijdstap uit:

- Potentiële en actuele gewasverdamping.
- Optredende gewasschade (verdroging en zout) zowel in afgestorven fractie oppervlak als in geldswaarde.
- De geaccumuleerde afgestorven fractie gewas.
- De benodigde beregeningsgift.
- Het deficiet en de gemiddelde vochtspanning in de wortelzone.
- Het deficiet in de ondergrond.
- De drainage uit of infiltratie naar de onverzadigde ondergrond.

Op gebiedsniveau zijn de belangrijkste resultaten per tijdstap:

- De totale droogte- en zoutschade.
- De (landbouw) beregeningsbehoefte.
- De waterbehoefte inclusief andere gebruikers, danwel het overschot.
- Eventueel benodigde doorspoeldebieten i.v.m. waterkwaliteit.

5.4. Invoer

In de eerste plaats vergt het model een gebiedsschematisering in PLOTS, die gekarakteriseerd zijn naar gewas en alle hierna te noemen fysische karakteristieken. Zowel gebiedsschematisering als fysische karakteristieken zijn constant in de tijd.

Op PLOT-niveau worden de volgende fysische karakteristieken gevraagd:

- Gewaskarakteristieken: (Potentiële) gewasverdampingsfactoren per tijdstap (vaste opeenvolging per rekenjaar), reductiepunt m.b.t. reductie van de actuele verdamping, droogteschadefactoren, dikte van de wortelzone (mede aan de hand van bodemtype wortelzone).
- Bodemfysische karakteristieken: pF-kromme voor zowel wortelzone als ondergrond, doorlatendheidskarakteristiek voor de ondergrond alleen.

Desgewenst kunnen de volgende tijdsonafhankelijke gegevens worden ingevoerd:

. Onttrekkingen/lozingen door andere gebruikers (drinkwater,industrie).
. Kwel of wegzijging naar/van de ondergrond.
. Infiltratie uit peilbeheerst open water systeem.
. Codering beregening uit grondwater of oppervlaktewater.

Op gebiedsniveau worden de volgende tijdsonafhankelijke gegevens ingevoerd:

. Neerslag (tijdstapsom).
. Open water verdamping (idem).
. Grondwaterstand (op tijdstapgrenzen).

Tot slot kan een begintoestand (grondwaterstand, deficieten) worden opgegeven op PLOT-niveau.

5.5. Benodigde inspanning

Een eerste berekening met de basisversie voor gebieden in Nederland, zowel op PLOT- als op gebiedsniveau, kan met zeer geringe voorbereidingen uitgevoerd worden op basis van de beschikbare PAWN-schematisering. Dit houdt tevens in dat met het klimatologische DEMGEN bestand (1930-heden) gerekend kan worden. Naarmate men meer nauwkeurigheid verlangt zullen de inspanningen m.b.t. de invoer toenemen. Dit betreft bijvoorbeeld het bepalen van bodemfysische karakteristieken, het gebruik van andere weerstations, en het bepalen van drainagefuncties. Voor een berekening met de onverzadigde versie moeten ten alle tijde grondwaterstanden verzameld worden. Vanwege de relatief geringe hoeveelheid invoergegevens zal de

voorbereiding van een berekening voor een willekeurig gebied in Nederland, inclusief het vaststellen van de gebiedsschematisering, in de meeste gevallen beperkt blijven tot enige weken à een half jaar, afhankelijk van de gebiedsgrootte en gewenste nauwkeurigheid. Een keerzijde van de eenvoud van schematisering en invoer kan in sommige gevallen zijn dat extra inspanning nodig is m.b.t. de interpretatie van berekeningsresultaten.

Vanwege de eenvoudige concepten die DEMGEN toepast zijn de rekenkosten relatief laag, zoals blijkt uit onderstaande voorbeelden:

Type berekening.	Aantal PLOTS	Aantal rekenjaren	cpu-sec	kosten 1) fl.	cpu-sec per PLOT.jaar
Simulaties Hupsel	1	3 - 7	41 - 45	11,= - 13,=	14 - 6
Berekening gebied Twenthekanalen.	63	49	1183	480,=	0.4

1) Totale kosten, zoals door de Dienst Informatie Verwerking aan RWS-diensten berekend. De cpu-sec hebben alleen betrekking op zuivere rekentijd.

Bovengenoemde cijfers hebben betrekking op de RWS-Univac computer. Het model vergt ca 65 Kb geheugenruimte.

5.6. Aannamen en beperkingen

De belangrijkste beperking van zowel de basisversie als de onverzadigde versie van DEMGEN is dat de gevolgen van ingrepen in het hydrologisch systeem niet gesimuleerd kunnen worden, tenzij grondwaterstanden danwel drainagefuncties in de beïnvloedde situatie op externe wijze bepaald zijn. Methoden hiervoor zijn in onderzoek. Dit betreft met name ingrepen in de ontwatering, onttrekkingen uit het grondwater en de grootschalige toepassing van beregening.

Voorts zij vermeld dat het stationaire rekenschema de simulatie van instationaire processen (vochtfronten e.d.) niet toelaat. Voorts is de hysteresis in bodemfysische en drainagekarakteristieken (dit laatste geldt alleen voor de basisversie) verwaarloosd, hetgeen de simulatie in

natte perioden relatief onnauwkeurig maakt. Tot slot kunnen de aannamen m.b.t. de vochtprocessen in de wortelzone mogelijkerwijs gevoelig zijn wanneer, zoals in natte voorjaren, dunnere wortelzones optreden dan in het model aangenomen.

5.7. Betrouwbaarheid/gevoeligheid

Sedert 1980 is reeds veel onderzoek verricht naar de betrouwbaarheid en gevoeligheid van DEMGEN. Model-evaluaties zijn gegeven in Waterloopkundig Laboratorium (1984 a,b). Gevoeligheidsonderzoek is uitgevoerd in Van der Giessen (1984) en Van Vuuren (1983). Over de toetsing op gebiedsniveau is gerapporteerd in Van Vuuren (1982,1983) en over die op puntniveau in Van Vuuren (1984).

De voorlopige conclusie is dat DEMGEN resultaten het meest gevoelig zijn voor:

- De aangenomen dikte van de wortelzone.
- De drainagefunctie (basisversie) danwel grondwaterstanden (onverzadigde versie).
- De pF-kromme voor de wortelzone.
- De bodemfysische karakteristieken voor de ondergrond. Opgemerkt wordt dat in de basisversie alle modelresultaten in mindere of meerdere mate gevoelig zijn, maar in de onverzadigde versie alleen de berekende vochttoestand in de ondergrond en drainage (met name niet de berekende verdamping). Overigens is deze gevoeligheid slechts van belang voor gebieden met relatief ondiepe (< 1.5-2 m) grondwaterstanden en relatief goed doorlatende ondergronden.
- Eventuele aangenomen kwel/wegzijging, onttrekkingen, etc.

Voor wat betreft de betrouwbaarheid van het model (toetsing) luidt de voorlopige conclusie (Van Vuuren, 1984) dat DEMGEN, gegeven de doelstellingen bij het model,een voldoende nauwkeurige simulatie van de hydrologische processen oplevert in droge perioden. De simulatie in natte perioden, in het bijzonder in perioden met sterke aanvulling van de profielvochtinhoud (adsorptie in sommige najaren) en perioden met

een sterke uitdroging (desorptie in sommige voorjaren) zou echter verbeterd moeten worden met het oog op het eventueel inbouwen van een verdrassingsschade concept.

5.8. Relatie met andere methoden resp. normen e.d.

DEMGEN is in feite een samenstel van op de computer geïmplementeerde concepten die reeds in wijde kring in gebruik waren. (Stationaire onverzadigde stroming, droogteschadefunctie, drainagefunctie). De resultaten zijn dus in overeenstemming met die van dergelijke methoden. DEMGEN heeft daaraan evenwel, afgezien van het aanbrengen van interacties tussen diverse deelconcepten, een beregeningsconcept toegevoegd. Hierdoor kan, in tegenstelling tot andere methoden, in eenzelfde berekening zowel antwoord worden gegeven op vragen m.b.t. benodigde hoeveelheden water e.d., als op vragen m.b.t. de effecten van het al of niet verstrekken ervan. Voorts kunnen, via koppeling met waterverdelingsmodellen, tegelijkertijd de onderlinge interacties tussen gebieden op dezelfde wijze geëvalueerd worden. Dit maakt het model uitermate geschikt voor zowel historische simulatie van hydrologische ontwikkelingen met oog op de rentabiliteit van watervoorziening e.d., als voor de toepassing voor 'real time' voorspelling van de hydrologische toestand in gebieden en de evaluatie van te nemen maatregelen m.b.t. het waterbeheer.

5.9. Voorbeelden van toepassingen

De eerste, en tevens meest omvangrijke, toepassing van DEMGEN is de toepassing in het kader van voornoemde PAWN-studie. De resultaten daarvan m.b.t. de provincies Drenthe, Overijssel en Gelderland zijn nader belicht in Opdam (1982b). Voorts is DEMGEN ingezet voor de volgende studies t.b.v. adviesaanvragen bij RWS/WWZO:

- Watervoorziening Twenthekanalen (Opdam, 1981a, 1982a, 1983).
- Droogte-evaluatie van de zomers van 1982 en 1983 (Wesseling, 1983, 1984).
- Diverse kleinere studies m.b.t. watervoorziening en m.b.t. het bepalen van de effecten van grondwaterpeilverlagingen op de landbouw.

Momenteel wordt DEMGEN o.m. ingezet in diverse provinciale waterhuishoudingsstudies: Overijssel, Groningen en Noord Holland, terwijl een 'real time' waterverdelingsmodel voor de provincie Drenthe op basis van DEMGEN in voorbereiding is. Tot slot is onlangs een WWZO vergelijkende studie met DEMGEN in het kader van het TUS-10 plan (Provincie Drenthe) gestart.

Buiten deze toepassingen in de productieve sfeer is DEMGEN bij WWZO in het kader van de toetsing van het model zelf toegepast op beide proefgebieden Hupsel (Van Vuuren, 1982, 1984) en Sleen. Hierover is veelal gerapporteerd in interne WWZO notities.

5.10. Achtergrondinformatie

Het beheer van DEMGEN en de waterverdelingsmodellen berust bij een overleggroep, waarin WL en RWS zitting hebben, die voor de beschikbaarstelling, alsmede voor de nodige begeleiding en coördinatie van modelversies zorg draagt. Sedert 1980 zijn reeds een aantal aanpassingen in het model aangebracht, mede naar aanleiding van voornoemd gevoeligheids- en betrouwbaarheidsonderzoek. Dit onderzoek, inclusief studies met betrekking tot het inbouwen van een aantal aanvullende opties, is nog gaande. Het ligt in de bedoeling dat eind 1985 een eindrapport m.b.t. DEMGEN gereed is, waarin behalve een definitieve modelbeschrijving, tevens randvoorwaarden voor het gebruik van DEMGEN zullen worden gegeven. Dit rapport zal tevens voorzien in een gebruikershandleiding, waarin ook de toegang tot nog definitief vast te stellen gegevensbestanden en schematiseringsprocedures wordt aangegeven.

REFERENTIES

ABRAHAMSE, A.H., BAARSE, G. en VAN BEEK, E.:
Watermanagement in the Netherlands: Vol XII, Model for Regional Hydrology, Agricultural Water Demand and Damages from Drought and Salinity, RAND-Note N-1500/ 12-NETH, Santa Monica, USA, 1982.

OPDAM, H.J.: De watervoorziening uit de Twenthekanalen. RWS/WWZO interimnota 81.6, januari 1981. (a)

OPDAM, H.J.: De schematisering van het waterhuishoudkundig systeem van Drenthe, Overijssel en Gelderland in de PAWN-studie. RWS/WWZO nota 82.1, aug. 1981. (b)

OPDAM, H.J.: Gevolgen van de watervoorziening vanuit de Twenthekanalen. RWS/WWZO nota 82.12, mei 1982. (a)

OPDAM, H.J.: De landbouw van Drenthe, Overijssel en Gelderland in de PAWN-studie. RWS/WWZO nota 82.17, juli 1982. (b)

OPDAM, H.J.:Policy analysis for the Twenthekanaal watermanagement, Proc. IUGG/IAHS symp. 'Scientific Procedures Applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems', Hamburg, 22-26 aug, 1983.

RIJKSWATERSTAAT: Policy Analysis for the National Watermanagement of the Netherlands. Rijkswaterstaat communications nr. 31, The Hague, 1982.

RIJTEMA, P.E.: Soil moisture forecasting. Report 513, ICW, Wageningen, 1969.

VAN DER GIESSEN, A.: Gevoeligheidsonderzoek DEMGEN. RWS/WWWH nota 84.06, mei 1984.

VAN VUUREN, W.E.: Calibration an Verification of DEMGEN (DEmand GENerator) on data of the Hupselse Beek Area (Netherlands). In: Proc. Symp. Hydr. Res. Basins, Sonderh. Landeshydr., Bern, 1982, 595-604.

VAN VUUREN, W.E.: Onderzoek in de proefgebieden Hupsel en Sleen; rapportage over de periode 8007-8112; DeelII: Een eerste toetsing van DEMGEN in Hupsel. RWS/WWZO nota 83.24, Arnhem, 1983.

VAN VUUREN, W.E.: Validation of the Agrohydrological Model DEMGEN (Demand Generator) on Point Data from the Hupselse Beek Area in the Netherlands. Bijdrage aan RIZA-Symposium, München, 1-5 oktober 1984.

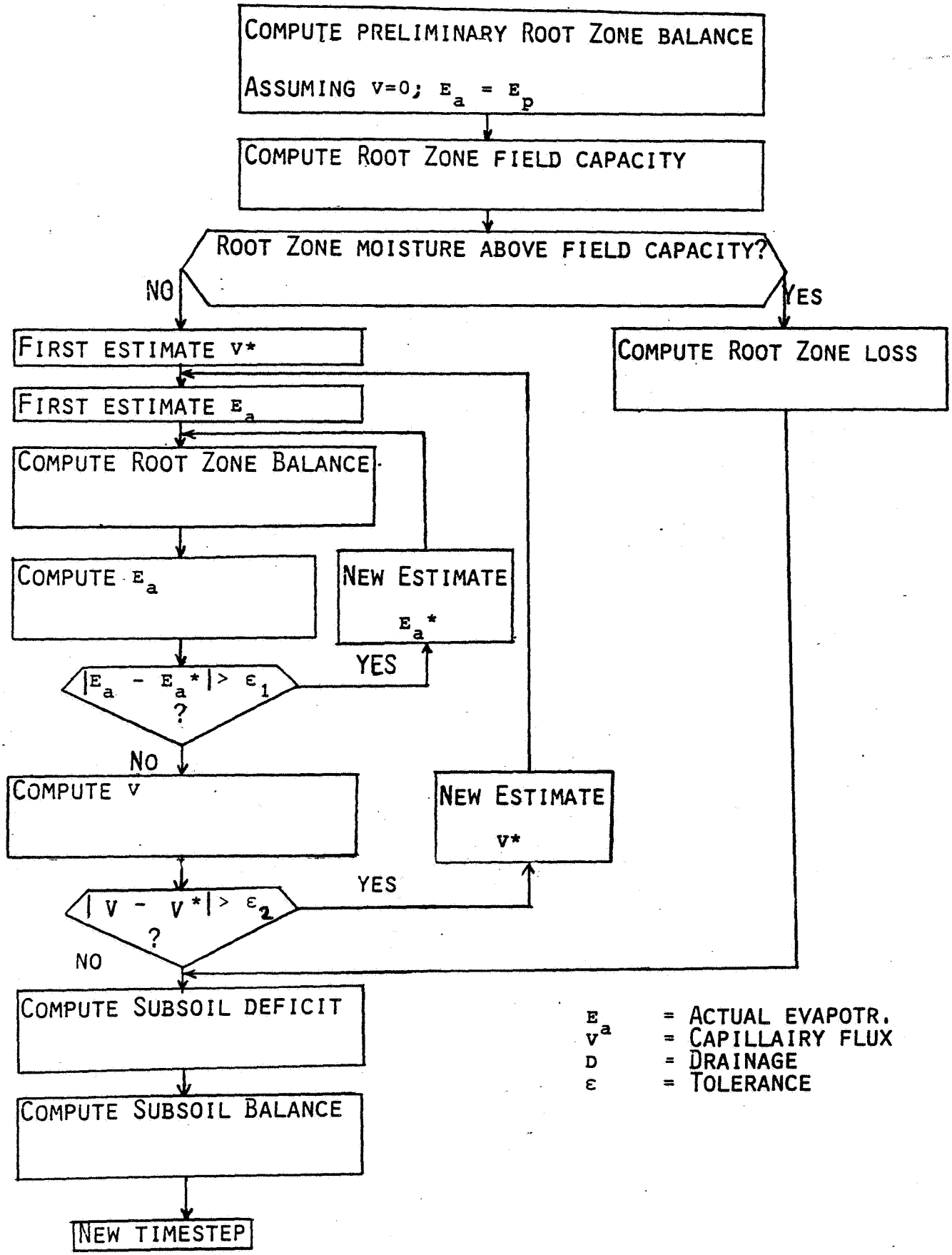
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM: Handleiding DEMGEN, R1230-D83/001, Delft, 1983.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM: Evaluatie van het hydrologisch gedeelte van het programma DEMGEN in het gebied van de hoge gronden. WL R 1230-R82/001, juni 1984. (a)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM: Berekening basisdrainage in DEMGEN. WL R 1230-R80/001, juni 1984. (b)

WESSELING, B.: Droogte 1982. RWS/WWZO nota 83.10, juli 1983.

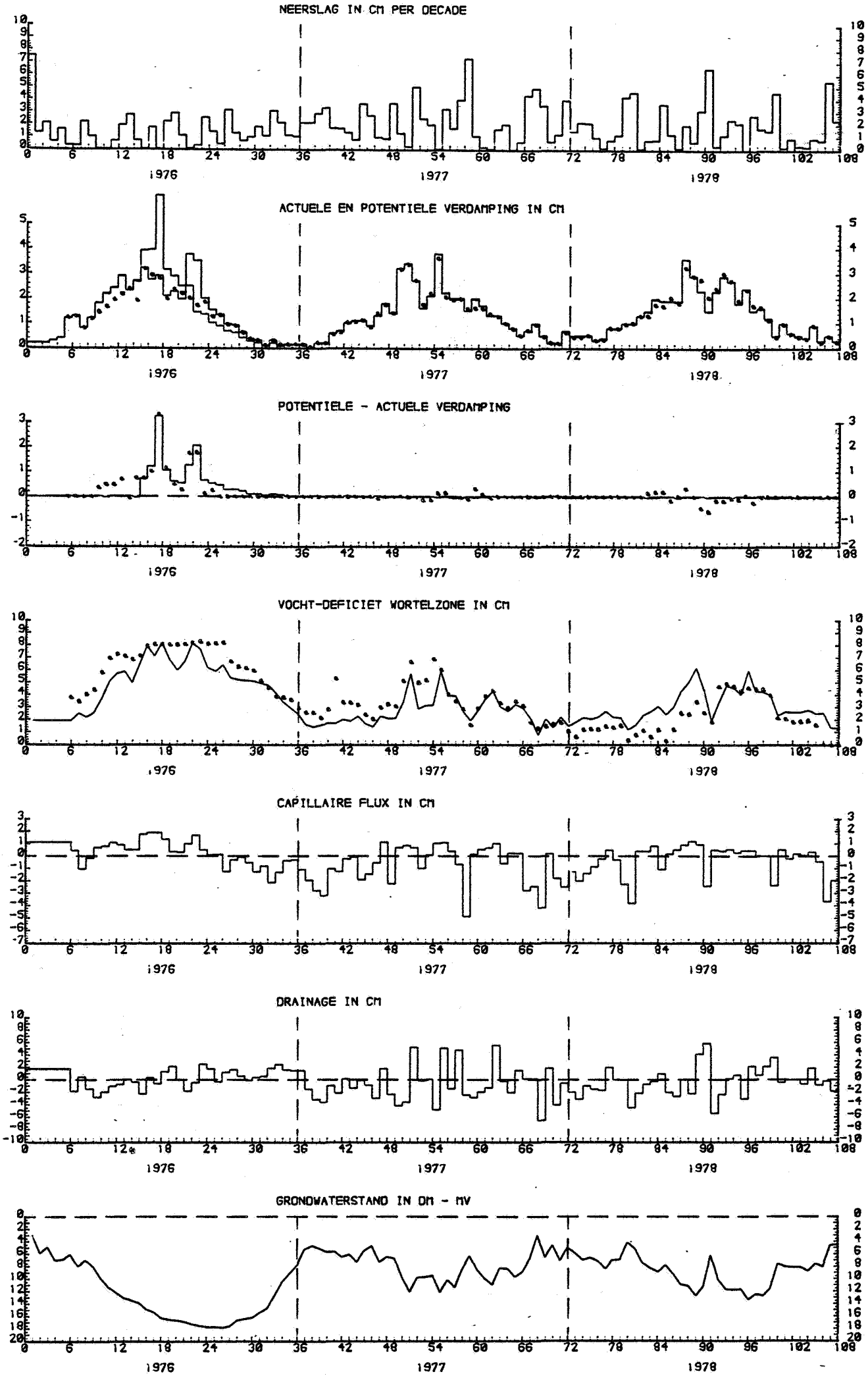
WESSELING, B.: Zomerhalfjaar 1983. RWS/WWZO nota 84.1, januari 1984.



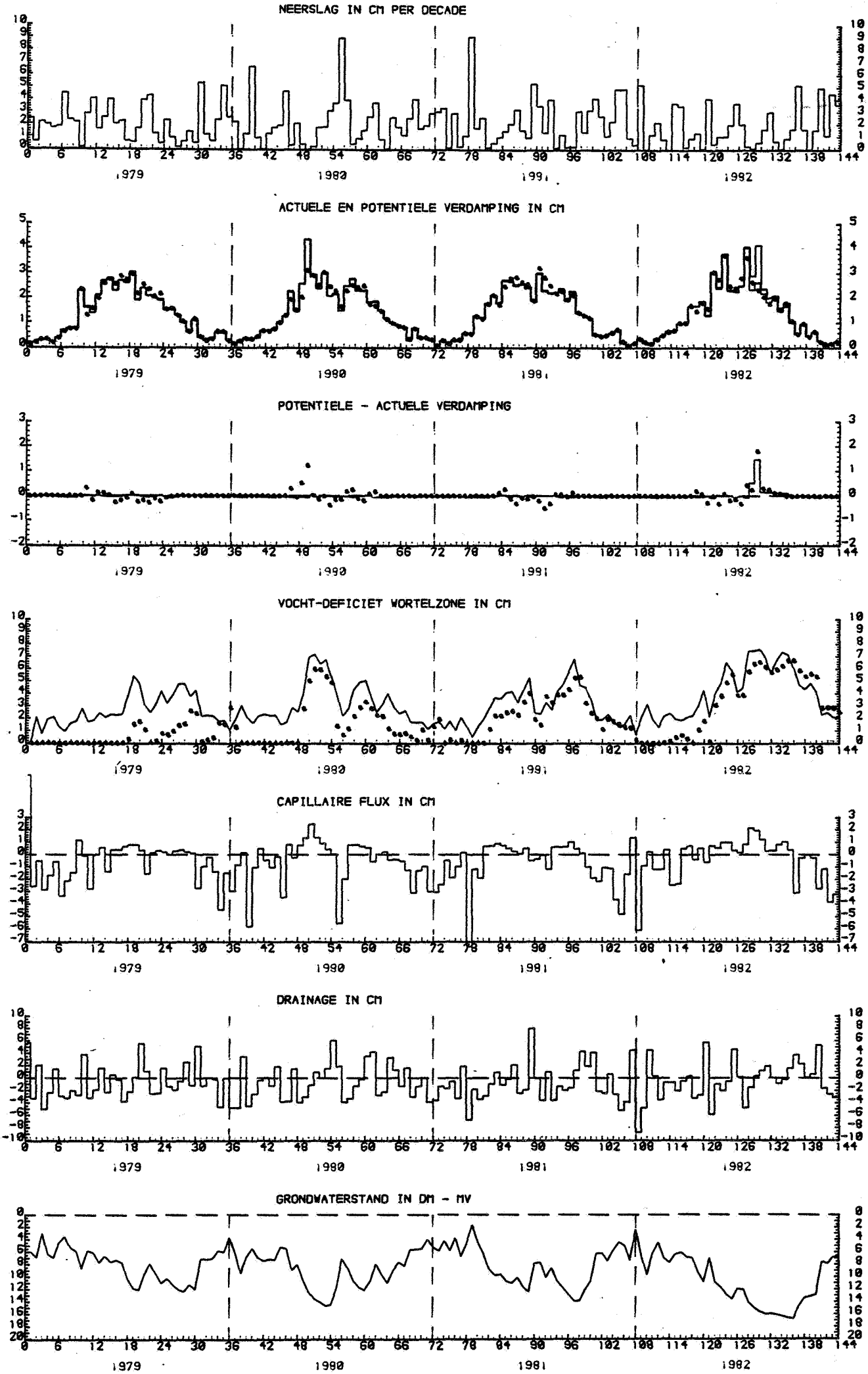
FLOW CHART OF PLOTCOMPUTATIONS IN DEMGEN
UNSATURATED VERSION

CALIBRATIE VAN HET MODEL D E M G E N

Alvorens tot calibratie over te gaan zijn enige aanpassingen in het model aangebracht, waarvan slechts de hierna genoemde invloed had op de berekende actuele verdamping (E_{act}: de pF-kromme van de wortelzone, normaal in DEMGEN ingevoerd door middel van een analytische functie, werd ter verhoging van de nauwkeurigheid in tabelvorm ingevoerd. Met deze modelversie is een referentieberekening gemaakt. In de droge zomerperiode werden afwijkingen geconstateerd tussen berekende en gemeten E_{act}, zodanig dat de afwijking in de decade met maximum verdampingsreductie (E_{pot}-E_{act}) -20 % ten opzichte van de gemeten waarde bedroeg. Omdat de bodemvochtinhoud van de wortelzone in dezelfde periode goed werd weergegeven, werd de oorzaak van de afwijkingen geheel aan de in DEMGEN gehanteerde verdampingsfunctie toegeschreven. Aanpassing hiervan bleek het meest effectief wanneer het reductiepunt (ψ red) afhankelijk werd gemaakt van E_{pot}. De functie log (ψ red) = 3.3-0.211xE$_{pot}$ (log cm), waarin E_{pot} in (mm/dag), leverde zonder verdere aanpassing de optimale resultaten. De berekening met deze functie is aangehouden als definitieve calibratieberekening. Opgemerkt wordt dat deze functie rechtstreeks afkomstig is uit veldonderzoek (ICW, Sinderhoeve, aardappelen) en dat de verdamping zeer gevoelig bleek voor aanpassing in de parameters van de functie.



BEREKENING MET HET MODEL : DEMGEN



BEREKENING MET HET MODEL : D E M G E N

MUST

P.J.M. de Laat

1. NAAM: MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water Table)

2. LABEL

milieu-aspect: Verticaal vochttransport in het onverzadigde deel van de bodem. Berekening van de verdamping.

oorzaak : Vochttransport is het gevolg van neerslag, verdamping, wegzijging en kwel.

effect : Vochttransport beinvloedt de actuele verdamping, het beschikbaar bodemwater, het vochtgehalte en de grondwaterstand.

type methode : Wiskundig, dynamisch procesbeschrijvend model.

3. SAMENVATTING

naam : MUST

methode : De onverzadigde zone is schematisch verdeeld in een wortelzone en een ondergrond. In de wortelzone is de gradient van de hydraulische potentiaal gelijk gesteld aan nul. De wateropname van de wortels is een functie van de drukhoogte. In de ondergrond wordt voor iedere tijdstap de stromingssituatie gekarakteriseerd door een combinatie van stationaire stromingstoestanden die overeenkomen met de flux door respectievelijk de boven- en onderrand. De lengte van de tijdstap bedraagt een of meer dagen. De actuele verdamping van bodem en gewas wordt door het model berekend uit meteorologische gegevens of uit potentiele verdampingscijfers. Beregening is mogelijk volgens een door de gebruiker te specificeren strategie. De randvoorwaarde aan de onderzijde kan gedefinieerd worden met de flux, de grondwaterstand of een relatie tussen deze twee.

uitvoer : Per tijdstap worden de volgende grootheden uitgevoerd:
- verdamping
- grondwaterstand of flux door onderrand
- verzadigingstekorten (bergingsvermogen)
- flux door onderrand wortelzone
- drukhoogte onderrandwortelzone.

invoer : De tijdsonafhankelijke gegevens betreffen de dikte van de wortelzone, de bodemfysische eigenschappen van de te onderscheiden lagen en eventueel het gewastype. De tijdsafhankelijke invoer betreft meteorologische gegevens of potentiele verdamping en eventueel de grondwaterstand of de flux door de onderrand.

beperking : Het model is minder geschikt voor niet-rigide gronden en voor situaties met diepe grondwaterstanden of neerslag in de vorm van sneeuw. De simulatie van oppervlakkige afvoer en van schijngrondwaterspiegels is maar zeer beperkt mogelijk.

referenties : De theoretische achtergrond is uitvoerig beschreven in het proefschrift van De Laat (1980). Voor de gebruiker is een gedetailleerde gebruikershandleiding beschikbaar (De Laat, 1985). Zie verder literatuuropgaven onder punt 10.

4. ONDERDEEL NETWERK

Voor een geintegreerde aanpak van grondwaterstroming en verdamping kan gebruik worden gemaakt van het quasi drie-dimensionale model GELGAM. Hiermee zijn de gevolgen van ingrepen in de regionale waterhuishouding te voorspellen. MUST vormt in dit model de schakel tussen de verdamping van bodem en gewas en de waterbeweging in de verzadigde ondergrond.

5. GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING

5.1. Algemene inleiding

De pseudo stationaire benaderingswijze van capillaire opstijging werd in de zestiger jaren voor een belangrijk deel ontwikkeld bij het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen. Voor een hierop gebaseerd rekenschema van Rijtema (1971) schreef De Laat (1972) een computerprogramma. Het programma Rijtema/De Laat beperkt zich tot de simulatie van capillaire opstijging ten gevolge van een opeenvolging van verdampingsoverschotten.

De verdere ontwikkeling tot een algemeen model voor onverzadigde stroming op basis van de pseudo stationaire benaderingswijze vond plaats bij het International institute for Hydraulic and Environmental engineering (IHE) te Delft (De Laat, 1980). De studie werd verricht in het kader van de werkzaamheden van de Commissie bestudering Waterhuishouding Gelderland (CWG). In de periode 1972 - 1978 zijn verschillende versies van het model in gebruik genomen. De laatste versie, veelal aangeduid met de naam UNSAT, vormt tevens een essentieel onderdeel van het integraal waterbeheermodel GELGAM dat onder auspicien van de CWG in dezelfde periode tot stand kwam (De Laat & Awater, 1978).

In de jaren 1981/82 werd het historisch gegroeide model UNSAT geheel herschreven, waarbij zoveel mogelijk aan de wensen van de gebruikers t.a.v. de verschillende soorten randvoorwaarden is tegemoetgekomen. Daarnaast werd het verdampingsgedeelte van het model aangepast aan de inzichten van een werkgroep Verdamping. De definitieve versie van de gebruikershandleiding (De Laat, 1985) verscheen na het gereed komen van het eindrapport van genoemde werkgroep (Rapport van de ad hoc groep Verdamping, 1984). Om verwarring met oudere versies te voorkomen kreeg het model een nieuwe naam: MUST.

Verificatie van MUST heeft voornamelijk plaatsgevonden t.a.v. de gesimuleerde grondwaterstand maar incidenteel ook t.a.v. vochtgehalte en drukhoogte (Bouma & De Laat, 1981).
Het model wordt door verscheidene instellingen op uitgebreide schaal toegepast om de gevolgen van grondwaterstandsverandering en beregening op de gewasverdamping (en de hier nauw mee samenhangende produktie) te voorspellen. Hierbij wordt in het algemeen de potentiele verdamping als randvoorwaarde ingelezen en geen gebruik gemaakt van het verdampingsgedeelte van het model. MUST is ook toegepast bij de vervaardiging van regionale en provinciale gevoeligheidskaarten voor grondwaterstandsverlaging (Bouma, 1979). Het model wordt verder gebruikt voor onderzoek, onder meer op het gebied van natuurbeheer en plantengroei in relatie tot de vochthuishouding (Van den Berg, 1975; Van Wirdum, 1981; Willemsen, 1982).

5.2. De methode

MUST beschrijft de verticale vochtbeweging in het onverzadigde deel van de bodem. De onderrand van het model ligt in het verzadigde grondwatersysteem, juist beneden de laagste grondwaterstand. Het traject tussen maaiveld en onderrand is schematisch verdeeld in een wortelzone met een constante dikte en een ondergrond. Omdat de stroming in de wortelzone in belangrijke mate wordt bepaald door de wateropname van de wortels, is de gradient van de hydraulische potentiaal in de wortelzone gelijk gesteld aan nul.
In tegenstelling tot vele andere modellen die gebruik maken van een numerieke benadering van de partiele differentiaalvergelijking voor onverzadigde stroming, simuleert MUST het vochttransport in de ondergrond met een opeenvolging van stationaire stromingstoestanden. Het gebruik van de pseudo stationaire oplossingstechniek is in principe alleen geschikt voor situaties met capillaire opstijging in combinatie met opwaartse stroming vanuit het verzadigde grondwatersysteem. Is

de flux nabij de waterspiegel echter naar beneden gericht dan is er uiteraard geen sprake van een (bij benadering) stationaire stromingssituatie. In dat geval maakt MUST gebruik van een combinatie van stationaire stromingstoestanden overeenkomend met respectievelijk de flux door de bovenrand en de onderrand van de ondergrond. Speciale procedures zijn ontwikkeld voor het simuleren van perioden met afwisselend neerslag- en verdampingsoverschot waarbij rekening wordt gehouden met hysteresis. De oplossingstechniek maakt veelvuldig gebruik van het bergingsvermogen, hier verzadigingstekort (saturation deficit) genoemd. Het verzadigingstekort van (een deel van) de onverzadigde zone is het volume water per oppervlakte eenheid dat nodig is om (het betreffende deel van) de grond met water te verzadigen.
De onderrandvoorwaarde van het model wordt gedefinieerd met een flux, maar de mogelijkheid bestaat om als onderrandvoorwaarde de grondwaterstand of een (willekeurige) relatie tussen de grondwaterstand en de flux door de onderrand te definieren. In dat geval wordt de flux met een iteratieve procedure opgelost.
Voor de berekening van de bovenrandvoorwaarde moet per tijdstap de neerslag en de potentiele verdamping worden opgegegeven. Bij een verder gaande uitdroging van de wortelzone zal de berekende actuele verdamping steeds meer bij de potentiele verdamping achterblijven. De mate waarin dit gebeurt wordt bepaald door de wortelonttrekkingsfunctie, een empirische relatie tussen relatieve verdamping en drukhoogte in de wortelzone.
Daarnaast bestaat de mogelijkheid om voor ieder willekeurig gewas de verdamping te berekenen uit meteorologische gegevens. Voor het gemak zijn de parameters en gewasfactoren voor zeven typen grondgebruik voor Nederlandse omstandigheden standaard opgenomen in MUST. Het verdampingsmodel maakt onderscheid tussen evaporatie van interceptiewater, transpiratie en bodemevaporatie. Voor ieder gewas is een zekere capaciteit van het interceptiereservoir gedefinieerd. Transpiratie treedt pas

op nadat het water uit het interceptiereservoir is verdampt. De transpiratie wordt berekend met een op de methode van Penman gebaseerde benadering volgens het Rapport van de ad hoc groep Verdamping (1984). De bodemverdamping wordt gelijk gesteld aan een referentieverdamping, vermenigvuldigd met een factor die gerelateerd is aan de drukhoogte in de wortelzone.
Tenslotte bestaat de modelijkheid om met MUST de behoefte aan, en de gevolgen van beregening te simuleren volgens een van te voren gedefinieerde strategie.

5.3. Uitvoer

De volgende tijdsafhankelijke variabelen worden uitgevoerd

1 gesommeerde hoeveelheid beregeningswater per tijdstap
2 gesommeerde referentieverdamping per tijdstap
3 potentiele evapotranspiratie (per tijdstap en gesommeerd)
4 actuele evapotranspiratie (per tijdstap en gesommeerd)
5 gesommeerde verdamping van interceptiewater per tijdstap
6 grondwaterstand
7 flux door de onderrand
8 verzadigingstekort wortelzone
9 verzadigingstekort gehele profiel
10 verzadigingstekort wegzijgingsprofiel
11 flux door de onderrand van de wortelzone
12 drukhoogte aan de onderzijde van de wortelzone.

De items 2 en 5 zijn uiteraard niet van toepassing indien de potentiele verdamping als randvoorwaarde wordt ingevoerd.
Er bestaat geen beperking ten aanzien van de keuze van de lengte van de tijdstap, behalve wanneer gebruik wordt gemaakt van het verdampingsgedeelte van het model. In dat geval moet de lengte van het tijdsinterval worden gespecificeerd in hele dagen. In het algemeen verdient een tijdstap met de lengte van 1 dag de voorkeur.
Voordat de eigenlijke simulatie begint worden voor ieder type ondergrond vochtspannings- en verzadigingstekortcurven

berekend. De benodigde rekentijd is voor heterogene profielen sterk afhankelijk van de diepte waarop de heterogeniteit wordt aangetroffen. Het resultaat van de berekening kan in het achtergrondgeheugen worden opgeslagen en in tabelvorm worden afgedrukt. Het is dan niet nodig de berekeningen later opnieuw uit te voeren indien van dezelfde ondergrond gebruik wordt gemaakt. Verder is het mogelijk om de simulatie van het vochttransport in een groot aantal profielen simultaan uit te voeren mits er in alle gevallen sprake is van dezelfde typen randvoorwaarden.
De tijdsafhankelijke uitvoer gaat naar de regeldrukker en beslaat een regel (met 132 posities) per tijdstap per geval.

5.4. Invoer

De tijdsonafhankelijke invoer betreft

1 gewastype
2 een vochtkarakteristiek (in tabelvorm) voor ieder van de te onderscheiden lagen in de wortelzone
3 een vochtgehalte- en doorlatendheidskarakteristiek (in tabelvorm) van ieder van de te onderscheiden lagen in de ondergrond
4 eventueel een relatie tussen de grondwaterstand en de flux door de onderrand
5 indien gewenst een beregeningsscenario.

De mate waarin hysteresis optreedt kan met een zogenaamde hysteresisfactor worden aangegeven. Indien daartoe de gegevens ontbreken moet de factor worden geschat of gecalibreerd.
Voor situaties buiten Nederland en voor gewassen die niet standaard in MUST zijn opgenomen zijn aanvullende gegevens noodzakelijk.
De beginvoorwaarden betreffen

1 de grondwaterstand
2 de flux door het maaiveld
3 de flux door de onderrand.

De tijdsafhankelijke invoer omvat

1 de neerslag
2 de potentiele verdamping of meteorologische gegevens voor de berekening van de verdamping (windsnelheid, relatieve vochtigheid, temperatuur, en relatieve zonneschijnduur of netto straling)
3 eventueel de grondwaterstand of de flux door de onderrand.

De mogelijkheid bestaat om naast bovenstaande gegevens wijzigingen aan te brengen in parameters met verstekwaarden.

5.5. Benodigde inspanning

Het programma MUST is geschreven in FORTRAN 77 en vergt een computer met een geheugencapaciteit van ongeveer 256 K. De berekening van de vochtspannings- en verzadigingstekortcurven kost ongeveer een seconde CPU-tijd voor een homogeen tot enige honderden seconden voor een diep heterogeen profiel. De rekentijd voor het simuleren van een tijdstap liggen in de orde van grootte van een duizendste tot een honderdste CPU-seconde (Amdahl 470 V/7B).

In het programma zijn een groot aantal verstekwaarden ingebouwd, zodat volstaan kan worden met een minimale hoeveelheid invoergegevens. Het programma meldt bepaalde fouten in de invoergegevens en het niet convergeren van iteratieprocedures. De uitvoerige handleiding met voorbeelden maken het programma bijzonder gebruikersvriendelijk. Zowel de implementatie als het gebruik leveren in de praktijk weinig problemen op. Hierdoor bestaat het gevaar dat niet ter zake deskundige personen het model gaan toepassen. Voor de verzameling van de invoergegevens en de interpretatie van de rekenresultaten is agrohydrologische kennis echter absoluut noodzakelijk.

Het verzamelen in het veld van vochtgehalte- en doorlatendheidskarakteristieken is kostbaar en tijdrovend. Dit geldt met name voor de bodemfysische gegevens ter hoogte van de

grondwaterspiegel. Deze laatste zijn dikwijls onontbeerlijk voor een juiste simulatie van het grondwaterstandsverloop. Voor een indruk van de kosten verbonden aan het verzamelen van bodemfysische gegevens wordt verwezen naar Bouma et al. (1980). Het gereedmaken van de invoergegevens vergt, afhankelijk van het probleem, enige dagen tot enige weken. Calibratie is in het algemeen niet noodzakelijk. De benodigde tijd voor interpretatie van de rekenresultaten ligt in dezelfde orde van grootte, afhankelijk van de omvang van het project en de gestelde eisen.

5.7. Betrouwbaarheid/gevoeligheid

De berekende actuele en potentiele verdamping volgens de op Penman gebaseerde benadering is geverifieerd in het Rapport van de ad hoc groep Verdamping (1984). De actuele verdamping berekend met behulp van een wortelonttrekkingsfunctie uit potentiele verdampingscijfers is vergeleken met gemeten waarden in het kader van de 4e CHO-studiebijeenkomst (TNO, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1984). Uit beide rapporten blijkt een goede overeenstemming tussen gemeten en berekende waarden. Verificatie van MUST met betrekking tot de gesimuleerde grondwaterstanden heeft voornamelijk plaatsgevonden als onderdeel van het integrale waterbeheermodel GELGAM (De Laat, 1980). Hierbij is gebleken dat in goed doorlatende rigide gronden het grondwaterstandsverloop vrij nauwkeurig is te simuleren.

Het model is diverse malen onderwerp geweest van een uitgebreide gevoeligheidsanalyse (Van Bakel, 1979; Bouma et al., 1980; De Laat, 1980). Hieruit is gebleken dat de bodemfysische parameters in de diepe ondergrond een relatief grote invloed hebben op de gesimuleerde grondwaterstand c.q. de flux door de onderrand, terwijl de berekende verdamping sterk afhankelijk is van de dikte van de wortelzone en in mindere mate van het capillaire geleidingsvermogen.

5.8. Relatie met andere methoden resp. normen e.d.

MUST is een niet-stationair model voor onverzadigde stroming met een specifieke (pseudo stationaire) oplossingstechniek. Het model plaatst zich hiermee tussen de meer mathematisch-fysische modellen zoals SWATRE (Belmans et al., 1983) en de typisch conceptuele modellen zoals dat van Makkink & Van Heemst (1975). Uitgaande van de wetten van Darcy en continuiteit en met de introductie van enige conceptuele elementen is een oplossing verkregen zonder de numerieke problemen inherent aan de mathematisch-fysische benadering en met behoud van de fysische betekenis van de modelparameters.

Vergeleken met modellen die gebaseerd zijn op een numerieke benadering van de partiele differentiaalvergelijking gebruikt MUST weinig rekentijd. De in- en uitvoer geschieden in het algemeen wat eenvoudiger omdat voor het gebruik van MUST geen netwerk vereist is. Daar staat tegenover dat de simulatieresultaten zowel naar tijd als naar plaats minder gedetailleerd zijn.

Voor een discussie omtrent het gebruik van relatief eenvoudige modellen zoals MUST versus meer uitgebreide systemen zoals GELGAM wordt verwezen naar Van Lanen(1983).

5.9. Voorbeelden van toepassingen

Toepassingen van MUST omvatten onder meer de volgende onderwerpen:

Vochtleverantieberekeningen; De Laat (1979)
Gewasopbrengsten; Van Lanen (1980)
Simulatie in kleigronden; Bouma & De Laat (1981)
Natuurbeheer; Willemsen (1982)
Regionaal waterbeheer; Van Boheemen et al. (1983)
Verdampingsberekeningen; Rapport van de ad hoc groep Verdamping (1984)

5.10 Achtergrondinformatie

De theorie van de methode is te vinden in het proefschrift van De Laat (1980), het gebruik van het model is beschreven in de gebruikershandleiding (De Laat, 1985). Een kopie van het programma wordt onder voorwaarden aan derden ter beschikking gesteld. De voorwaarden beogen het ontstaan van verschillende modelversies zoveel mogelijk te beperken. Oudere versies die onder namen zoals Rijtema/De Laat, DL4, DL7, UNSAT, e.d. nog in omloop zijn wijken in meer of mindere mate af van de standaardversie MUST. Met een gecontroleerd gebruik kunnen modelfouten en nieuwe ontwikkelingen aan de gebruikers worden doorgegeven. Inlichtingen betreffende het gebruik van MUST zijn verkrijgbaar bij het IHE, Oude Delft 95 te Delft. Instituten die ervaring hebben opgedaan met MUST zijn o.a. het RIVM, het ICW, de STIBOKA, het KIWA en de Landinrichtingsdienst. Voor het verzamelen van bodemkundige gegevens kan men het beste terecht bij de STIBOKA te Wageningen.

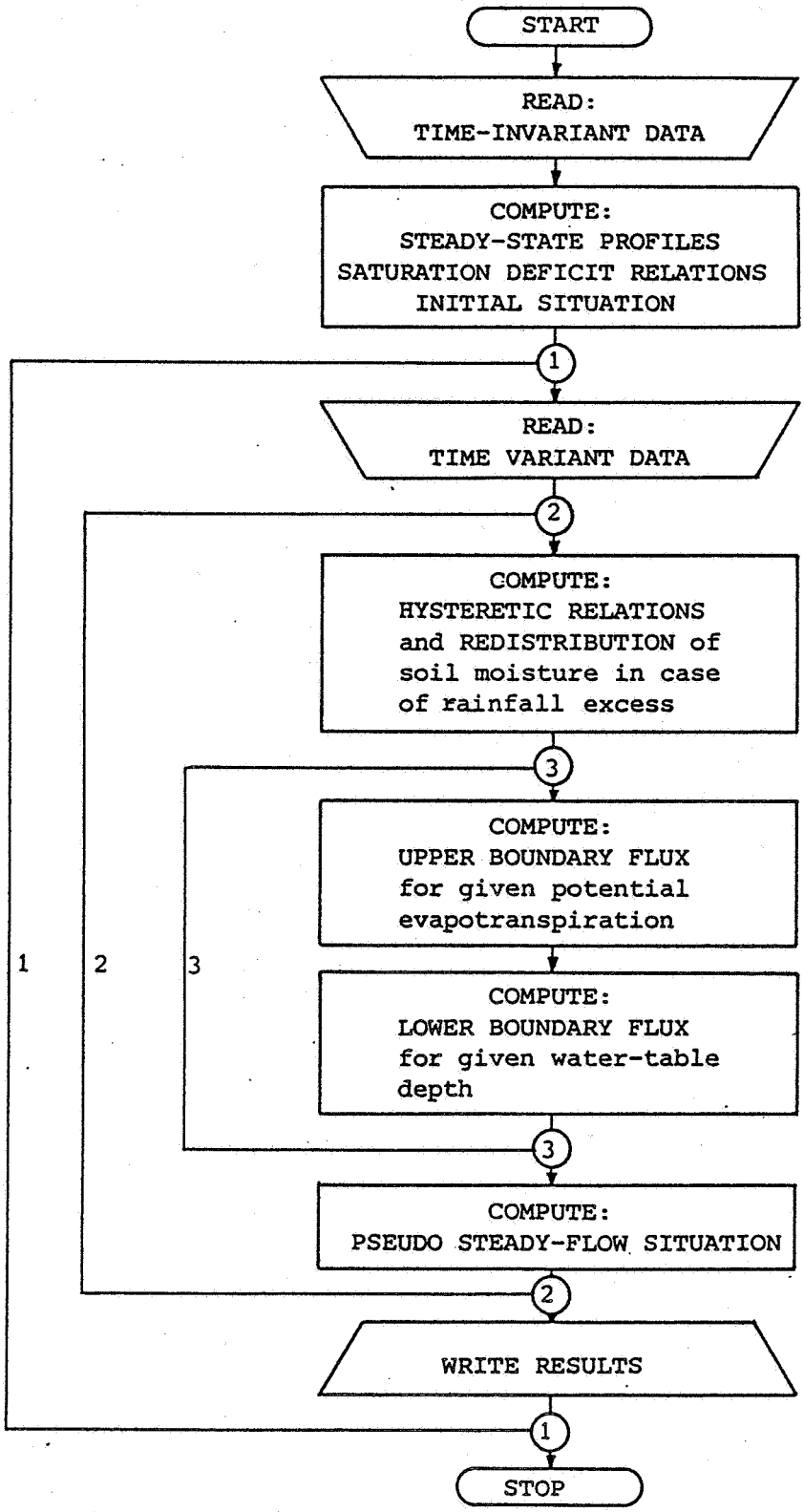
6. LITERATUUR

1. Bakel, P.J.T. van, 1979. Verdamping in relatie tot bodem en gewas. In: Verdamping en gewasproductie. Basisrapport CWG, Provincie Gelderland, Arnhem, 49 p.
2. Belmans, C., J.G. Wesseling & R.A. Feddes, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J.Hydrol., 63: 271-286.
3. Berg, J. van den, 1975. Vochtleverantie van bosgronden en de groei van Japanse larix op veldpodzolgronden. Ned.Bosb. Tijdschrift, 47: 159-163.
4. Boheemen, J.M. van, P.J. Kusse, C. Maas & J.W. Wesseling, 1983. Effect of fresh water supply on agriculture in the southwest of the Netherlands. Neth.J.Agric.Sci. 31: 269-278.

5. Bouma, J., 1979. Overzichtskaarten met betrekking tot een aantal aspecten van de waterhuishouding in Gelderland. Basisrapport CWG, Provincie Gelderland, Arnhem, 46 p.
6. Bouma, J., P.J.M. de Laat, R.H.C.M. Awater, H.C. van Heesen, A.F. van Holst & Th.J. van de Nes, 1980. Use of soil survey data in a model for simulation regional soil moisture regimes. Soil Sci.Soc. of Am.Journal 44: 808-814.
7. Bouma, J. & P.J.M. de Laat, 1981. Estimation of the moisture supply capacity of some swelling clay soils in the Netherlands. J.Hydrol. 49: 247-259.
8. Laat, P.J.M. de, 1972. Een automatische berekening met behulp van een digitale computer van de landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking volgens het algoritme van Rijtema. Scriptie Landbouwhogeschool, Afd. Cultuurtechniek.
9. Laat, P.J.M. de, 1979. Vochtleverantieberekeningen. In: Overzichtskaarten met betrekking tot een aantal aspecten van de waterhuishouding in Gelderland (Ed. J. Bouma). Basisrapport CWG, Provincie Gelderland, Arnhem, p. 23-28.
10. Laat, P.J.M. de, 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a regional sub-surface flow problem. Thesis. Agric.Res.Rep. 895, PUDOC, Wageningen, 126 p.
11. Laat, P.J.M. de, 1985. MUST, a simulation model for unsaturated fow. Report series nr. 16, IHE, Delft, 91 p.
12. Laat, P.J.M. de & R.H.C.M. Awater, 1978. Groundwater flow and evapotranspiration; A simulation model. Part 1: Theory. Basisrapport CWG, Provincie Gelderland, Arnhem, 64 p.
13. Lanen, H.A.J. van, 1980. De opbrengstverandering bij grasland ten gevolge van diepe grondwaterwinning in West-Utrecht. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Leidschendam, 60 p.

14. Lanen, H.A.J. van, 1983. Beregening uit grondwater op hogere gronden en het effect daarvan op lagere gronden. H2O(16): 369-375.
15. Makkink, G.F. & H.D.J van Heemst, 1975. Simulation of the water balance of arable land and pastures. PUDOC, Wageningen.
16. Rijtema, P.E., 1971. Een berekeningsmethode voor de benadering van landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking. ICW nota no. 587, Wageningen, 46 p.
17. Rapport van de ad hoc groep Verdamping, 1984. Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM. Provincie Gelderland, Arnhem, 92 p.
18. TNO, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1984. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping. 4e CHO-studie-bijeenkomst in samenwerking met de studiegroep Hupselse Beek. TNO, Den Haag, 128p.
19. Willemsen, A., 1982. Grondwaterstandsverlagingen in het natuurgebied KAMPINA (NB). Deel I. Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten in Nederland, 's-Graveland, 82 p.
20. Wirdum, G. van, 1981. Linking up the natec subsystem in models for the water management. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Den Haag. Verslagen en Mededelingen No. 27: 108-128.

Flow chart MUST



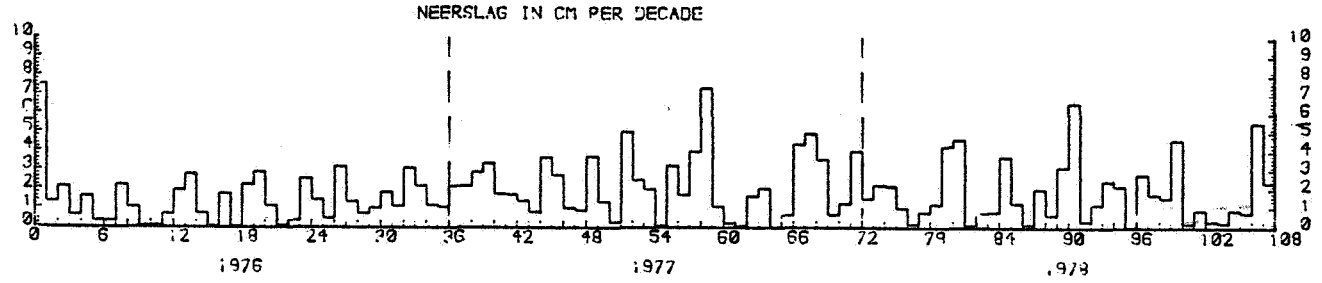
1 loop for timesteps

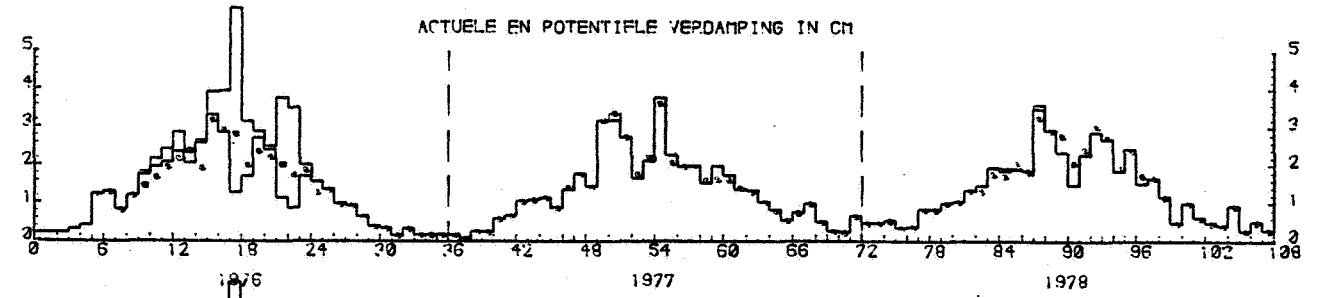
2 loop for different cases

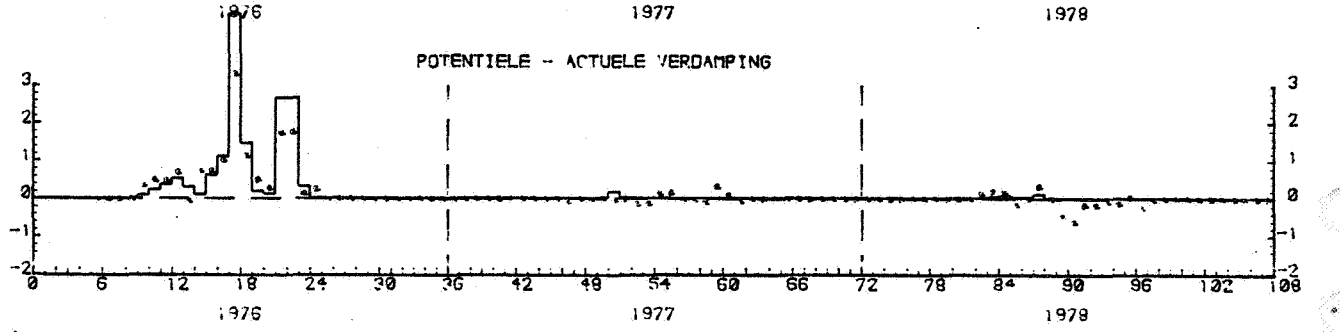
3 loop for simultaneous solution of boundary conditions

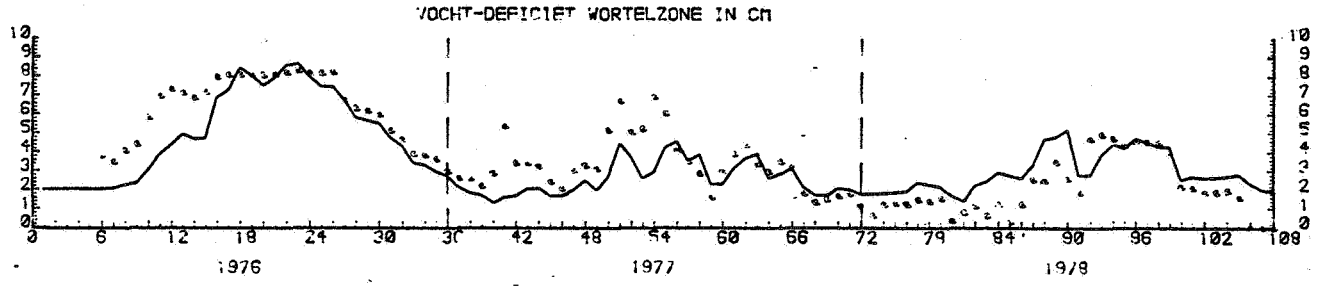
Verslag van de calibratie van MUST

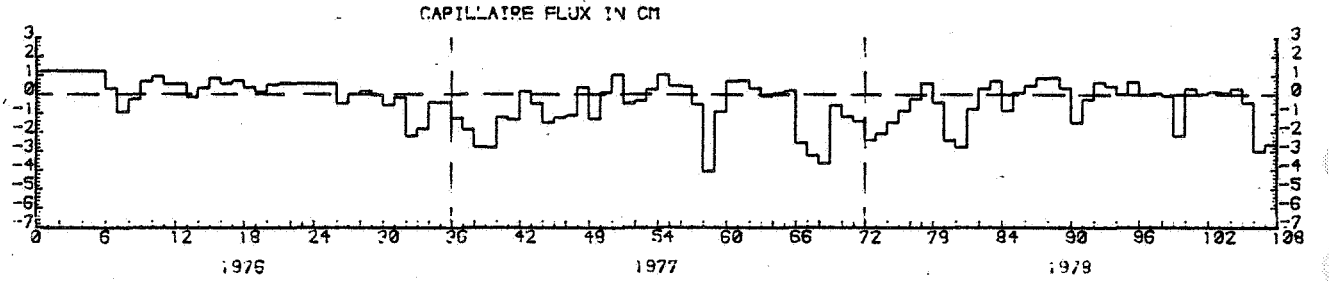
Voor het simuleren met MUST is calibratie in het algemeen niet noodzakelijk. De enige vrijheid die de gebruiker van MUST heeft, is de keuze van de pF in de wortelzone waarop Eact/Epot kleiner wordt dan een. De verstekwaarde voor deze pF, aangeduid met PFA, is 2.7.
Uit een analyse van de gemeten waarden voor Eact en de opgegeven waarden voor Epot volgens Thom & Oliver blijkt dat PFA tijdsafhankelijk is. Dit is echter niet het geval indien Epot-waarden worden gebruikt die zijn berekend volgens de inzichten van de Werkgroep Verdamping (1984). Hieruit blijkt een verband tussen PFA en de grootte van Epot.
Ten behoeve van de studiedag is PFA tijdsafhankelijk gemaakt. Na calibratie blijkt de waarde te varieren van 1.7 op half mei tot 4.0 op eind augustus.
Tot slot heeft de gebruiker van MUST de mogelijkheid om rekening te houden met hysteresis. Voor dit profiel zijn echter geen gegevens beschikbaar. Uit simulaties met en zonder hysteresis blijkt dat de beste resultaten worden verkregen indien hysteresis buiten beschouwing wordt gelaten.

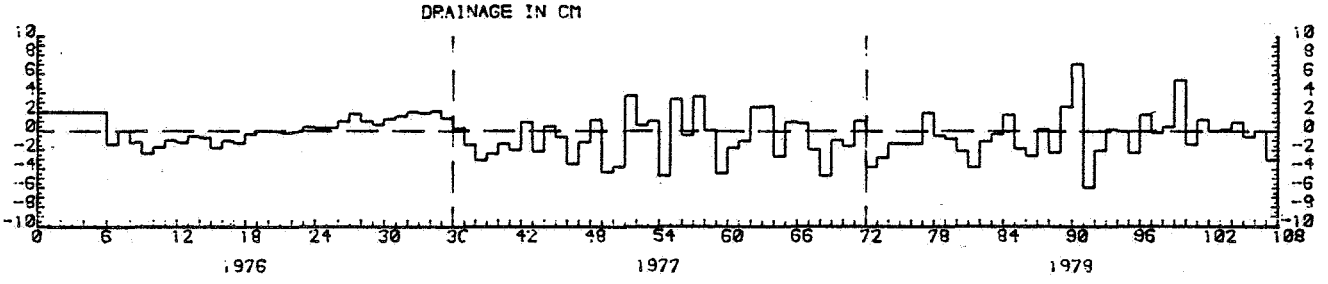


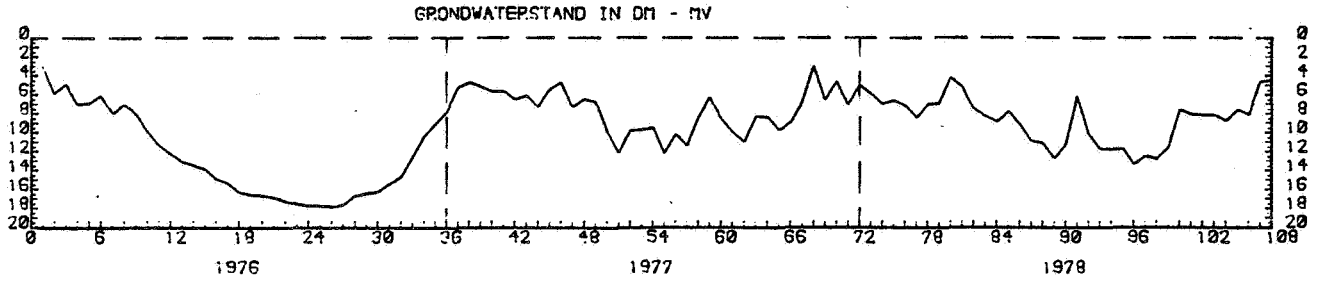




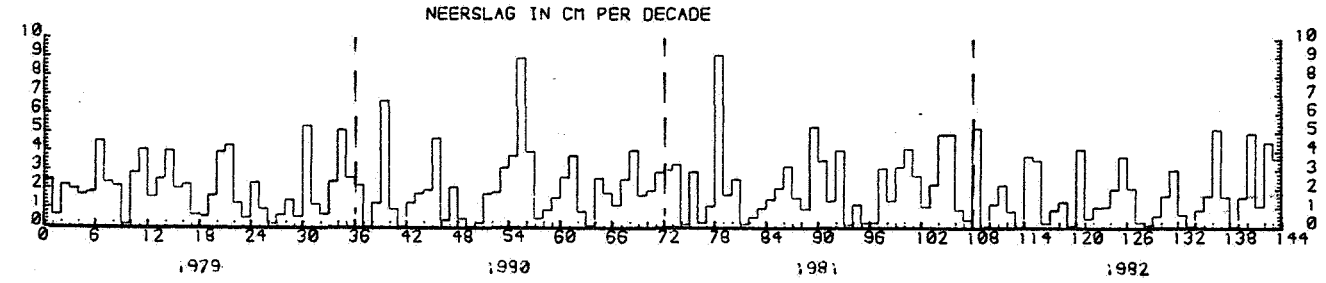


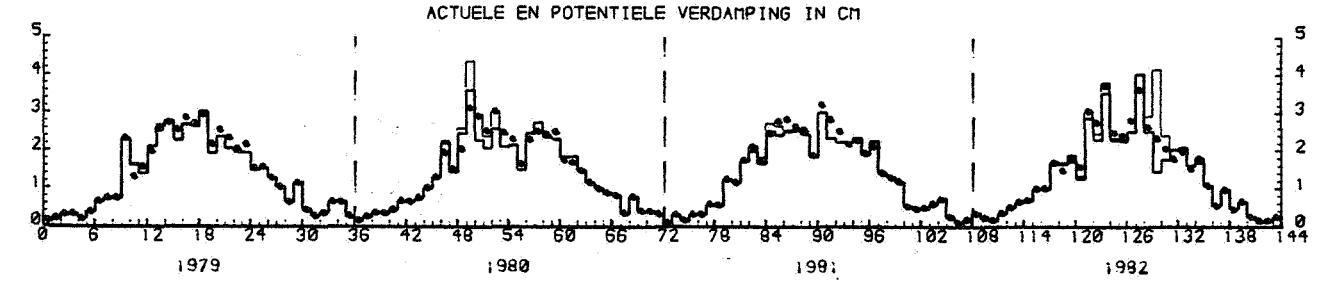


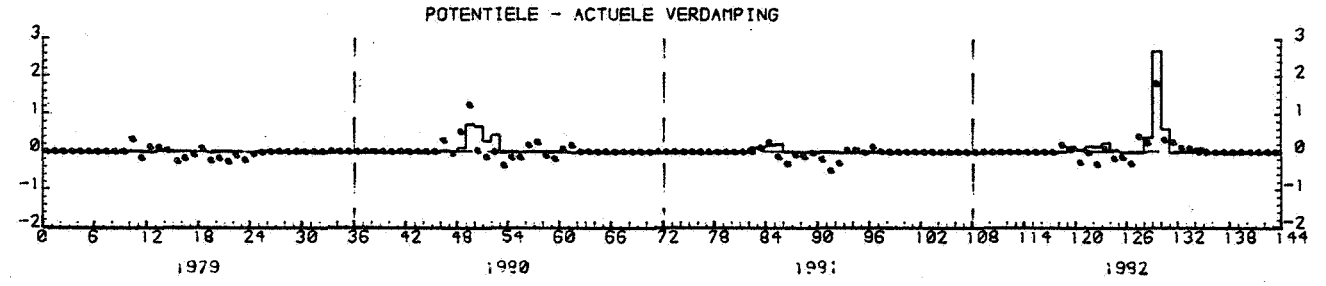


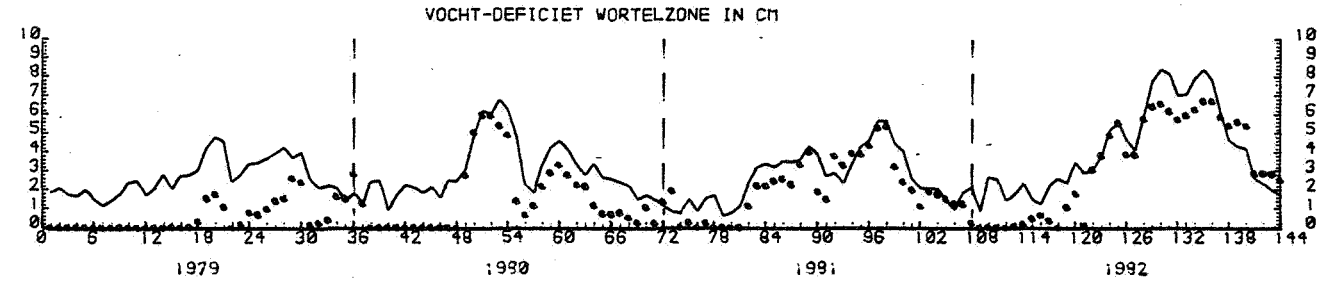


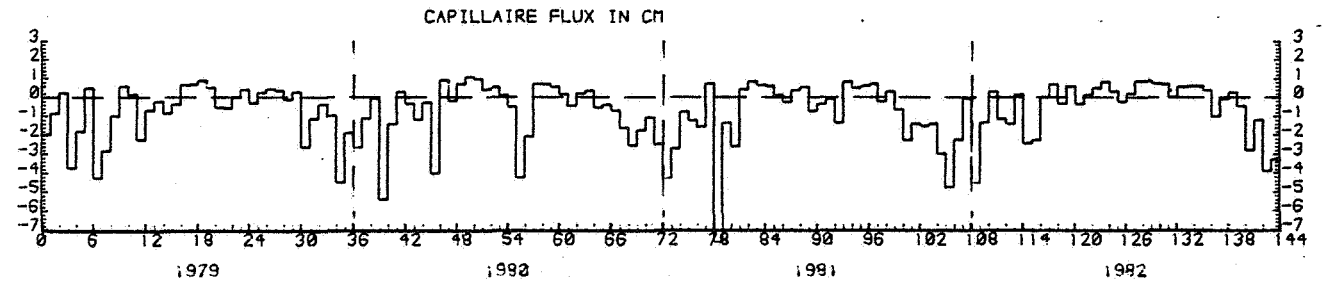
BEREKENING MET HET MODEL : M U S T

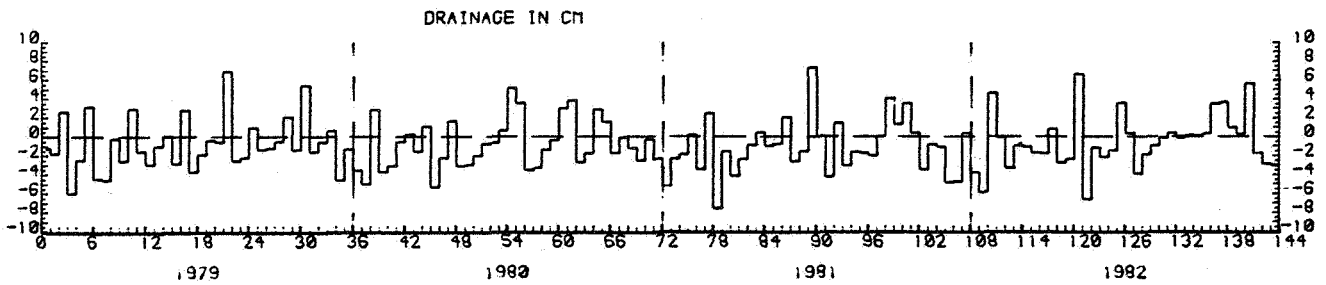


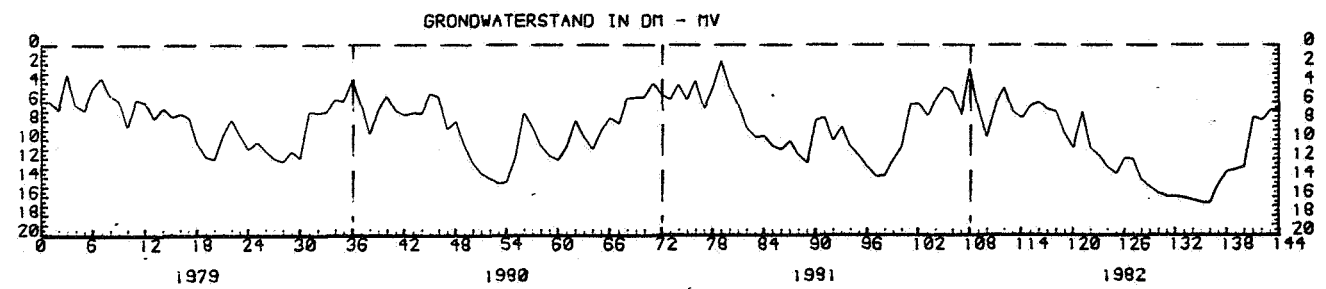












BEREKENING MET HET MODEL : M U S T

C ONZAT

G. van Drecht

1. NAAM: ONZAT

2. LABEL:

a. Milieu-aspect. Transport van vócht en opgeloste stof in vertikale richting in het onverzadigde gedeelte van de bodem.
Berekening van de verdamping van de vegetatie en de afvoer naar het grondwaterreservoir. Berekening van vertikaal transport van een opgeloste stof onder invloed van adsorptie, diffusie en dispersie.

b. Oorzaak. Vochttransport treedt op door:
- Infiltratie van het neerslagoverschot.
- Onttrekking van bodemvocht ten behoeve van de verdamping van de vegetatie.
- Fluctuatie van de grondwaterspiegel.

c. Effect. Stoftransport treedt op door:
- transport van water.
- concentratie verschillen.

Door de interactie van bovengenoemde processen wordt de bodem afwisselend droger en natter hetgeen weer invloed heeft op deze processen.

d. Type Methode. ONZAT kan geklassificeerd worden als een wiskundig, dynamisch, procesbeschrijvend model.

3. SAMENVATTING:

Naam ONZAT

Methode De onverzadigde grondwaterstroming wordt beschreven met een niet-lineaire, partiële differentiaalvergelijking die in ONZAT met de eindige differentiemethode numeriek wordt opgelost.
Het transport van een opgeloste stof kan eveneens met een niet lineaire partiële differentiaal vergelijking worden beschreven. Voor de berekening van het stoftransport wordt eveneens de eindige differentie methode gebruikt.

Uitvoer. Uitvoervariabelen van ONZAT zijn:
- De bodemvochtverdeling in vertikale richting
- De volume stroomdichtheden in vertikale richting.

- de verdeling van de vochtonttrekking door planten wortels over de wortelzone.
- De grondwater afvoer naar sloten.
- De aanvoer naar het verzadigde grondwaterreservoir.

De concentratie van de opgeloste stof in vertikale richting.

Invoer

Invoervariabelen van ONZAT zijn een functie van de tijd:

- De neerslag.
- De potentiële verdamping van de vegetatie.
- De interceptie capaciteit van de vegetatie.
- De stofconcentratie in de neerslag.

Ook de begintoestand in de onverzadigde zone dient bekend te zijn. Voor elke te onderscheiden laag in het bodemprofiel worden de functies, die de relaties tussen de onverzadigde doorlatendheid en de drukhoogte van het bodemvocht en het vochtgehalte en de drukhoogte van het bodemvocht beschrijven, ingevoerd.

Beperkingen

In het model ONZAT wordt geen rekening gehouden met verschijnselen als:

- Het niet bestaan van een éénduidig verband tussen het vochtgehalte en de drukhoogte van het bodemvocht (hysteresis).
- Osmose, temperatuurvariaties en luchtbeweging in de bodem.

Referentie

Het model ONZAT is beschreven in:"Simulatie van het transport van water en een opgeloste stof in de onverzadigde bodem," Mededeling RID (1983-11) G. van Drecht.

4 ONDERDEEL NETWERK: ONZAT is geen onderdeel van een netwerk.

5 GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING

a. algemene inleiding.

ONZAT is bij het voormalige Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening ontwikkeld om het transport van water in de onverzadigde zone, als subsysteem van de hydrologische kringloop, te simuleren. Behalve het transport van water is ook het transport van een opgeloste stof, als mede de gewasver-

damping in het model vertegenwoordigd.
Toepassingsmogelijkheden zijn het berekenen van effecten die het gevolg zijn van veranderingen in vegetatie, bodemstructuur, grondwaterstand en meteorologische omstandigheden.
Het model ONZAT is operationeel en werd reeds toegepast voor de berekening van de grondwater aanvulling in de Utrechtse Heuvelrug.

b. De methode.

Stroming van bodemvocht in de onverzadigde zone treedt hoofdzakelijk in verticale richting op. De ééndimensionale stroming wordt beschreven door de niet-lineaire, partiële differentiaalvergelijking.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial h_p}{\partial z} - K\right) - S$$

Hierin is:

Θ	het bodemvocht (fraktie)	(--)
K	de onverzadigde doorlatendheid	LT^{-1}
h_p	de drukhoogte van het bodemvocht	L (waterkolom)
z	de verticale coördinaat (positief in neerwaartse richting)	L
t	de tijd	T
S	de vochtonttrekking	T^{-1}

De functies, K, Θ en S zijn afhankelijk van h_p en z terwijl S ook nog een functie van tijd is. Exacte oplossing van deze differentiaalvergelijking is alleen mogelijk onder zeer beperkende voorwaarden. Voor numerieke oplossingen gelden over het algemeen minder voorwaarden. In ONZAT is voor de numerieke oplossing de eindige differentiemethode toegepast.
Randvoorwaarden zijn:
- Een gegeven stijghoogte in de verzadigde zone.

- De neerslag en de potentiële verdamping aan het maaiveld waarbij de drukhoogte binnen zekere grenzen gehouden wordt.
- Het is mogelijk met het model stationair en niet-stationair bodemvochttransport in een homogene of niet-homogene bodem te simuleren. Voor de vochtonttrekking zijn in het model drie verschillende mogelijkheden, waaronder die van het model SWATR (1978) en Hoogland (1980).

c. Uitvoer

De volgende variabelen worden door het model als funktie van de tijd uitgevoerd:
- de bodemvochtverdeling
- de actuele flux door het maaiveld
- de actuele transpiratie
- de verdeling van de vochtonttrekking over de wortelzone
- de aanvoer naar de verzadigde grondwaterzone.

De betrouwbaarheid van de berekende variabelen is afhankelijk van de ingevoerde gegevens zoals dikte van de wortelzone, bodemfysische parameters en gewastype. Is de ruimtelijke variatie in de invoergegevens groot, dan hebben de berekende variabelen geen locale betekenis. Met behulp van additionele programma's zijn de uitgevoerde data verder te verwerken.

d. Invoer

Voor de huidige versie van ONZAT moeten de volgende variabelen ingevoerd worden:
- De $K(h_p,z)$ en $\theta(h_p,z)$ tabellen en toestand in de onverzadigde zone.
- De initiële toestand in onverzadigde zone (drukhoogte of flux).
- Een initiële flux door het maaiveld.
- De potentiële verdamping van het grondoppervlak als functie van de tijd.
- De potentiële evapotranspiratie als functie van de tijd.
- De stijghoogte in de verzadigde zone als functie van de tijd.
- De vochtontrekkingsfunctie.

e. Benodigde inspanning

Voor het verzamelen en het bewerken van de invoergegevens is kennis van de agrohydrologie en modelbouw vereist. Indien de invoergegevens nog bepaald moeten worden is ook kennis van de bodemfysica en de meteorologie vereist. Een academisch geschoolde hydroloog kan de invoerfase verzorgen en de berekeningen interpreteren en verwerken. Voor de simulatie zijn computerfaciliteiten nodig. Het doorrekenen van een jaar kost ca. 150 c.p.u seconden op een VAX-750 (Unix). De gegevensverzameling, afhankelijk van de wijze waarop de gegevens beschikbaar zijn, neemt maximaal 3 maanden in beslag. De interpretatie en de verwerking van de uitvoergegevens nemen, afhankelijk van de gestelde eisen, ongeveer 2 maanden in beslag.

f. Aannamen/ beperkingen

ONZAT kent de volgende aannamen en beperkingen:

- In het model wordt alleen verticale bodemvochttransport berekend.
- De relatie tussen het vochtgehalte θ en de drukhoogte h_p is éénduidig en niet afhankelijk van vroegere omstandigheden (geen hysteresis).
- Er wordt geen rekening gehouden met effecten van temperatuurvariaties, luchtbeweging en, osmose op de bodemvochtstroming.

g. Betrouwbaarheid/gevoeligheid

ONZAT is operationeel vanaf 1982. Naar de betrouwbaarheid van de resultaten is nog geen experimenteel onderzoek verricht.
De eerste ervaringen met het model wijzen uit dat de berekende verdamping sterk bepaald wordt door het type verdampingsmodel dat wordt gebruikt.

h. Relatie met andere methoden resp. normen e.d.

ONZAT is een model dat het niet-stationaire bodemvochtransport kan beschrijven. Daardoor bezit het meer toepassingsmogelijkheden dan de bestaande stationaire en quasi-stationaire modellen die snelle variaties in het bodemvochtransport niet goed kunnen volgen. Het model is het best te vergelijken met het model SWATR 1978 dat bij het ICW is ontwikkeld.

Op het gebied van het milieubeleid worden aan de quantitatieve bodemvochtstroming geen eisen gesteld. Wel stellen de landbouw en de natuur bepaalde normen ten aanzien van de beschikbaarheid van het bodemvocht voor de vegetatie.

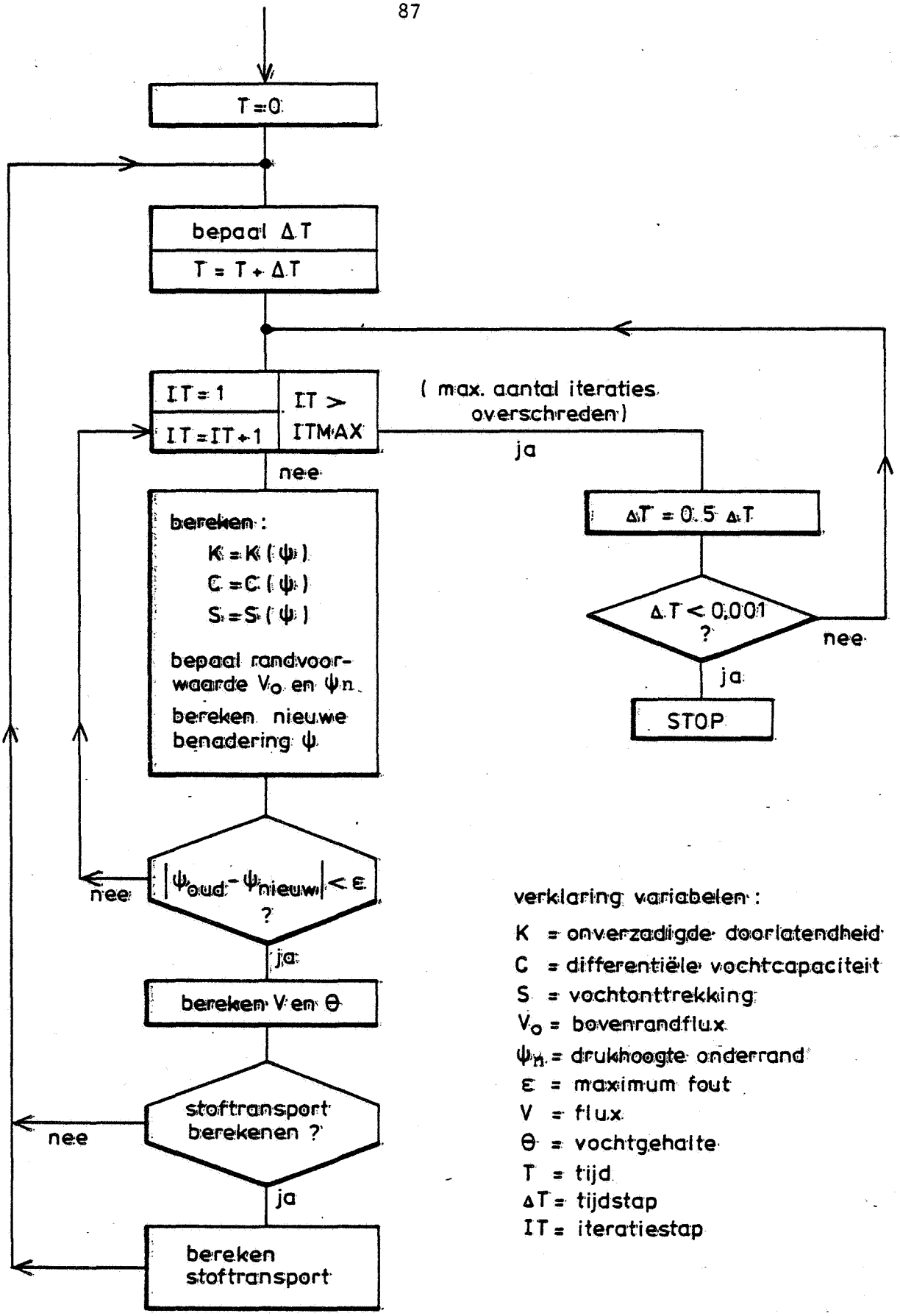
i. Voorbeelden van toepassingen

ONZAT is tot nu toe voor de volgende problemen toegepast:

- Berekening van de grondwateraanvulling onder de Utrechtse Heuvelrug.
- Berekening van de actuele verdamping op het meteoveld bij de boerderij van ASSINK in het stroomgebied van de Hupselse beek.

j. Achtergrondinformatie

1. R.A. Feddes e.a., 1978.
Simulation of field-water use and crop field
PUDOC, Wageningen.
2. J. Hoogland 1980.
Een verbeterd simulatiemodel voor wateropname van landbouwgewassen.
ICW-nota 1239.
3. G. van Drecht, 1983.
Simulatie van vertikaal, niet stationair transport van water en een opgeloste stof in de grond.
RID Hyh. 83-1.
4. G. van Drecht 1983.
Bepaling van de freatische bergingscoëfficiënt en de grondwateraanvulling in zandgrond met een vrij diepe grondwaterspiegel.
RID-HyH-rapport 1983-27.



verklaring variabelen :

K = onverzadigde doorlatendheid
C = differentiële vochtcapaciteit
S = vochtonttrekking
V_o = bovenrandflux
ψ_n = drukhoogte onderrand
ε = maximum fout
V = flux
Θ = vochtgehalte
T = tijd
ΔT = tijdstap
IT = iteratiestap

stroomschema programma ONZAT

SAMENVATTING CALIBRATIE VAN MODEL ONZAT

Uit het Concept rapport:

Toetsing van model ONZAT met behulp van meetgegevens uit het hydrologisch proefgebied "Hupselse Beek".

G. van Drecht (L.B.G. RIVM).
Leidschendam, oktober 1984.

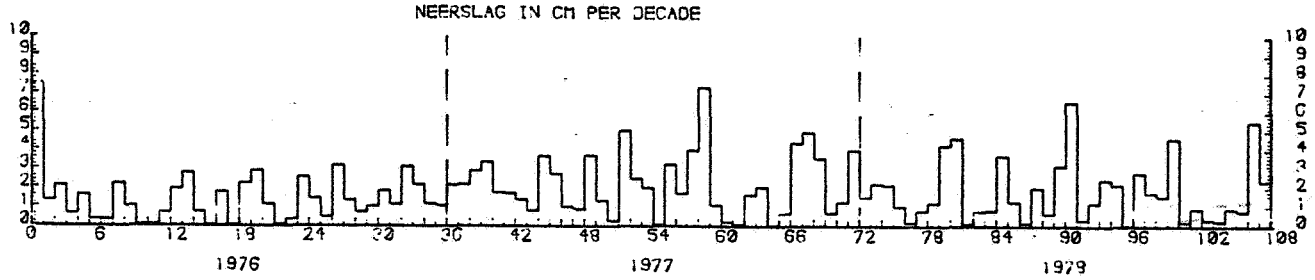
Het verdampingsdeelmodel van model ONZAT is gecalibreerd met behulp van meetgegevens van het meteorologische proefveld in het hydrologische proefgebied "De Hupselse Beek". Voor deze calibratie zijn de gegevens van het groeiseizoen van 1976 gebruikt. De invoer van het model bestond uit dagsommen van de neerslag en de potentiële verdamping en dagwaarden van de grondwaterstand. De potentiële verdamping is berekend met de formule van THOM en OLIVER. De door het model berekende actuele verdamping is vergeleken met de actuele verdamping, berekend met de zg. profiel-methode.

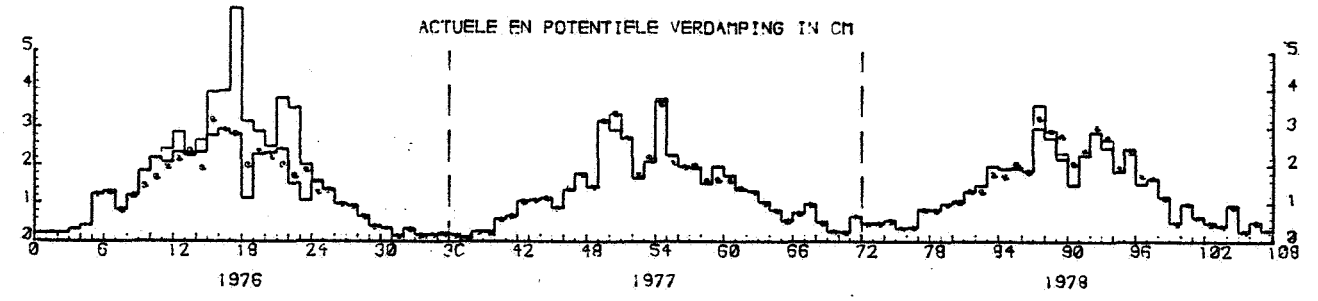
De bodemopbouw en de bodemfysische eigenschappen per bodemlaag zijn vastgesteld door STIBOKA. Het vochtgehalte en de onverzadigde doorlatendheid zijn als getabelleerde functies van de drukhoogte ingevoerd.

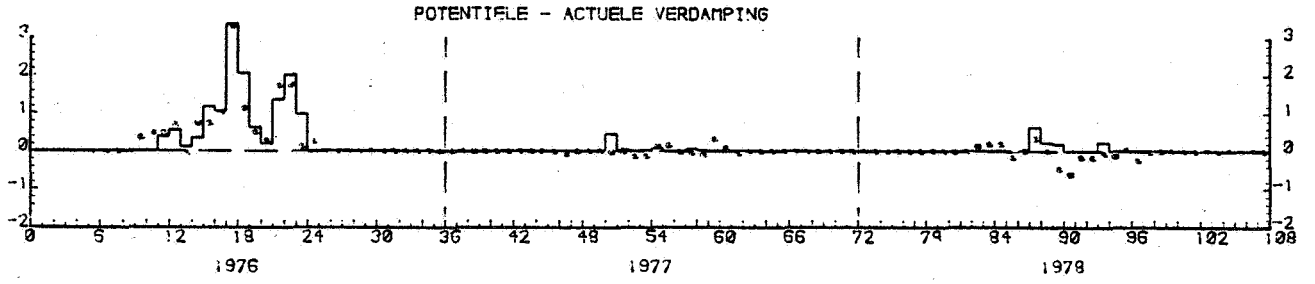
De belangrijkste eigenschappen van het verdampingsdeelmodel zijn de niet constante dikte van de wortelzone en de berekening van de verdampingsreductie op basis van de gemiddelde drukhoogte in de wortelzone. De dikte van de wortelzone neemt in het voorjaar toe met een snelheid, die evenredig is met de toename van de verdamping. De dikte van de wortelzone is begrensd met een minimum van 10 cm en een maximum van 30 cm. De verdampingsreductie begint op te treden bij een drukhoogte, die ligt tussen -100 cm wk (pF=2) en -16000 cm wk (pF=4.2), afhankelijk van de grootte van de potentiële verdamping. Bij een drukhoogte kleiner dan -16000 cm is er geen verdamping.

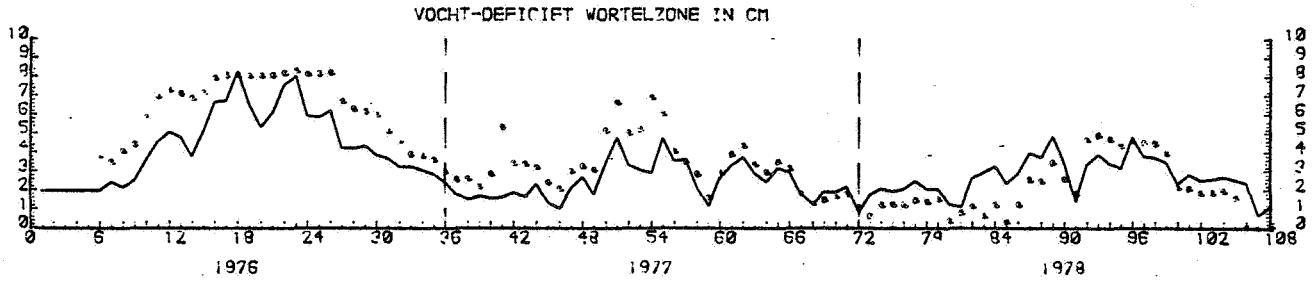
De parameters van het verdampingsmodel zijn zodanig gekozen dat de verdamping van het groeiseizoen van 1976 op 4 mm nauwkeurig berekend wordt. Daarnaast is de verdampingsreductie per tijdstap van 10 dagen gedurende het groeiseizoen zo goed mogelijk benaderd. Hierna is de verdamping in de overige jaren berekend. Op de berekende verdamping van de groeiseizoenen van 1977 en 1978 is weinig aan te merken. Dat komt overigens hoofdzakelijk doordat de verdamping in deze jaren bijna steeds potentieel is.

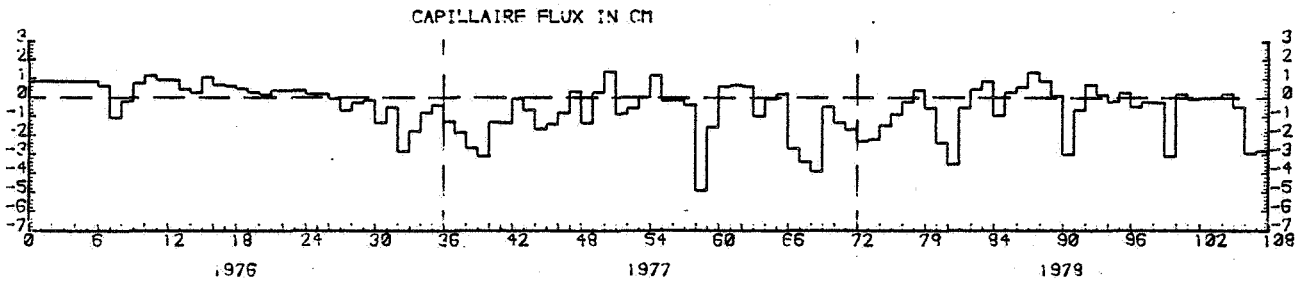
In de groeiseizoenen 1978 is de gemeten verdamping groter dan de ingevoerde potentiële verdamping. De door het model berekende actuele verdamping kan echter nooit groter zijn dan de ingevoerde potentiële verdamping, zodat de vergelijking tussen gemeten en berekende actuele verdamping in dit jaar niet goed mogelijk is.

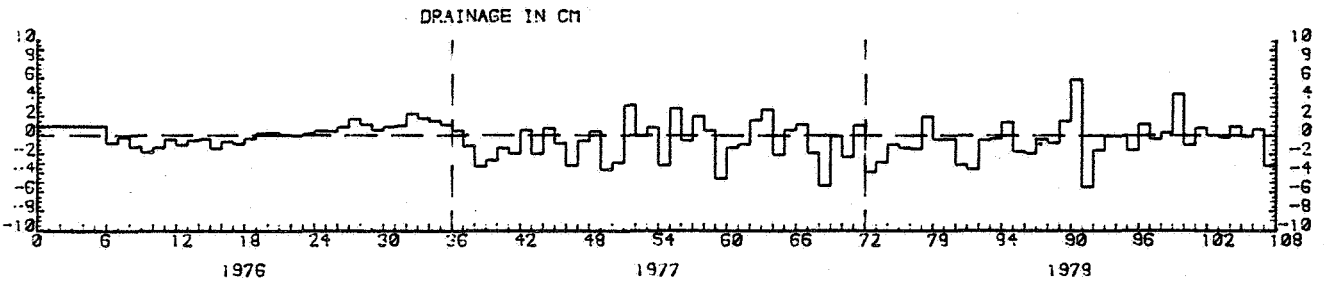


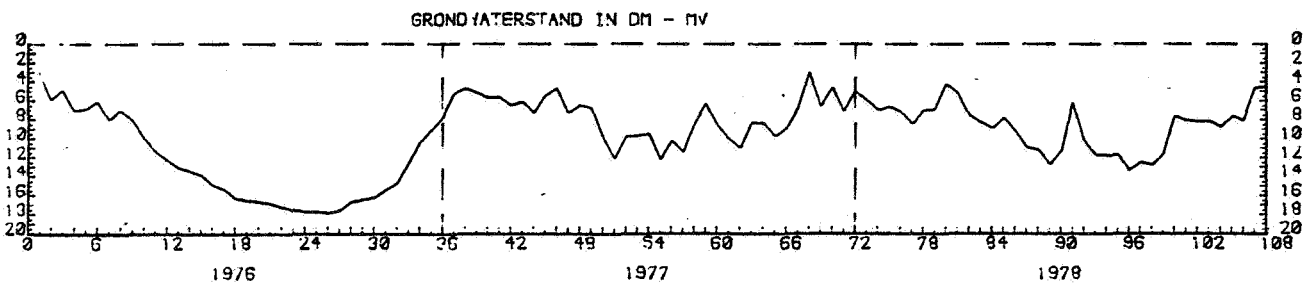






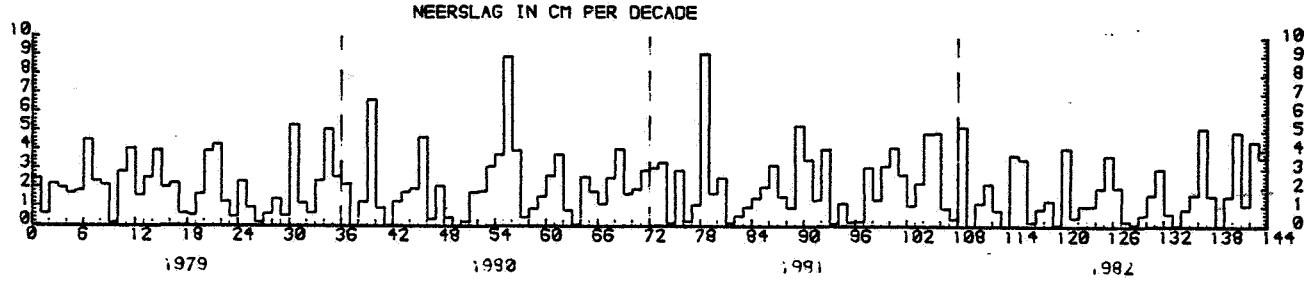




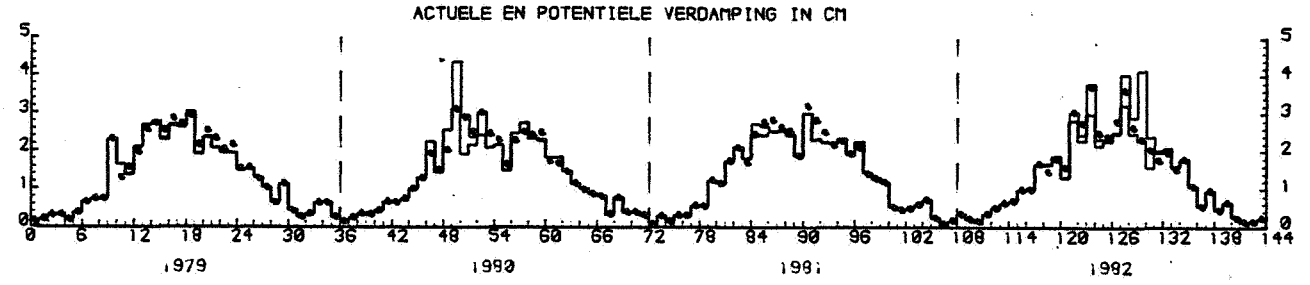


BEREKENING MET HET MODEL : ONZAT

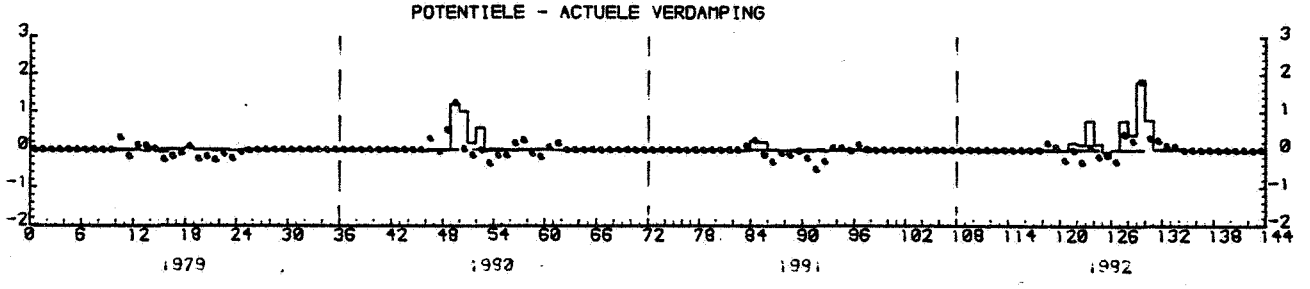
NEERSLAG IN CM PER DECADE



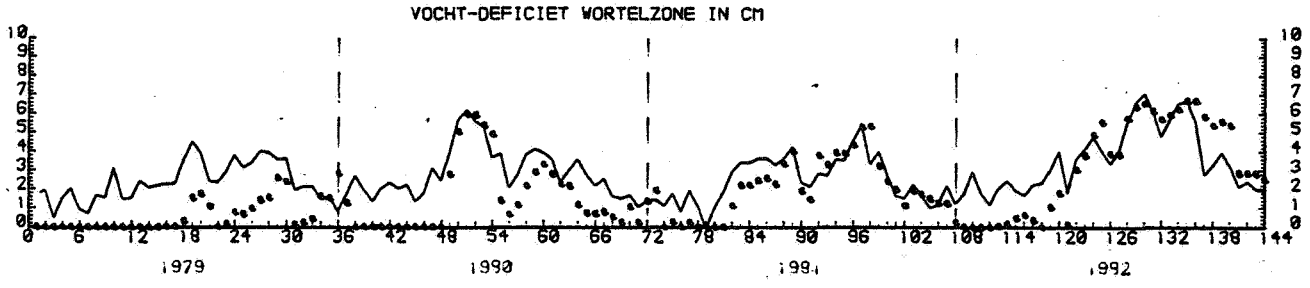
ACTUELE EN POTENTIELE VERDAMPING IN CM



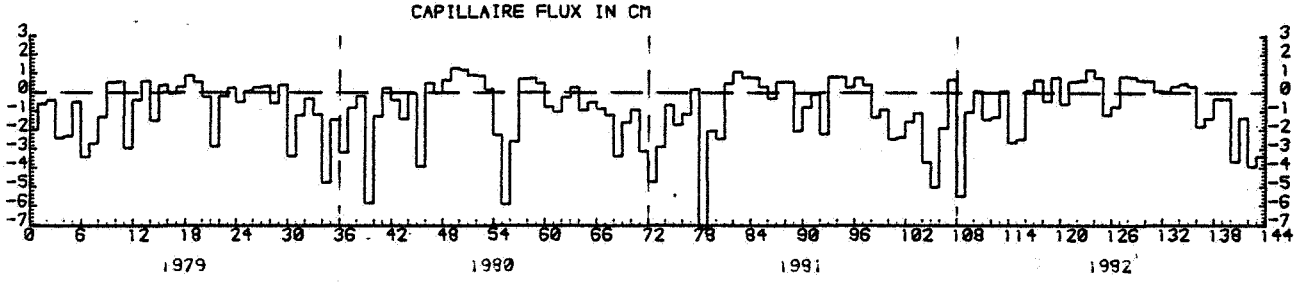
POTENTIELE - ACTUELE VERDAMPING



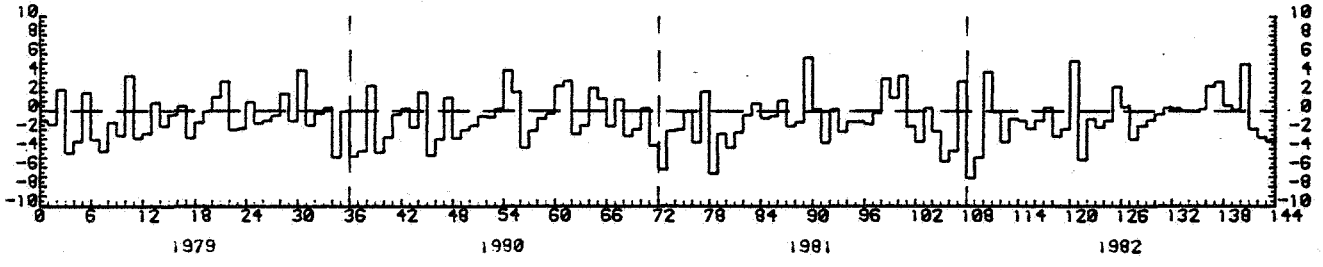
VOCHT-DEFICIET WORTELZONE IN CM



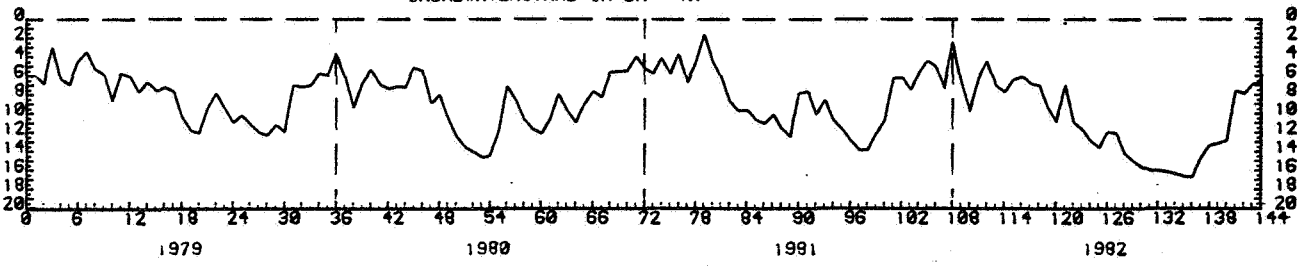
CAPILLAIRE FLUX IN CM



DRAINAGE IN CM



GRONDWATERSTAND IN DM - MV



BEREKENING MET HET MODEL : O N Z A T

D SOMOF

J.H.A. Driessen en B.H. Gilding.

1. NAAM: SOMOF (SOIL MOISTURE FLOW)

2. LABEL

milieu-aspect : vochttransport in het onverzadigde gedeelte van de bodem. Berekening van de evapotranspiratie, oppervlakteafvoer en aanvoer naar het grondwaterreservoir.

oorzaak : vochttransport treedt op door:
- Infiltratie van een gedeelte van het neerslagoverschot. De rest wordt langs het oppervlak afgevoerd.
- Evaporatie van het bodemvocht.
- Het verbruik van het bodemvocht voor de transpiratie van de vegetatie.
- Fluctuatie van de grondwaterspiegel.

effect : door de interactie van bovengenoemde processen wordt de bodem afwisselend droger en natter hetgeen weer invloed heeft op deze processen.

type methode : SOMOF kan geklassificeerd worden als een wiskundig, dynamisch, procesbeschrijvend model. Het is gebaseerd op de fysische relaties die de processen beschrijven.

3. SAMENVATTING

naam : SOMOF

methode : de onverzadigde grondwaterstroming wordt beschreven met een niet-lineaire, partiële differentiaalvergelijking die in SOMOF met een eindige differentietechniek numeriek wordt opgelost.
De fluctuerende grondwaterspiegel is met behulp van een transformatie in de differentiaalvergelijking verwerkt. Als randvoorwaarde voor het freatisch vlak kan een constante drukhoogte gedefiniëerd worden. Directe wateruitwisseling tussen de bodem en de atmosfeer wordt met een potentiële flux als randvoorwaarde aangegeven. Plantonttrekking wordt met een weerstandsfunctie beschreven.

uitvoer : uitvoervariabelen van SOMOF zijn als functie van de tijd:
- de bodemvochtverdeling,
- de transportsnelheid door het maaiveld,

- de transpiratiesnelheid van de vegetatie,
- de aanvoer naar het verzadigde grondwaterreservoir.

Desgewenst kan netto neerslag die niet in de bodem infiltreert, door middel van een statische en een dynamische bergingsfactor gescheiden worden in componenten van oppervlakteberging en oppervlakteafvoer.

invoer : invoervariabelen van SOMOF zijn als functie van de tijd:

- de potentiële flux door het maaiveld,
- de potentiële transpiratie van de vegetatie,
- de dikte van de onverzadigde zone.

Ook de beginwaarde van de flux door het maaiveld en de bodemvochtverdeling aan het begin dienen bekend te zijn. Voor het bodemprofiel dienen de functies die de relaties tussen de doorlatendheid, hoogte en de drukhoogte van het bodemvocht en tussen het vochtgehalte, hoogte en de drukhoogte van het bodemvocht beschrijven ingevoerd te worden.

beperkingen : in het computerprogramma SOMOF wordt geen rekening gehouden met verschijnselen als:

- het niet bestaan van een éénduidig verband tussen het vochtgehalte en de drukhoogte van het bodemvocht (hysteresis),
- osmose,
- absorptie,
- temperatuurvariaties,
- luchtbeweging in de bodem.

referentie : het computerprogramma SOMOF is beschreven in [B.H. Gilding, The soil moisture zone in a physically-based hydrologic model, Advances in Water Resources 6 (1983), 36-43; ook verschenen als Delft Hydraulics Laboratory Publication 324 (1984)].

4. ONDERDEEL NETWERK

SOMOF is een onderdeel van PREDIS, dat ontwikkeld is als een instrument voor het waterbeheer. Met het computerprogramma zijn de effecten van ingrepen in het hydrologisch regime te voorspellen. De hydrologische eigenschappen zijn naar hun fysica gemodelleerd. Naast SOMOF bestaat

PREDIS uit de modules GROMULA voor de verzadigde grondwaterstroming, WAFLOW voor het watertransport in de open leidingen, en DRAIN voor de drainage afvoer.

5. GEDETAILLEERDE BESCHRIJVING

5.1. Algemene inleiding

SOMOF is bij het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkeld om het transport van water in de onverzadigde zone, als subsysteem van de hydrologische kringloop, te simuleren. Naast de onverzadigde zone zijn ook de atmosfeer, de vegetatie en het landoppervlak, als subsystemen van de hydrologische kringloop, in het computerprogramma gebracht. Met het programma kunnen de effecten van ingrepen in deze subsystemen worden voorspeld. Ingrepen in een subsysteem kunnen effecten hebben op de andere subsystemen die SOMOF beschrijft, maar ook op externe subsystemen (grondwater, drainage, open leidingen) zoals binnen het programma PREDIS geïntegreerd.
Toepassingsmogelijkheden zijn het voorspellen van effecten van veranderingen in vegetatie, landoppervlak, bodemstructuur, grondwaterstand en meteorologische omstandigheden op de hydrologische kringloop.
Het computerprogramma SOMOF is operationeel. Het is de bedoeling dat SOMOF wordt uitgebreid met verschillende opties voor de beschrijving van het verdampingsproces.

5.2. De methode

Stroming van bodemvocht in de onverzadigde zone treedt hoofdzakelijk in verticale richting op. De ééndimensionale stroming wordt beschreven door de niet-lineaire, partiële differentiaalvergelijking:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial h_p}{\partial z} + K\right) - W.$$

Hierin is:

θ	het bodemvochtgehalte,	(--)
K	de doorlatendheid,	(mm/etm)

h_p	de drukhoogte van het bodemvocht,	(mm)
z	de plaatshoogte,	(mm)
t	de tijd,	(etm.)
W	de wortelonttrekking.	(etm.$^{-1}$)

De functies K, Θ, en W zijn afhankelijk van h_p en z, terwijl W ook nog een functie van tijd is.
Algemeen geldige analytische oplossingen van de differentiaalvergelijking bestaan niet, wel kan de vergelijking numeriek worden opgelost. In SOMOF is voor de numerieke oplossing een eindige differentietechniek toegepast. Complicaties treden op indien de grondwaterspiegel in de tijd verandert, de Θ-h_p relatie niet éénduidig is, de bodem heterogeen is zodat K en Θ ook afhankelijk zijn van de plaats in het profiel z en de wijze waarop planten in relatie met het beschikbare bodemvocht aan de vraag van de atmosfeer trachten te voldoen.
Door een uit de warmtegeleiding bekende transformatie toe te passen wordt de variërende dikte van de onverzadigde zone in de differentiaal-vergelijking ondervangen. Gedurende het rekenproces blijft het aantal afstandstappen gelijk. Dit heeft tot gevolg dat de grootte van de afstandstappen in de tijd varieert.
De getransformeerde differentiaalvergelijking is numeriek opgelost met een Douglas-Jones predictor-corrector techniek. Voor de verschillende punten in het profiel kunnen deze vergelijkingen per tijdstap als een matrixstelsel worden geschreven. Met het Thomas algoritme wordt de matrix opgelost. Randvoorwaarden zijn:

- een gegeven drukhoogte bij de grondwaterspiegel,
- een potentiële flux aan het maaiveld waarbij de drukhoogte binnen bepaalde grenzen gehouden wordt.

Door het toepassen van de Kirchhofftransformatie over het gehele profiel zijn de predictor- en correctorvergelijkingen op een eenvoudiger manier te herschrijven. Deze transformatie is alleen toepasbaar voor een homogeen bodemprofiel. Opties zijn beschikbaar om met het model naar keuze stationair of instationair bodemvochttransport in een homogene of inhomogene bodem te simuleren.
Voor de wortelonttrekking is een weerstandsfunctie gebruikt die beschreven is in [R.A. Feddes, E. Bressler & S.P. Neuman, Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems, Water

Resources Research 10 (1974), 1199-1206]. De opname door de wortels is:

$$W = \rho K \max\{h_p - h_r, 0\},$$

waarin:

W	= opname,	(etm^{-1})
K	= de doorlatendheid,	(mm/etm)
ρ	= een wortelonttrekkingsfactor,	(mm^{-2})
h_p	= de drukhoogte in de bodem,	(mm)
h_r	= de drukhoogte in de plantewortel.	(mm)

De wortelonttrekkingsfactor ρ bestaat uit een wortelweerstand en een wortelverdelingsfunctie in het profiel. Naast de hoogte in het profiel is de wortelverdelingsfunctie ook in de tijd variabel.
De totale opname door de wortels is gelijk aan de actuele transpiratie. De waarde van h_r wordt zo gekozen dat de actuele transpiratie gelijk is aan de potentiële transpiratie. Indien h_r (negatief) daardoor minder wordt dan een bepaalde grenswaarde, het zogenaamde verwelkingspunt, wordt h_r gelijk aan deze grenswaarde en er treedt verdampingsreductie op. Bij het toepassen van het programma moeten de wortelweerstand en de wortelverdeling, zoals zij in de wortelonttrekkingsfactor ρ geformuleerd zijn, bepaald worden door calibratie met de gemeten en de berekende actuele transpiratiewaarden.

5.3. Uitvoer

Met SOMOF kunnen de volgende variabelen als functie van de tijd voorspeld worden:

- de bodemvochtverdeling,
- de actuele flux door het maaiveld,
- de actuele transpiratie,
- de aanvoer naar de verzadigde grondwater zone,
- de oppervlakte berging,
- de oppervlakte afvoer.

De representativiteit van de voorspelde variabelen is afhankelijk van de ruimtelijke variatie in dikte van de onverzadigde zone, bodemfysische parameters en gewastypen. Is die variatie groot, dan hebben de voorspelde variabelen alleen maar locale betekenis. Met het model kunnen voorspellingen met korte tijdsintervallen gedaan worden voor nagenoeg

alle omstandigheden. Het is mogelijk op ieder gewenst tijdstip deze variabelen te voorspellen. De betrouwbaarheid daarvan is afhankelijk van de tijd en ruimteschaal van de invoervariabelen. Het model voert de variabelen als data uit. Met behulp van additionele programma's zijn deze data verder te verwerken.

5.4. Invoer

Voor de huidige versie van SOMOF moeten de volgende gegevens ingevoerd worden:

- de $K(h_p,z)$ en $\theta(h_p,z)$ functies en de afgeleiden naar h_p en voor $K(h_p,z)$ ook de afgeleide naar z daarvan,
- de initiële bodemvochtverdeling,
- een initiële actuele flux door het maaiveld,
- de potentiële flux door het maaiveld als functie van de tijd,
- de potentiële transpiratie als functie van de tijd,
- de wortelonttrekkingsfunctie $\rho(z,t)$,

Voor het toepassen van het computerprogramma moet een $k(h_p,z)$, een $\theta(h_p,z)$ en een wortelonttrekkingsfunctie opgegeven worden. De eerste twee functies worden bepaald door analytische functies te zoeken waarmee de bodemeigenschappen, die vaak slechts in discrete punten bekend zijn, continu worden beschreven. De wortelonttrekkingsfunctie wordt bepaald door calibratie. De functietypen zijn vrij te kiezen.

5.5. Benodigde inspanning

Het verzamelen en het bewerken van de invoergegevens vergt kennis van de agrohydrologie en modelbouw. Indien de invoergegevens nog bepaald moeten worden is ook kennis van de bodemfysica en de meteorologie vereist. Een academisch geschoolde hydroloog kan de invoerfase verzorgen en de voorspelde variabelen interpreteren en verwerken. Routinematige werkzaamheden kan een middelbare kracht verzorgen.

Voor de simulatie zijn computerfaciliteiten nodig. Het doorrekenen van het instationaire inhomogene schema voor 1 jaar kost ca. 150 c.p. seconden voor een Cyber 170/855 computer.

De calibratie en invoerfase neemt, afhankelijk van de wijze waarop de gegevens beschikbaar zijn, maximaal 3 maanden in beslag. De interpretatie en de verwerking van de uitvoergegevens nemen, afhankelijk van de gestelde eisen, ongeveer 2 maanden in beslag.

5.6. Aannamen/beperkingen

SOMOF kent de volgende aannamen en beperkingen:

- In het model wordt alleen verticale bodemvochtstroming aangenomen.
- Geen hysteresis. De relatie tussen het vochtgehalte θ en de drukhoogte h_p is éénduidig en niet afhankelijk van vroegere omstandigheden. Onder bepaalde omstandigheden is dit wel het geval.
- Er wordt geen rekening gehouden met effecten van temperatuurvariaties, luchtbeweging, osmose en absorptie op de bodemvochtstroming.

5.7. Betrouwbaarheid/gevoeligheid

SOMOF is nog niet zo lang operationeel. Naar de betrouwbaarheid van de resultaten is weinig onderzoek verricht. Bij de eerste toepassingen van het model blijkt dat het gevoelig is voor variaties van de grondwaterstand en de wortelonttrekkingsfactor $\rho(z,t)$. Over de invloed van $K(h_p,z)$ en $\theta(h_p,z)$ op de voorspelde variabelen is nog weinig bekend.

5.8. Relatie met andere methoden resp. normen e.d.

SOMOF is een computerprogramma dat het instationaire bodemvochttransport kan beschrijven. Daardoor bezit het meer toepassingsmogelijkheden dan de bestaande stationaire en "quasi-stationaire" modellen die snelle variaties in het bodemvochttransport niet goed kunnen volgen. Het model is te vergelijken met het model SWATRE dat bij het ICW is ontwikkeld, en het model ONZAT dat bij het RID is ontwikkeld.

Op het gebied van het milieubeleid worden aan de quantitatieve bodemvochtstroming geen eisen gesteld. Wel stellen de landbouw en de natuur bepaalde normen ten aanzien van de beschikbaarheid van het bodemvocht voor de vegetatie. In verband met de draagkracht van de grond stelt ook de bodemmechanica eisen aan de drukhoogten van het bodemvocht. Het computerprogramma SOMOF is in staat de effecten van ingrepen te voorspellen. De resultaten kunnen getoetst worden aan deze normen.

5.9. Voorbeelden van toepassingen

SOMOF is tot nu toe voor de volgende problemen toegepast:

- Vergelijking van SOMOF en DEMGEN gericht op de gevoeligheid van de "quasi-stationaire" benadering van het bodemvochttransport.
- Berekening van de actuele verdamping voor het meetpunt Assink in het stroomgebied van de Hupselse beek.

5.10. Achtergrondinformatie

Een discussie van de methode SOMOF is te vinden in de publicatie:

B.H. Gilding, The soil moisture zone in a physically-based hydrologic model, Advances in Water Resources 6 (1983), 36-43.

Meer algemene informatie over PREDIS is te vinden in:

J.I. Crebas, B.H. Gilding & J.W. Wesseling, Coupling of groundwater and open-channel flow, Journal of Hydrology 72 (1984), 307-330.

J.I. Crebas & J.W. Wesseling, PREDIS een mathematisch model voor de landfase van de hydrologische kringloop, Cultuurtechnisch Tijdschrift 23 (1983), 113-123.

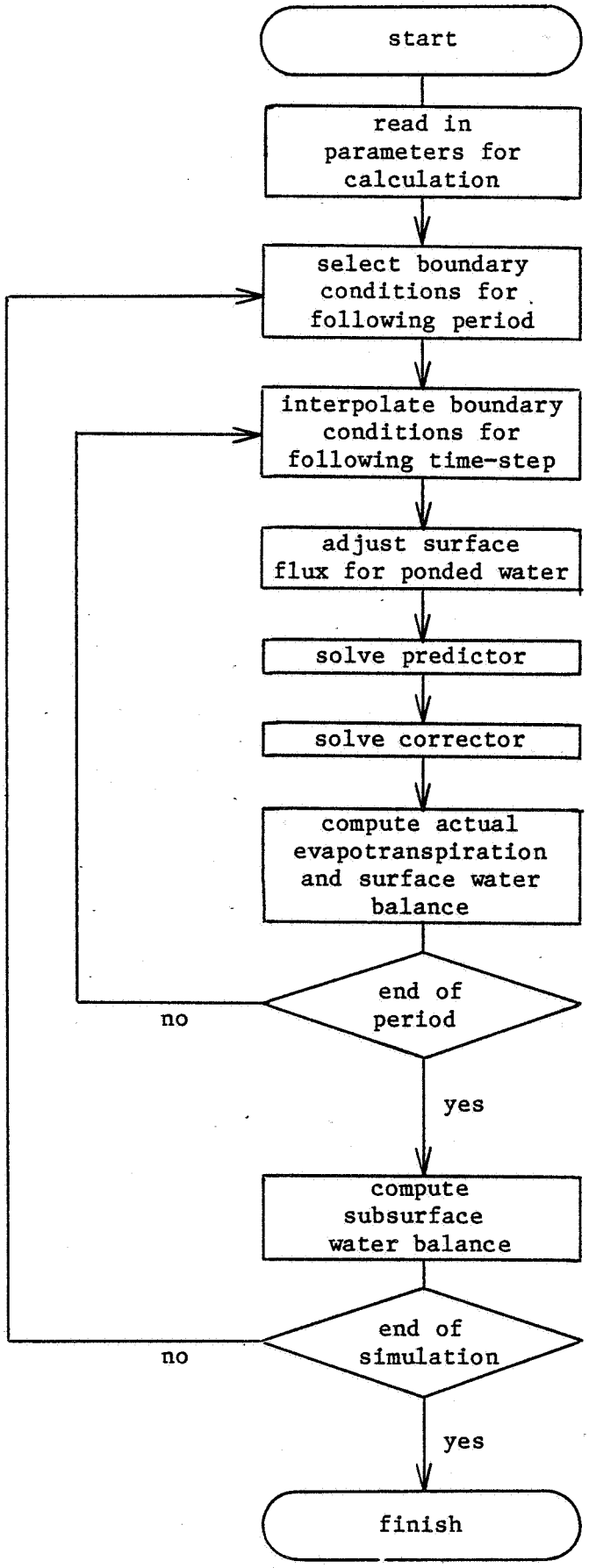
B.H. Gilding & J.W. Wesseling, PREDIS - a physically-based hydrologic response model, XX Congress of the International Association for Hydraulic Research, Proceedings, Subject D, Volume V (International Association for Hydraulic Research, Moscow, 1983), 26-32.

De drie bovengenoemde Engelstalige publicaties zijn ook gebundeld beschikbaar als: Delft Hydraulics Laboratory Publication 324 (1984).

Voor meer informatie over het gebruik van het model kan men zich wenden tot het Waterloopkundig Laboratorium.

Varianten

Van SOMOF bestaan (nog) geen varianten.



Stroomschema van het computerprogramma voor de onverzadigde grondwaterstroming, SOMOF

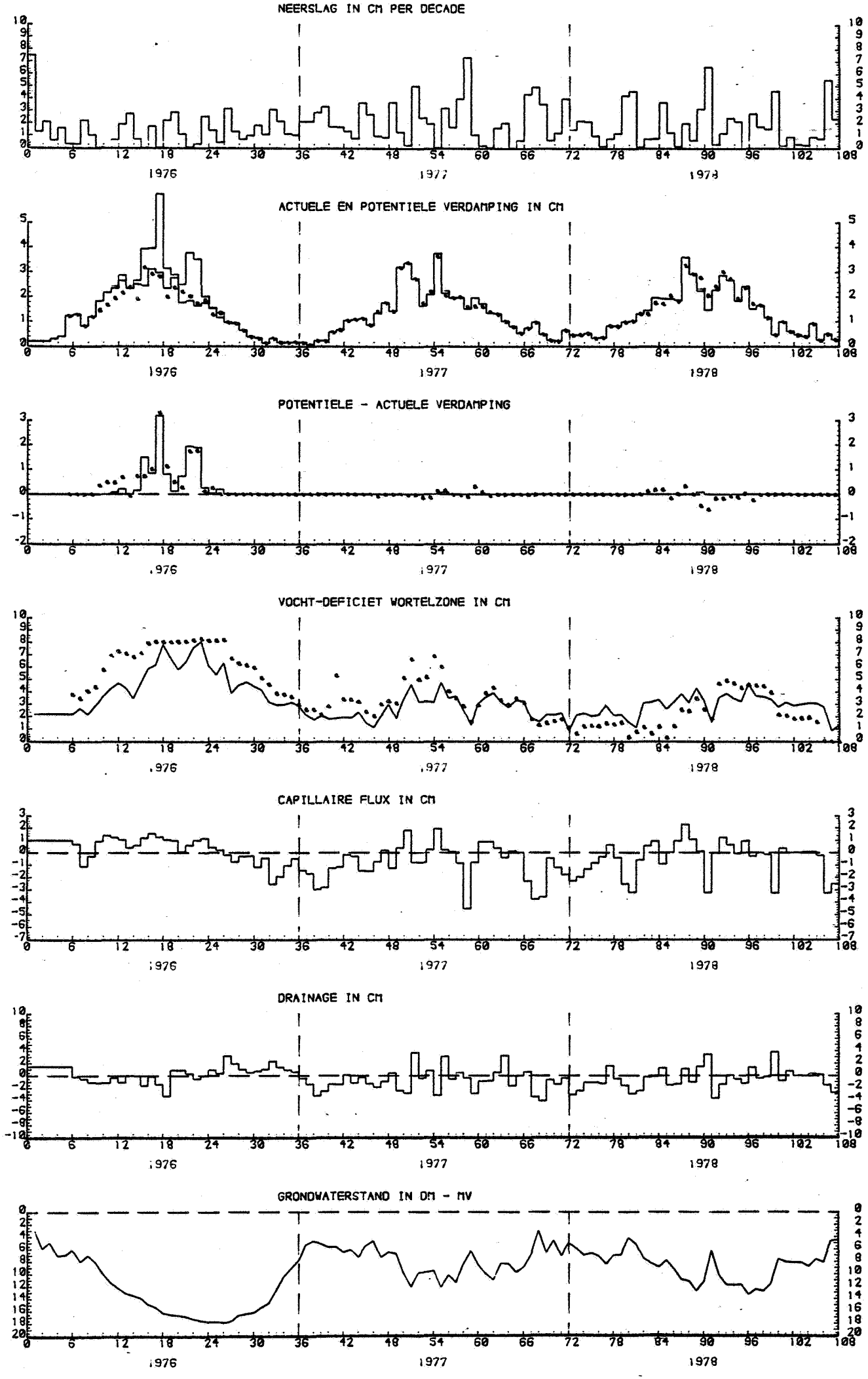
Samenvatting calibratie SOMOF

De invoergegevens van SOMOF kunnen in vijf klassen onderverdeeld worden: bodemfysische eigenschappen als analytische functies ($k - h_p$ en $\theta - h_p$ relaties); randvoorwaarde parameters (kritische drukhoogte bij verzadiging, en grenzen aan de maximale en minimale drukhoogte aan het oppervlak); tijdsafhankelijke randvoorwaarde variabelen (dikte van de onverzadigde zone, neerslag, potentiële bodemverdamping, en potentiële transpiratie); beginvoorwaarden; en de plantonttrekkingsfunctie. Alhoewel het computerprogramma een module bezit om oppervlakteberging en afstroming te berekenen, zal hier op de benodigde parameters voor dit module niet worden ingegaan, omdat er wordt verondersteld dat voor het meetpunt Assink geen oppervlakkige afstroming plaats vindt.

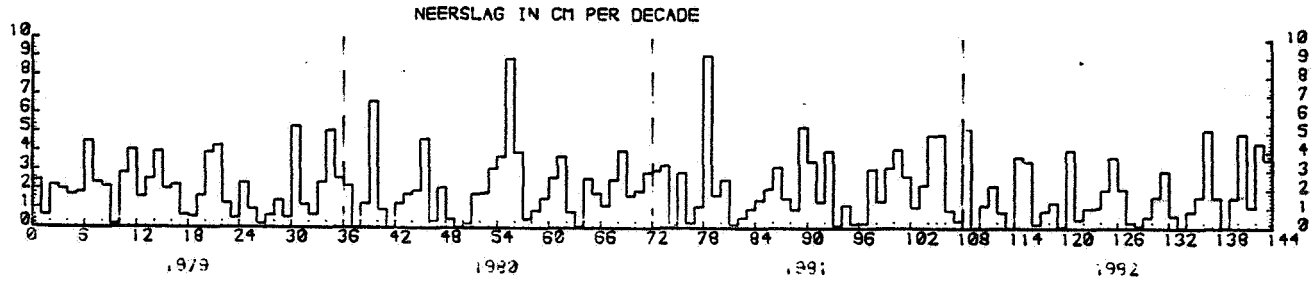
De bodemfysische eigenschappen waren beschikbaar gesteld in de vorm van grafieken van de $k - h_p$ en $\theta - h_p$ relaties voor vier bodem horizonten door STIBOKA. Als eerste stap in het calibratieproces moesten analytische functies bepaald worden die in overeenstemming zijn met de meetgegevens. Er wordt verondersteld dat de kritische drukhoogte bij verzadiging atmosferisch is. De drukhoogte aan het maaiveld wordt begrensd door atmosferische druk en de druk die hoort bij pF = 4,2. De tijdsafhankelijke randvoorwaarde variabelen werden als dagcijfers beschikbaar gesteld, en werden als zodanig direkt in het model gebracht. Echter met de beperking dat geen onderscheid tussen bodem verdamping en transpiratie werd gemaakt, waarbij volgens afspraak, bodemverdamping buiten beschouwing werd gelaten en alle evapotranspiratie als plantonttrekking werd beschouwd. Als beginvoorwaarde voor de hele simulatieperiode werd er uitgegaan van een evenwichtsprofiel met stroming nul.

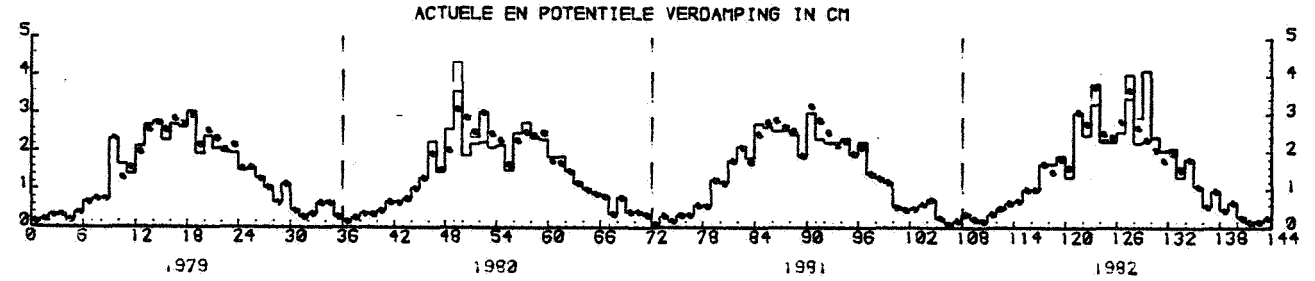
De feitelijke calibratie geschiedde door middel van de plantontrekkingsfunktie. Nadat de wortelverdeling zodanig was gekozen dat wordt voldaan aan de observatie dat 80% van de wortels zich binnen een diepte van 25 cm bevinden, bleven er twee parameters over om op te ijken. In principe bepaalt de eerste van deze twee parameters de perioden waarin transpiratiereductie optreedt, en de tweede de grootte van de transpiratiereductie.

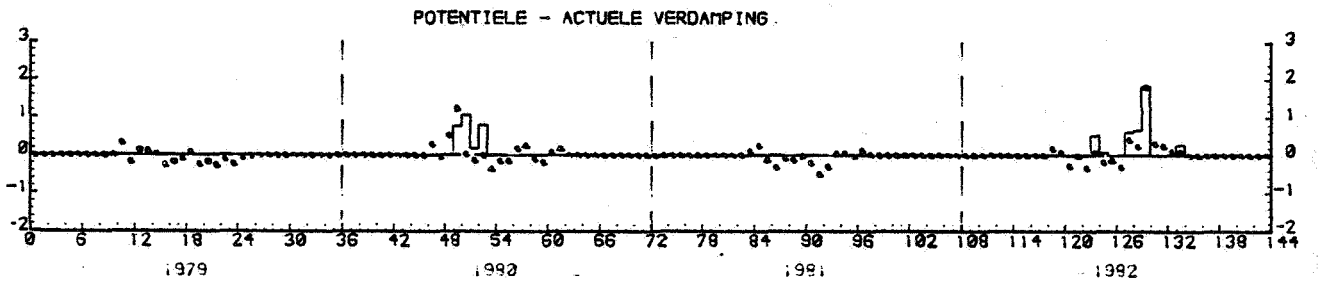
Het bleek onmogelijk om de eerste parameter zo te kiezen dat alle perioden met verdampingsreductie goed weergegeven worden. Uiteindelijk werd deze parameter zo afgesteld dat in 1977 en 1978 net verdampingsreductie optrad. Vervolgens wordt de tweede ijkparameter gekozen om een goede weergave van de waargenomen verdamping over 1976 te reproduceren. Echter, omdat de periode van mei 1976 moeilijk te simuleren werd geconstateerd, werd deze parameter feitelijk op de periode juni tot en met september 1976 geijkt.

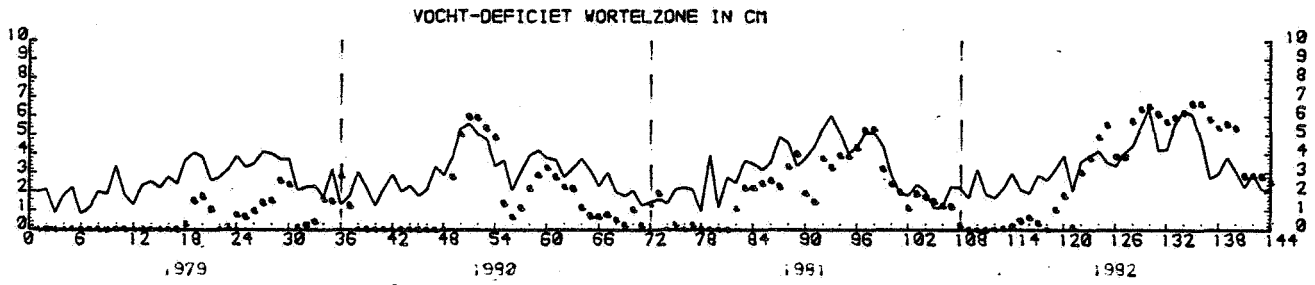


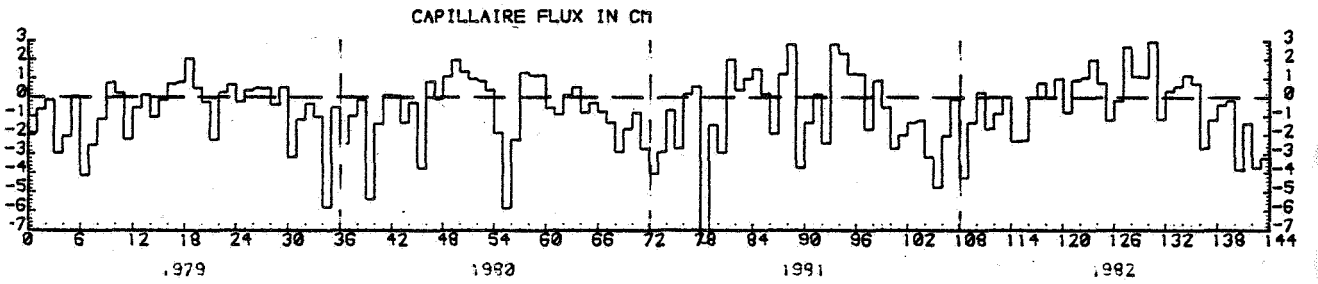
BEREKENING MET HET MODEL : S O M O F

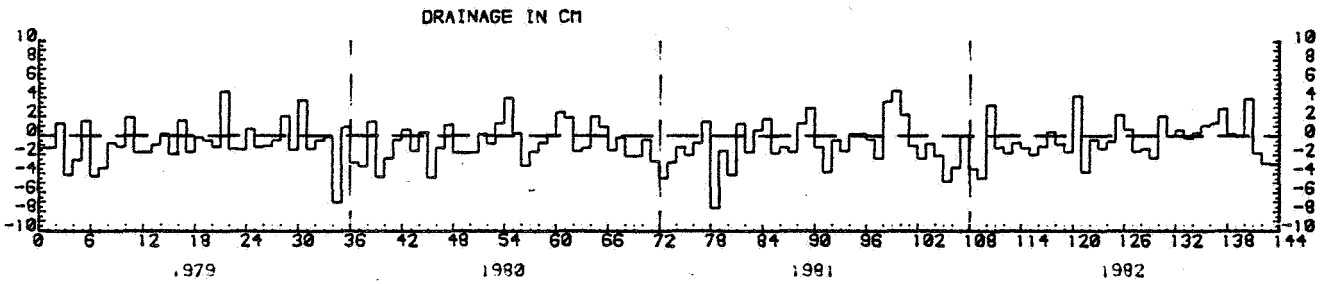


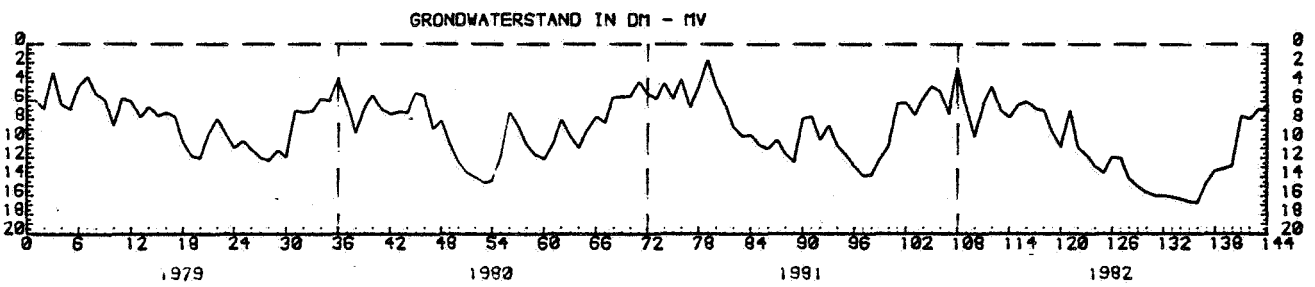












BEREKENING MET HET MODEL : S O M O F

E SWATRE

R.A. Feddes en M. de Graaf

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 continuiteitsvergelijking 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 algorithme.
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:

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

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

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

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

waarin $\alpha(h)$ = dimensieloze functie van de drukhoogte
S_{max} = maximaal mogelijke wateronttrekking door de wortels (d^{-1})

gedefinieerd als

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

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

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

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

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.

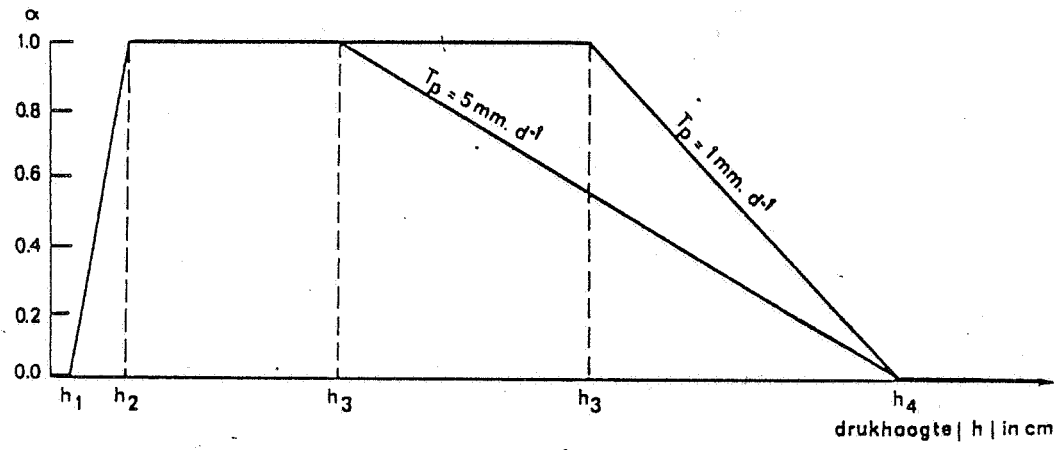


Fig. 1. Het verloop van de dimensieloze sink-term variabele α als functie van de absolute waarde van de drukhoogte van het bodemvocht, $|h|$ (naar Feddes et al., 1978)

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) algorithme. De tijdstaplengte is variabel en wordt in afhankelijkheid van de verandering van het vochtgehalte vastgesteld volgens:

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

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

$$(\Delta\theta/\Delta t)^{j}_{max} = \underset{i=1,\ldots,n}{Max} \; S^{j}_{i} + |(\Delta q/\Delta z)^{j}_{i}| \qquad (6)$$

waarin S^{j}_{i} is de sink term in compartiment i, q^{j}_{i} 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 per bodemlaag:
- vochtkarakteristiek, $h(\theta)$
- 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)
- vertikale 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 gewasproduktiemodel 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
- gewasproduktie
- 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).

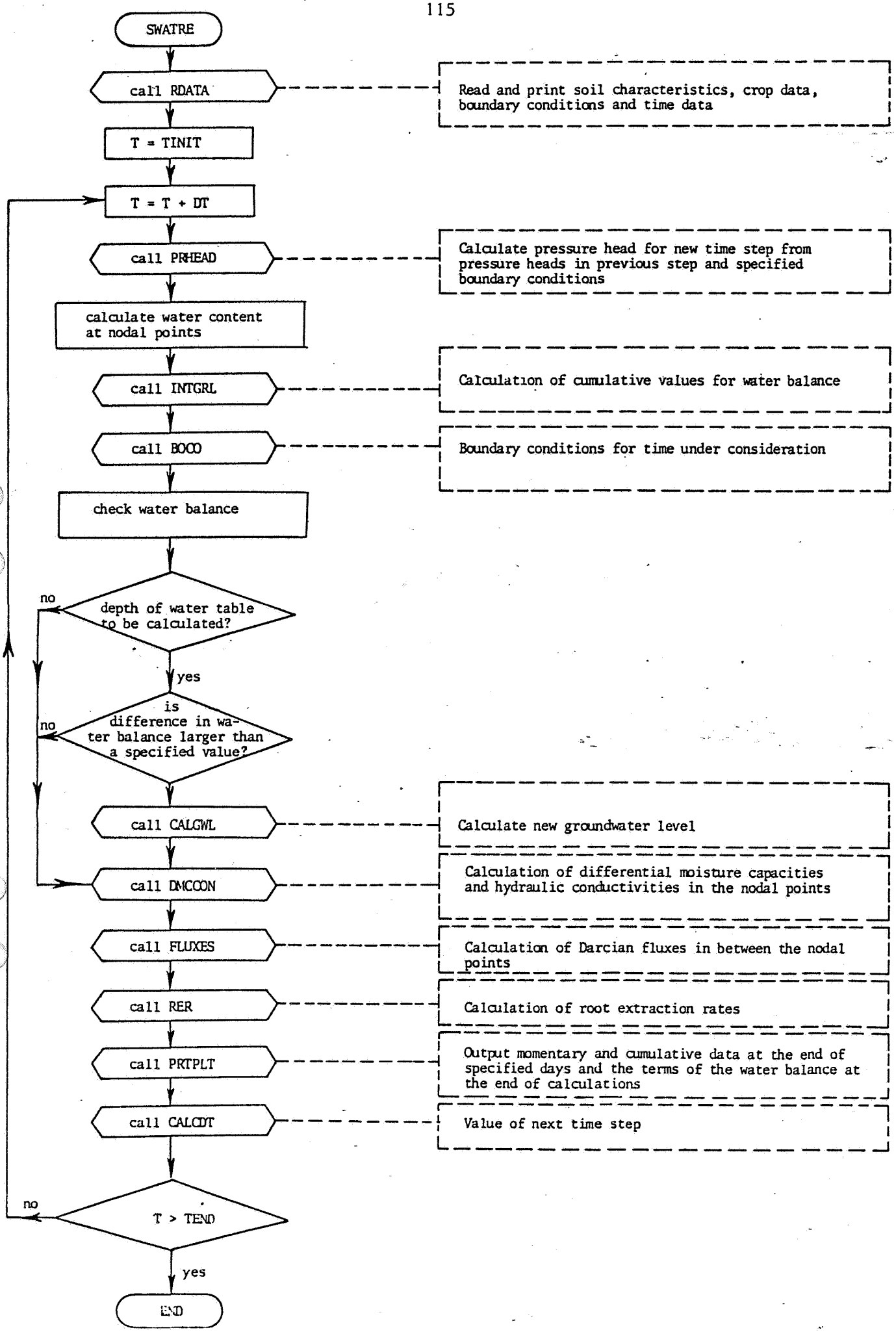
FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARADNY. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen. pp. 189 (1978).

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).

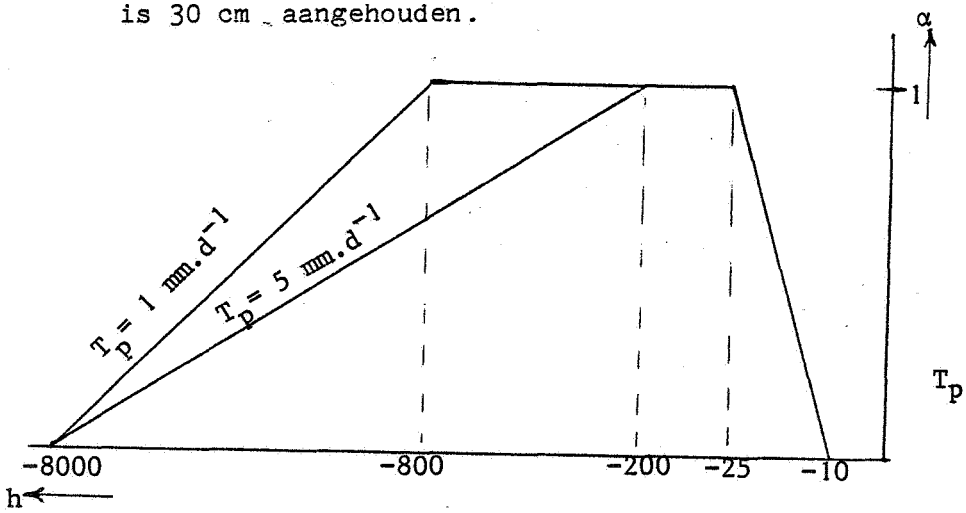
HOOGLAND, J., C. BELMANS and R.A. FEDDES. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. Acta Hortic. 119: 123-136 (1981).

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.


SWATRE
call RDATA
Read and print soil characteristics, crop data, boundary conditions and time data
T = TINIT
T = T + DT
call PRHEAD
Calculate pressure head for new time step from pressure heads in previous step and specified boundary conditions
calculate water content at nodal points
call INTGRL
Calculation of cumulative values for water balance
call BOCO
Boundary conditions for time under consideration
check water balance
depth of water table to be calculated?
no
yes
is difference in water balance larger than a specified value?
no
call CALGWL
Calculate new groundwater level
call DMCCON
Calculation of differential moisture capacities and hydraulic conductivities in the nodal points
call FLUXES
Calculation of Darcian fluxes in between the nodal points
call RER
Calculation of root extraction rates
call PRTPLT
Output momentary and cumulative data at the end of specified days and the terms of the water balance at the end of calculations
call CALCDT
Value of next time step
T > TEND
no
yes
END

Calibratie SWATRE

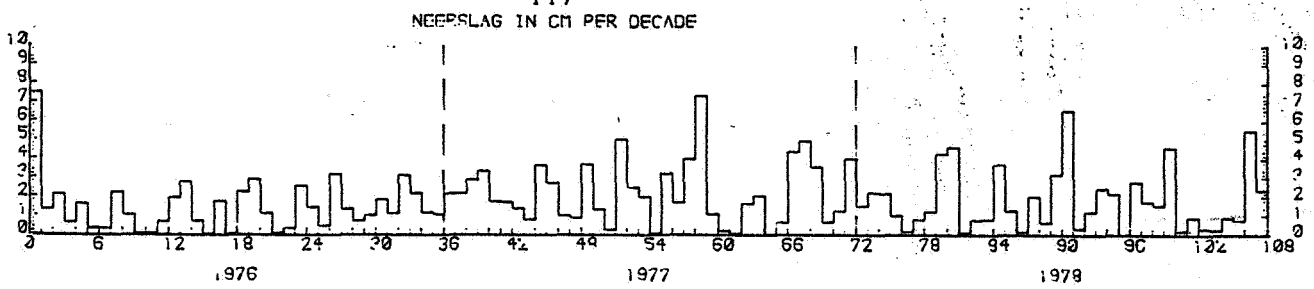
De calibratie van SWATRE wordt meestal uitgevoerd door de kritische waarden h_1-h_4 van de gewasafhankelijke dimensieloze sink-term variabele α (zie Figuur 1, pag. 108) te variëren. In het huidige geval zijn de in de onderstaande figuur aangegeven waarden voor h_1-h_4 aangehouden zoals die al enige jaren voor grasland worden gebruikt. Als dikte van de wortelzone is 30 cm aangehouden.

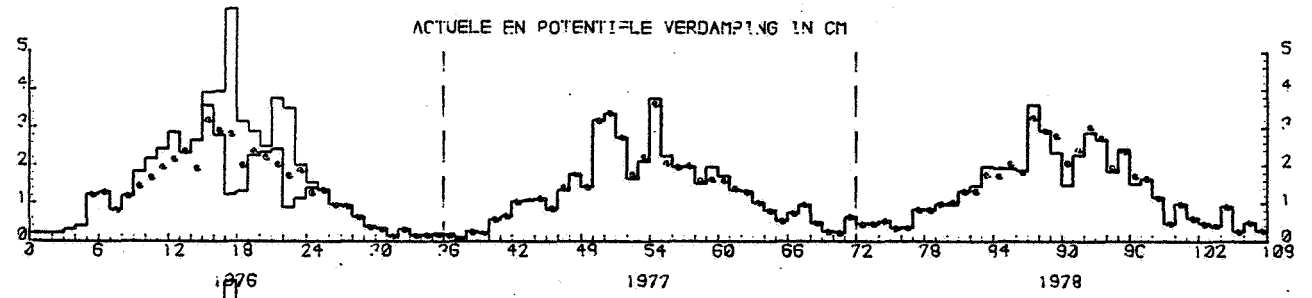


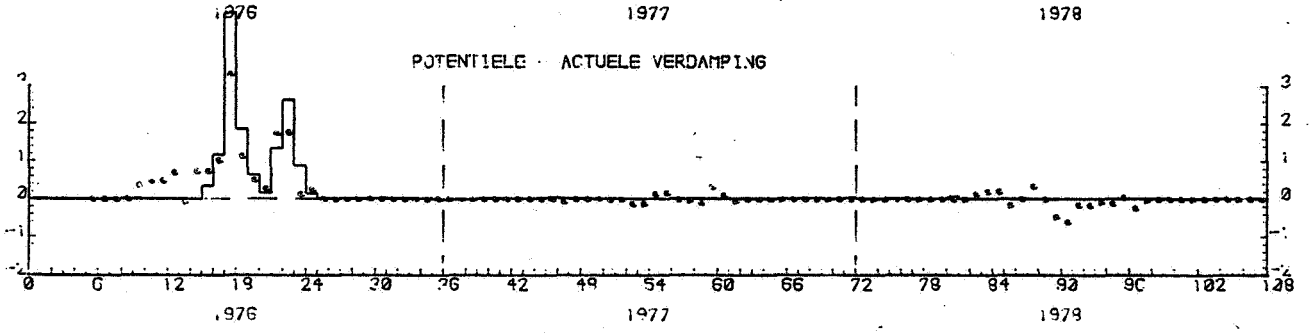
T_p = potentiele transpiratie

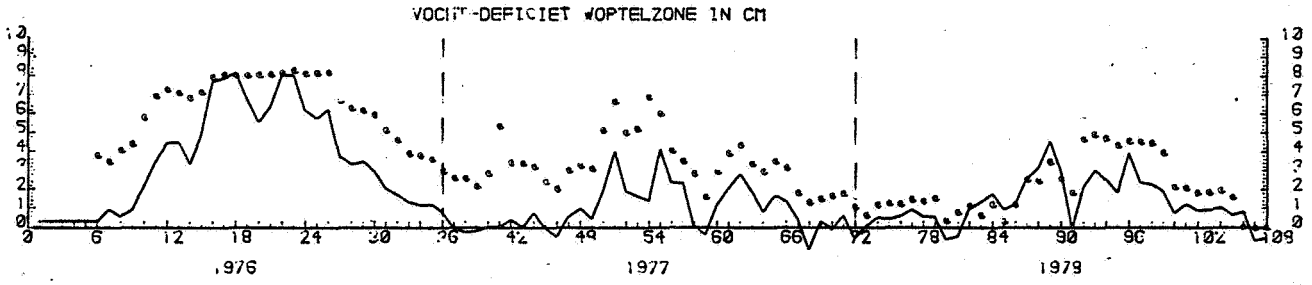
Vergelijking tussen berekende en gemeten verdamping was bevredigend. Alleen in decadenummer 13 trad een significant verschil op tussen de 'gemeten' en berekende verdamping. Een analyse van de dagelijkse 'gemeten' verdamping toont aan dat de 'gemeten' verdamping in genoemde periode mogelijk is overschat.

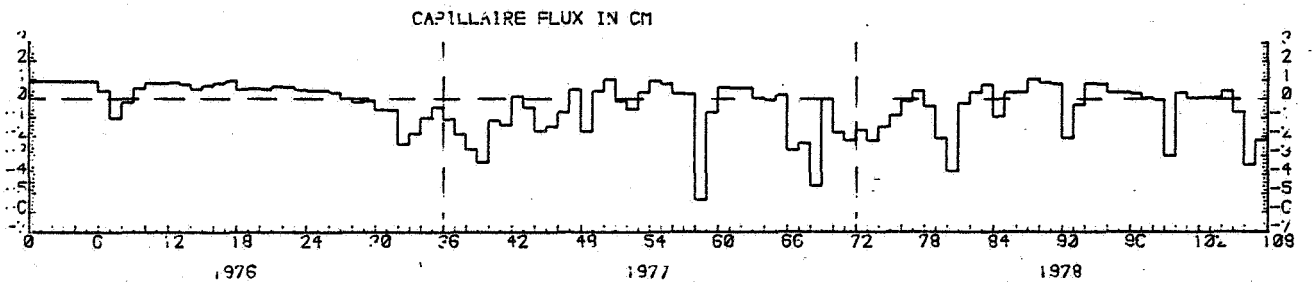
Voor een uitvoerig verslag van de modelresultaten van SWATRE over de calibratie- en verificatieperiode zie: Nota.
M. de Graaf and R.A. Feddes, 1984. MODEL SWATRE: Simulatie van de waterbalans van grasland in het Hupselse Beekgebied over de periode 1976 tot en met 1982: ICW nota 1563, 34 pp.

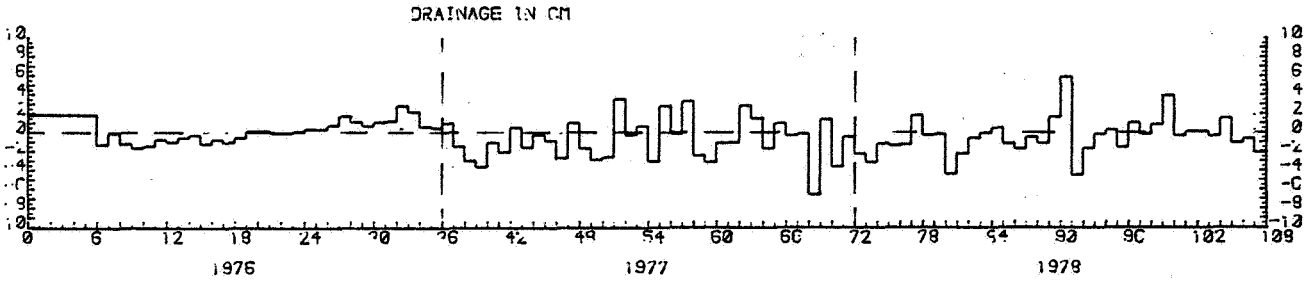


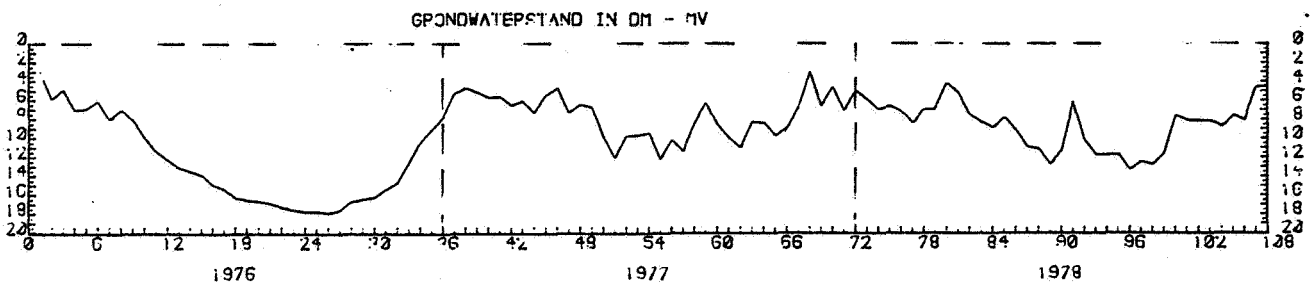




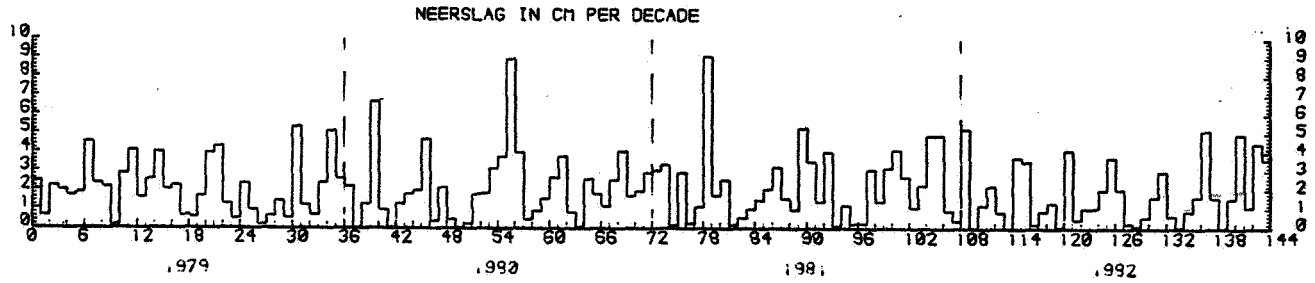


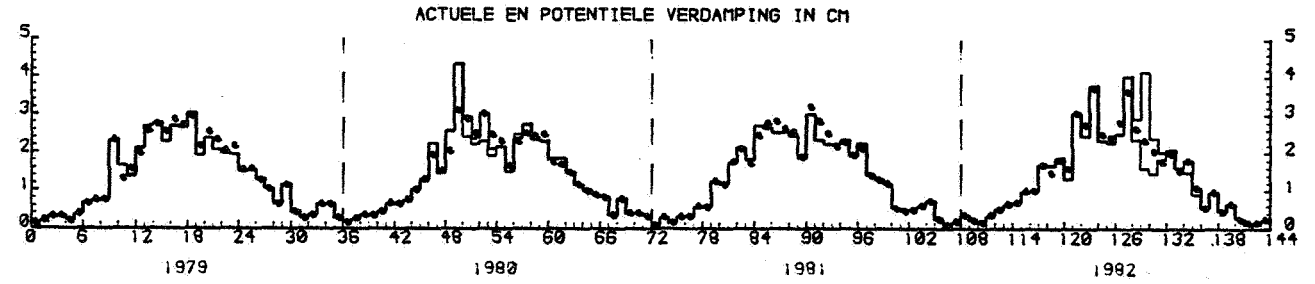


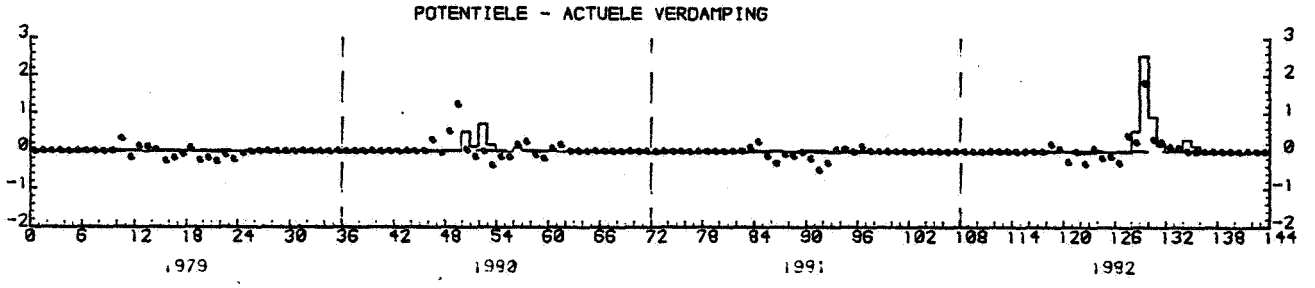


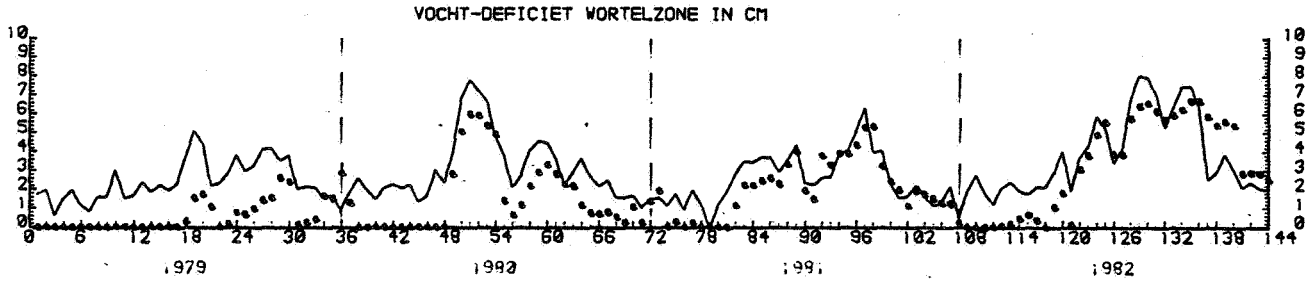


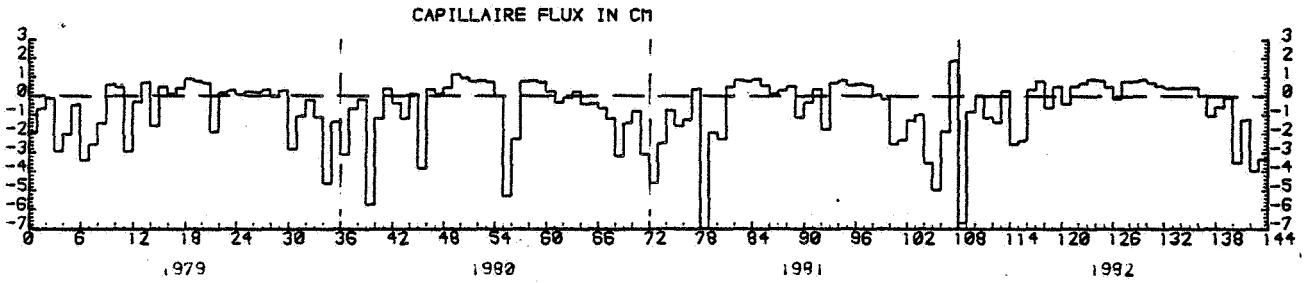
BEREKENING MET HET MODEL : S W A T R E

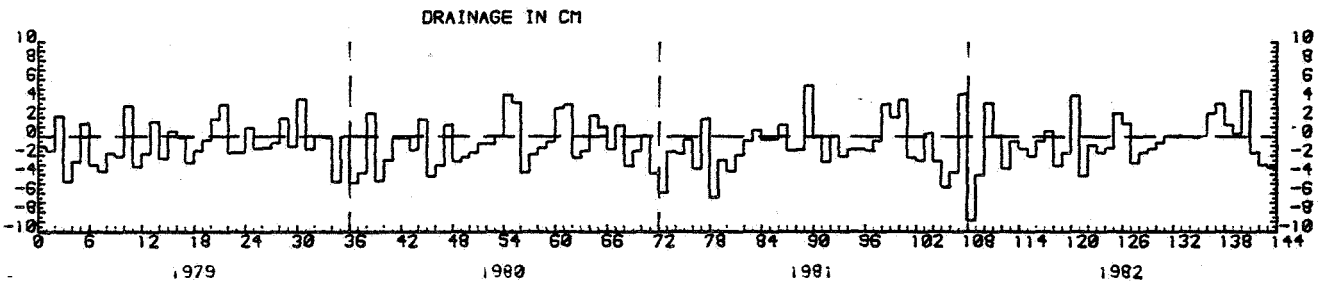


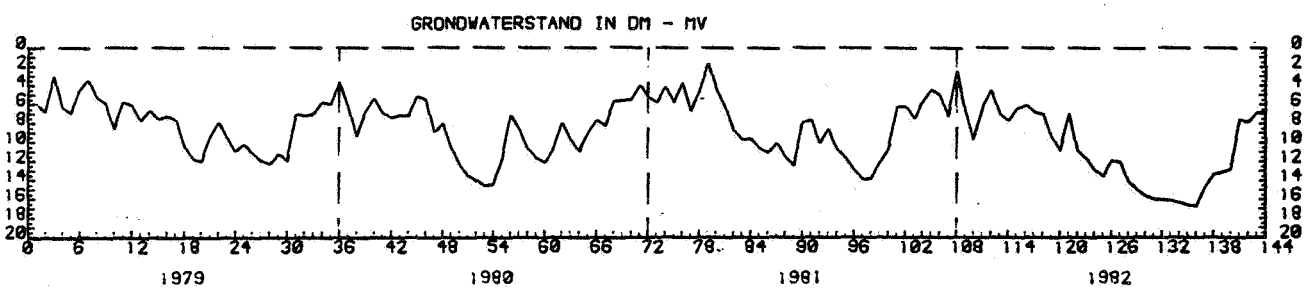












BEREKENING MET HET MODEL : S W A T R E

F MUST 2

Th.J. van de Nes

INLEIDING

Het Model Must heeft de mogelijkheid om E_{pot} als invoer in te lezen zoals bijvoorbeeld de E_{pot}^{TH+O}.
De Laat heeft van deze optie gebruik gemaakt. Een andere mogelijkheid is dat het model de E_{pot} uitrekent op basis van de standaardmeteogegevens zoals windsnelheid, relatieve zonneschijnduur, relatieve luchtvochtigheid en temperatuur en een aantal plantkenmerken. In het Model Must 2 (bij de Provincie Gelderland UNSAT genoemd) is van deze optie gebruik gemaakt. In het rapport van de ad hoc groep Verdamping is in het kader van de Begeleidingsgroep GELGAM voor een aantal landbouwgewassen loofbos en naaldbos een uitvoerige beschouwing aan deze benadering gewijd. Het meteosysteem, plantsysteem en het bodemvochtsysteem komen hierbij in onderlinge samenhang aan de orde.
Bij de calibratie van MUST 2 wordt in afwijking van het rapport van de ad hoc groep Verdamping, tevens ook de E_{pot} geoptimaliseerd op basis van de gemeten netto-straling. Uitgangspunt hierbij is geweest dat voor een uitgestrekt goed van water voorzien gebied op basis van de energiebalans de verdamping op warme en droge dagen niet veel groter kan zijn dan de gemeten nettostraling. Advectie wordt hierbij verwaarloosd. E_{pot}^{TH+O} blijkt volgens metingen in Hupsel, maar ook in Cabauw op warme en droge dagen niet meer aan de energiebalans te voldoen. In het rapport van de ad hoc groep Verdamping is hieraan aandacht besteed. Dit is dan ook de reden waarom bij MUST 2 van de E_{pot}^{TH+O} afgeweken is. Bij de huidige optimalisatie is thans het interceptieproces niet afzonderlijk in de beschouwing betrokken, maar impliciet meegenomen bij de optimalisatie van de stomatale weerstand.

MODELBESCHRIJVING MUST 2

Het model Must 2 beschrijft de waterbeweging in de onverzadigde zone op dezelfde wijze als in het Model MUST. In het model MUST 2 is echter de E_{pot} als volgt gedefinieerd:

$$E_{pot} = \frac{1}{1+A\, r_s'/r_a} \cdot E_{wet} \qquad (1)$$

met $r_s' = 50 + r(h, \text{blad}_{pot})$

Laatstgenoemde term is de stomatale weerstand, die afhankelijk is van de bladwater potentiaal bij potentiële verdamping.

De transportvergelijking van het gewas bij potentiële verdamping luidt als volgt:

$$h,\ blad_{pot} = E_{pot}\ (r_{pl} + r_w) + h_p \qquad (2)$$

waarin $h,\ blad_{pot}$ is de bladwater-potentiaal bij potentiële verdamping, r_{pl} is de plantweerstand, r_w is de wortelweerstand en h_p is de bodemvocht-potentiaal aan de onderkant van de wortelzone. Bij het berekenen van de verdamping op dagbasis moeten alle genoemde weerstanden beschouwd worden als gemiddelde waarden over een dag.
Voor het berekenen van de E_{pot} dienen de vergelijkingen (1) en (2) iteratief te worden opgelost.
In de E_{pot}^{TH+0} is in vergelijking (1) r_s' = 65 sec/m aangehouden.
In MUST 2 r_s' is geen constante, maar mede afhankelijk van de bladwater-potentiaal. Deze laatste grootheid is mede afhankelijk van de E_{pot} volgens vergelijking (2). Hieruit volgt dat r_s' toeneemt naarmate E_{pot} toeneemt. Het gewas vertoont hierdoor een zelfregulerende functie.
Ten behoeve van de definitie van E_{pot} zijn de volgende aannamen gedaan:

h_p = - 100 cm oftewel de pF = 2.

r_{pl} = 5000 dagen

$r_w = {}^{0,42}/_{K\,(100)} = {}^{0,42}/_{0,041} \approx$ 10 dagen.

Gezien de relatief lage waarde is deze op 0 gesteld, dus $r_w = 0$.

Bij de calibratie van MUST 2 wordt $r\ (h,\ blad_{pot})$ geoptimaliseerd op basis van de gemeten actuele verdamping onder natte omstandigheden en de gemeten netto-straling voor zover de omstandigheden duidelijk zeer warm en droog zijn. Dit wil zeggen de E_{pot} mag dan niet veel hoger worden dan de gemeten netto-straling.
Advectie is hierbij dus verwaarloosd.

Analoog aan de berekening van de E_{pot} wordt tegelijkertijd de E_{act} berekend volgens dezelfde vergelijkingen (1) en (2) met dit verschil echter dat nu geldt: r_s = 50 + r(h, blad). Laatstgenoemde term is de stomatale weerstand, die afhankelijk is van de bladwater-potentiaal bij de actuele verdamping.

$h, blad = E_{act} (r_{pl} + r_w) + h_p$ (3)

waarin $r_w = 0,42/K(h_p)$.

De bladwater-potentiaal is nu mede afhankelijk van de uitdrogingsgraad van de grond via h_p en r_w. Deze grootheden worden door het model voor de onverzadigde zone uitgerekend. Ook in dit geval wordt de r(h, blad) geoptimaliseerd.

Uit het bovenstaande is duidelijk dat de optimalisatie van r(h, blad) afhankelijk is van de aannamen omtrent r_{pl} en r_w. Indien andere aannamen worden gedaan heeft dit gevolgen voor de geoptimaliseerde r(h, blad). Met verschillende combinaties van deze weerstanden kan binnen bepaalde grenzen hetzelfde resultaat worden bereikt. Dit is in deze beschouwing belangrijk, omdat er nogal wat onzekerheid bestaat omtrent de werkelijke waarde van de r_{pl} en de r_w.

CALIBRATIE MUST 2

In het volgende zal nu worden ingegaan op de optimalisatie van de r(h, blad) curve. De curve kan worden opgesplitst in globaal twee delen.
Een traject van 0-$h,blad_{pot}$ bepalend voor de $r(h,blad_{pot})$ en dus voor de E_{pot} en een traject van $h,blad_{pot}$ en hoger bepalend voor de r(h,blad) en dus bepalend voor de E_{act}, waarbij deze lager is dan de E_{pot}.
Het eerste traject lopend van ca. 0-3000 cm (bladwater-potentiaal) is geoptimaliseerd op basis van de gemeten E_{act} over de potentiële jaren 1977 en 1978 en op basis van gemeten netto-straling voor warme en droge dagen in vooral 1976, maar ook in 1977 en 1978.
Het tweede traject lopend van ca. 3000 cm en hoger (bladwater-potentiaal) is geoptimaliseerd op basis van de gemeten E_{act} in het jaar 1976 in vooral de droge periode. De dagwaarnemingen zijn hierbij als uitgangspunt gekozen.
Een 4-tal curven met een S-vormig verloop zijn als uitgangspunt gekozen (zie figuur 1) voor de optimalisatie.
De curven 1 en 3 geven in alle jaren een te lage waarde van de E_{pot} en van de E_{act}.
De curve 4 gaf goede waarden voor de E_{pot} in de jaren 1977 en in 1978, echter in 1976 iets te lage waarden voor de E_{pot}. Voor de E_{act} in 1976 worden te lage waarden gevonden en werd het verloop op dagbasis minder goed beschreven.
De curve 2 voldoet het beste aan zowel de E_{pot} als de E_{act} voor de drie calibratiejaren (figuur 2).

Uit deze grafiek valt de volgende relatie tussen de E_{pot} en de r_s' af te leiden (tabel 1):

Tabel 1. Relatie tussen E_{pot} en r_s'.

E_{pot} mm/etm.	r_s' sec/m
$\leqslant$ 2	50
3	ca. 55
4	ca. 80
5	ca. 150
6	ca. 190

In de formule van de E_{pot}^{TH+O}, waar een r_s' = 65 sec/m wordt aangehouden blijkt dit goed overeen te komen bij een E_{pot} tussen de 3 en 4 mm/etmaal. Bij een hogere waarde van de E_{pot} wordt door THOM en OLIVER een te lage waarde voor de r_s' aangehouden, waardoor de berekende potentiële verdamping ver boven de netto-straling uitkomt.

Dit wordt geïllustreerd in figuur 3 (zie arcering), waar voor het jaar 1976 op dagbasis zijn uitgezet de E_{pot}, E_{pot}^{TH+O} en de gemeten netto-straling Q* voor de droge periode juni-juli. Voor het groeiseizoen 1976 (15/4 tot en met 15/9) betekent dit dat de E_{pot}^{TH+O} 465 mm bedraagt, terwijl E_{pot} volgens MUST 432 mm bedraagt, d.w.z. 33 mm ($\approx$ 7 %) lager.

In figuur 4 is dit eveneens weergegeven voor een droge periode in 1982. Dit betekent dat de E_{pot} in dit jaar ca. 15 mm lager is dan de E_{pot}^{TH+O}

RESULTATEN

In figuur 5 *) zijn op decadebasis voor een aantal hydrologische grootheden de resultaten weergegeven van de calibratieperiode 1976 tot en met 1978.

In figuur 6 *) zijn de resultaten weergegeven voor verificatieperiode 1979-1982.

In tabel 2 zijn voor de groeiseizoenen (15/4 tot en met 15/9) de gemeten vochttekorten en de berekende vochttekorten weergegeven voor de gehele studieperiode.

*) In figuur 5 en 6 wordt niet E_{pot}^{TH+O} weergegeven maar E_{pot}.
Dit geldt ook voor $E_{pot} - E_{act}$.

Tabel 2. Gemeten en berekende vochttekorten (15/4 tot en met 15/9).

	"gemeten"			MUST 2		
	E_{pot}^{TH+0}	E_{act}	Vochttekort	E_{pot}	E_{act}	Vochttekort
1976 *)	465	330	135	432	328	104
1977	331	329	2	326	325	1
1978	337	349	- 12	336	335	1
1979	337	349	- 12	338	338	0
1980	370	354	16	363	358	5
1981	356	366	- 10	347	347	0
1982	397	373	24	387	361	26
Totaal	2593	2450	143	2529	2392	137

*) Vanaf 1 maart.

Hieruit blijkt dat vooral in het jaar 1976 door MUST 2 een lager vochttekort wordt uitgerekend, als gevolg van een lager berekende E_{pot}. Hetzelfde geldt enigszins voor 1980.

In tabel 3 zijn voor de jaartotalen E_{pot}^{TH+0} en E_{pot}, E_{act} gemeten en E_{act} berekend weergegeven.

Tabel 3. E_{pot}^{TH+0}, E_{pot}, E_{act} (gemeten) en E_{act} (MUST 2).

	E_{pot}^{TH+0}	E_{pot}	E_{act} (gemeten)	E_{act} (MUST 2)
1976 *)	575	545	439	439
1977	469	466	467	465
1978	477	477	489	476
1979	474	478	486	478
1980	520	513	504	507
1981	490	488	500	487
1982	534	520	510	490
Totaal	3539	3487	3395	3342

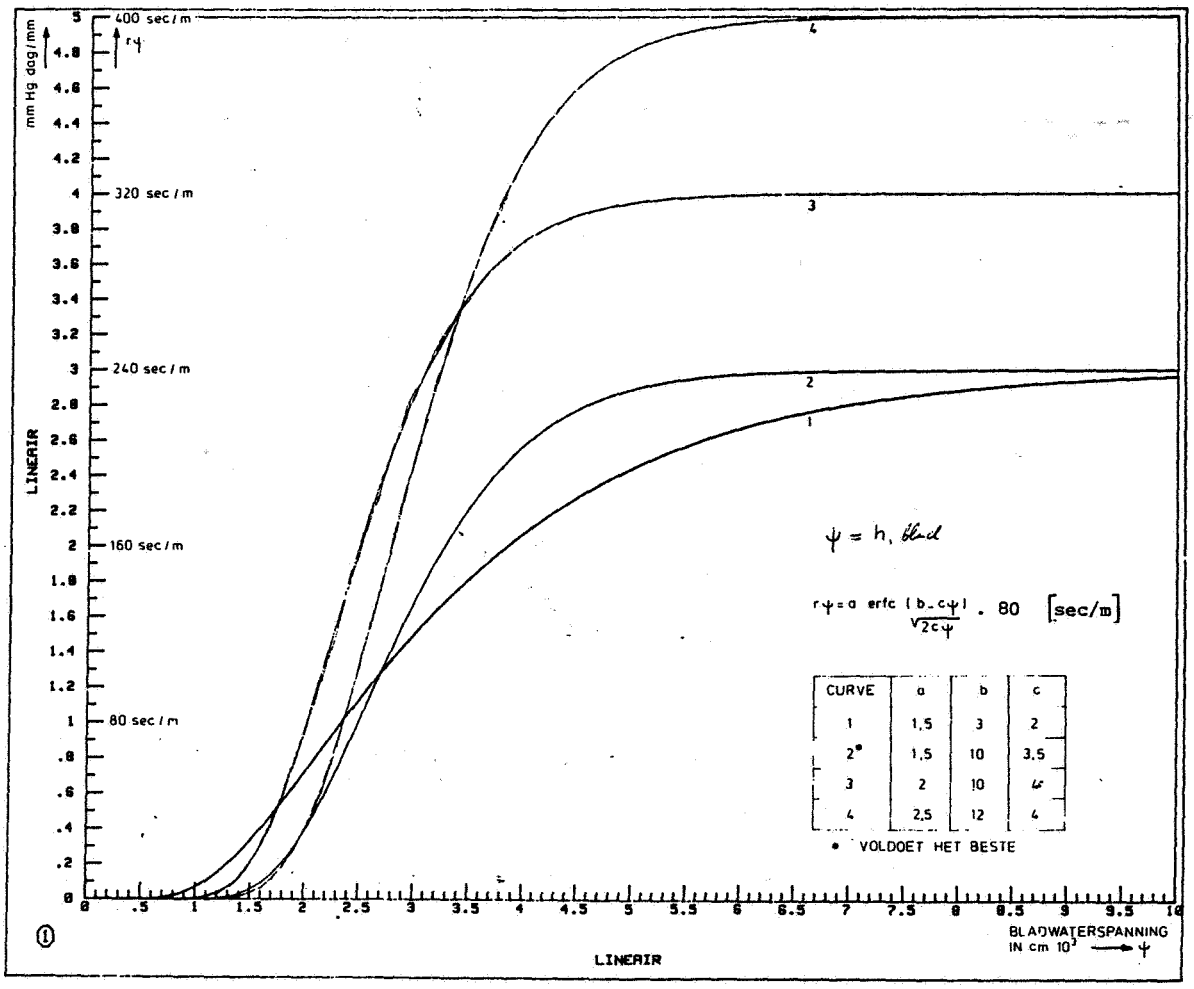
*) Vanaf 1 maart.

Uit deze tabel blijkt dat in de jaren met duidelijk droge en warme perioden (1976, 1980 en 1982) de E_{pot} lager is dan de E_{pot}^{TH+O}. Bij de E_{act} valt op dat de berekende waarden over het algemeen iets lager liggen dan de gemeten waarden. Over de gehele periode van 7 jaren is dit in totaal 53 mm. Gezien de nauwkeurigheid van de metingen kan worden geconcludeerd dat met het model MUST 2, waarbij uitgegaan wordt van de standaardmeteogegevens, de potentiële verdamping, de actuele verdamping en de vochttekorten goed worden beschreven. Ook de uitgevoerde toetsing aan de energiebalans is hierbij van belang geweest.

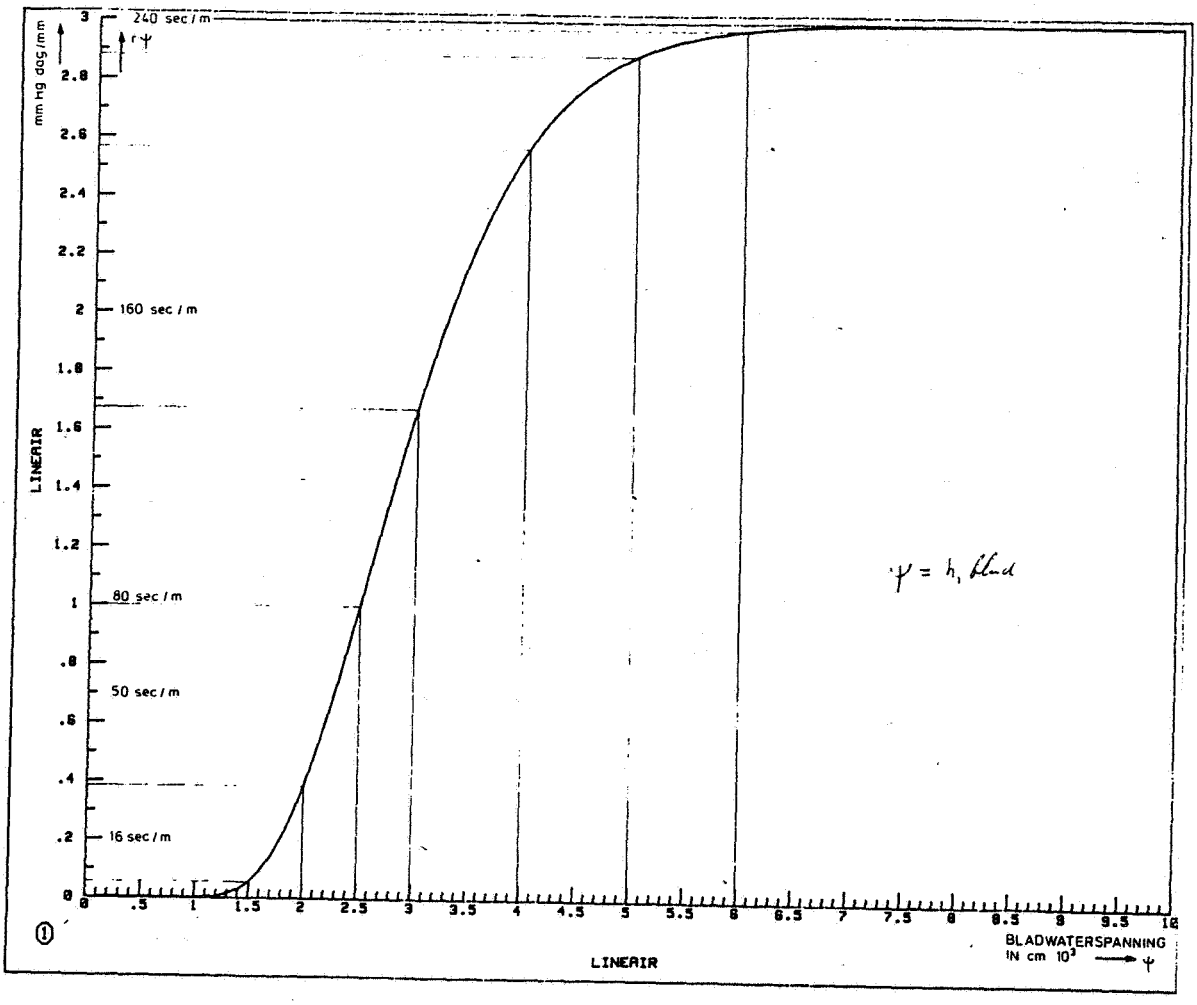
Tenslotte dient te worden opgemerkt dat bij zeer lokale ingrepen in de waterhuishouding als gevolg van advectie de E_{pot} en de E_{act} aanzienlijk kunnen toenemen. Het model MUST 2 geeft hiervoor echter nog geen pasklare oplossing. Meer onderzoek is noodzakelijk voor het inzicht en het effect van advectie op het verdampingsproces.

Literatuur:

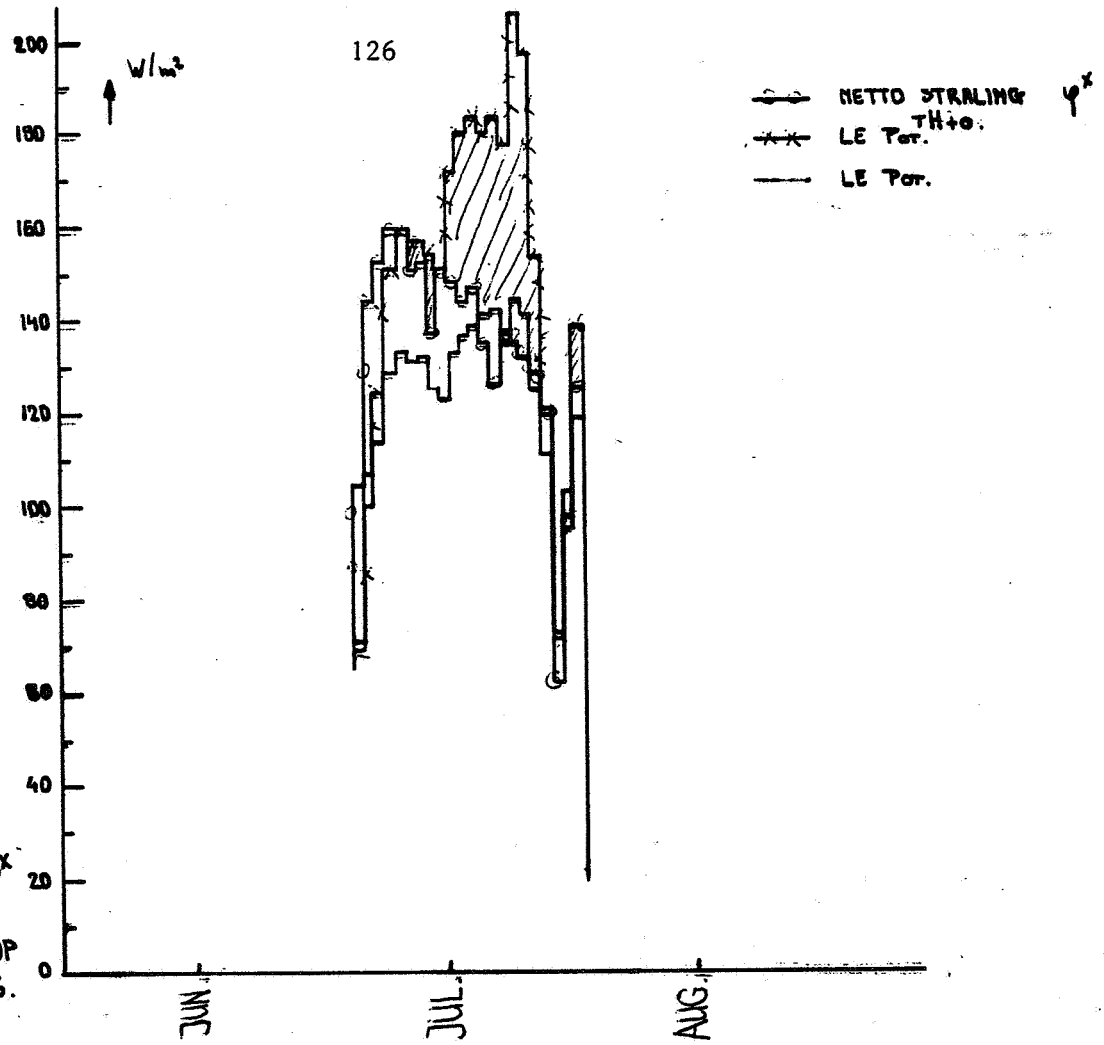
1. Ad hoc groep Verdamping (1984). Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologische model GELGAM. Editor Th.J. van de Nes, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer.
2. NES, Th.J. van de, H.J. Brinkhof en B.P. Akkers (1985). De reductie in verdamping van gras als functie van het bodemvocht met behulp van het model MUST 2. Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer (in druk).



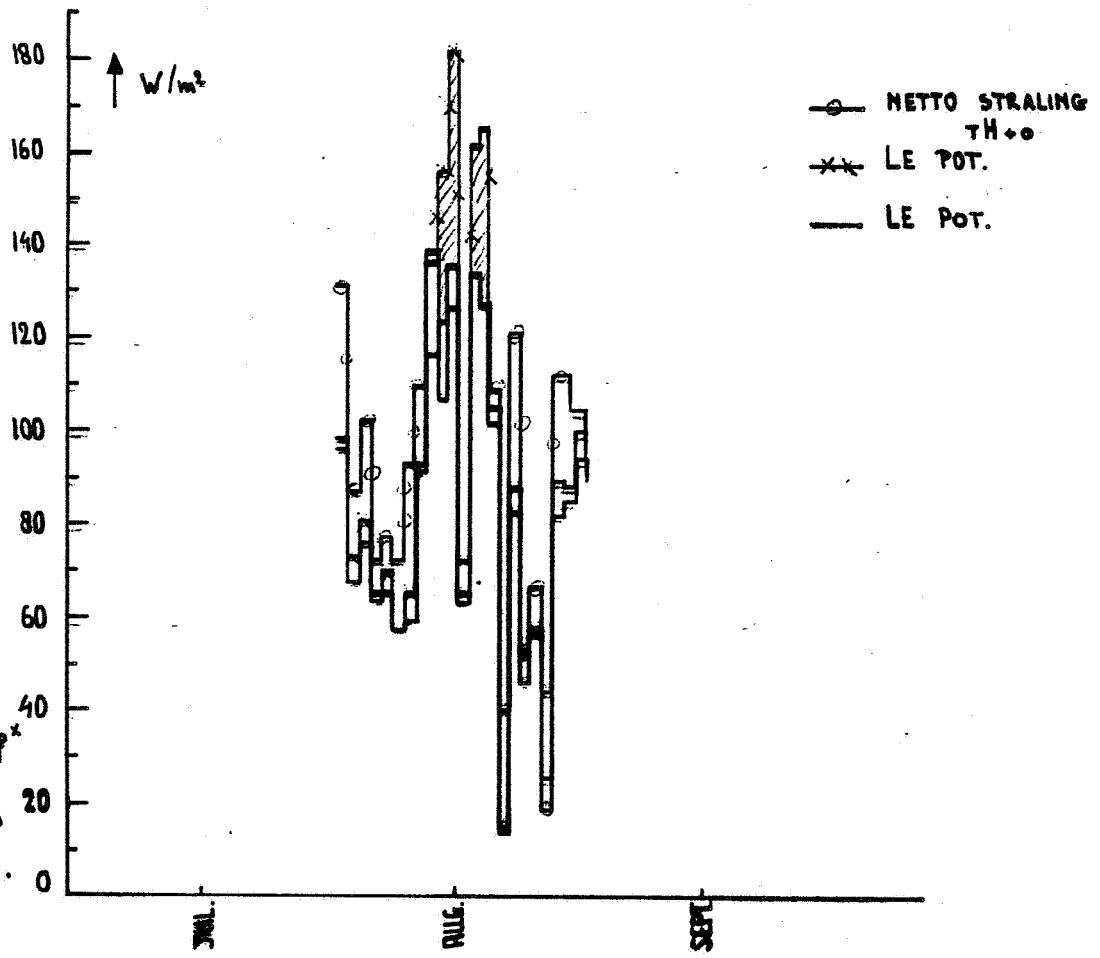
FIGUUR 1
4 ALTERNATIEVE r_ψ RELATIES



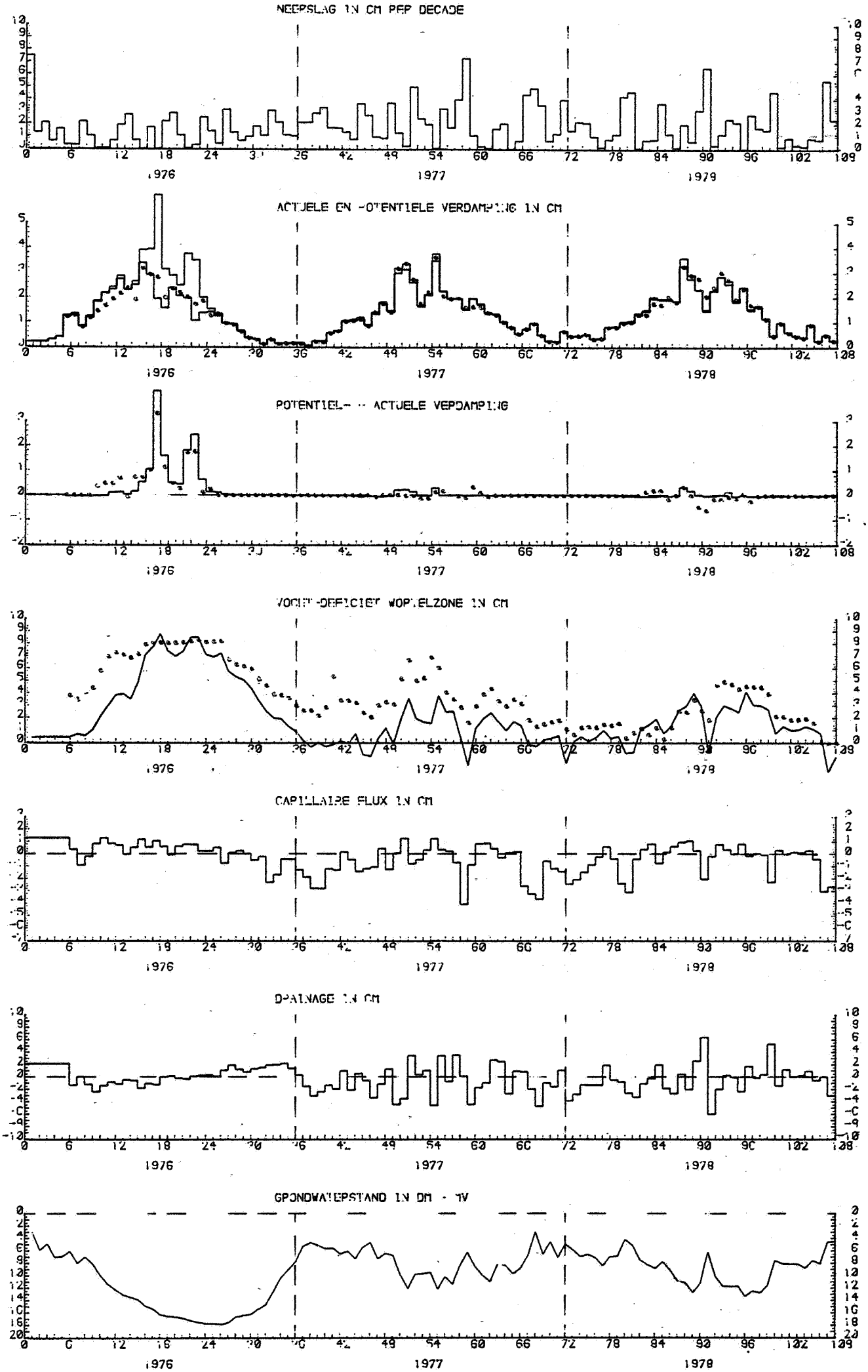
FIGUUR 2
DE GEOPTIMALISEERDE r_ψ RELATIE



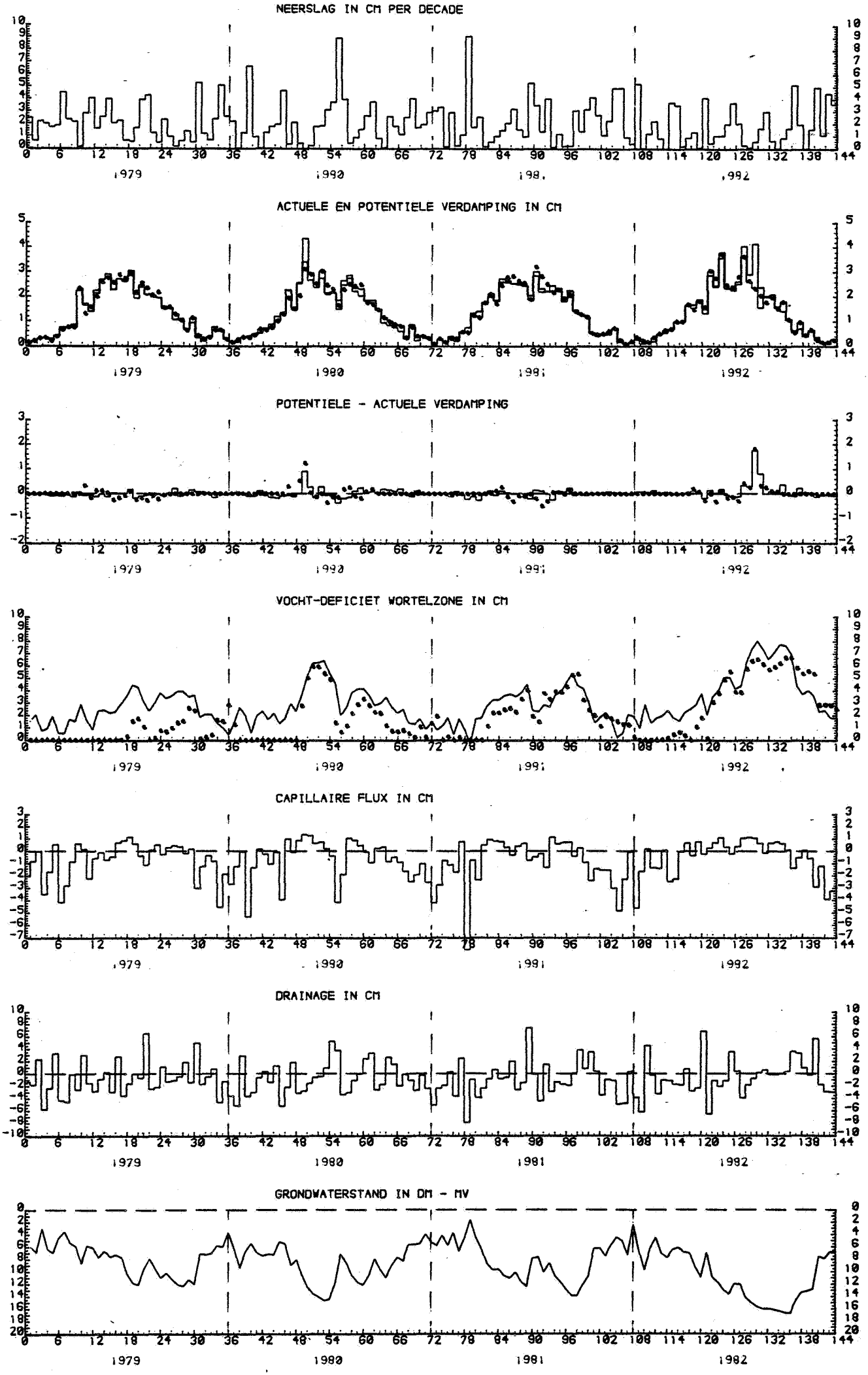
FIGUUR 3
DE NETTO STRALING φ^* TH + o
LE Pot. + LE Pot OP DAGBASIS VAN 1976.



FIGUUR 4
DE NETTO STRALING φ^* TH + o
LE Pot. + LE Pot OP DAGBASIS VAN 1982.



Figuur 5 BEREKENING MET HET MODEL : U N S A T= MUST 2



Figuur 6 BEREKENING MET HET MODEL : U N S A T = MUST 2

EVALUATIE VAN DE BEREKENINGSRESULTATEN

R.W.R. Koopmans

1 Inleiding

Elk van de modellen heeft met behulp van de eerder vermelde invoer gegevens tenminste de volgende decade resultaten berekend:

- de werkelijke verdamping E_{act} (mm)
- de vochtinhoud van de wortel zone V_r (mm)
- de flux door het vlak aan de onderzijde van de wortel zone v
- de flux door de onderrand van het systeem v_b

Bij de vergelijking van de modeluitkomsten in het kader van de studiedag lag de nadruk op de verdampingsuitkomsten. De periode waarover gegevens ter beschikking stonden liep van 1 maart 1976 t/m 24 december 1982.
De calibratie periode bestreek de eerste 103 decaden t/m 24-12-1978, de verificatie periode betrof 144 decaden van 5 januari 1979 t/m 24 december 1982. De kalenderjaren zijn verdeeld in 36 decaden van 10 dagen. Twee decaden n.l. die rond de jaarwisselingen van 79/80 en 80/81 zijn niet in de berekeningen meegenomen. Jaartotalen hebben dus betrekking op de hiergenoemde 36 decaden.

Alle eerder genoemde gegevens (zie blz. 14) werden als decade cijfers aan de modelbouwers ter beschikking gesteld. Voor de calibratieperiode ook de verdampings gegevens E_{act}, die voor de modelbouwers de belangrijkste toetsings mogelijkheid vormden.

Tabel 1 geeft een overzicht van de neerslag- en verdampings cijfers voor de gehele periode, de verdamping betreft de gemeten E_{act}.
Hieruit blijkt dat alleen tijdens de groeiseizoenen (18 decaden) van 1976 en 1982 de neerslag in belangrijke mate door de verdamping werd overtroffen.

Bij elke groep waarnemingen (b.v. van een jaar of een groeiseizoen) behoort een gemiddelde $\bar{x}$ en een (steekproef) variantie, dat is de som van de afwijkingen van het gemiddelde, gedeeld door het aantal waarnemingen. De standaardafwijking s wordt gedefinieerd als de wortel uit de variantie

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \qquad (2)$$

Indien men te maken heeft met bij elkaar behorende paren variabelen x en y dan is de covariantie gedefinieerd als:

$$\text{cov}\ (x,y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})\ (y_i - \bar{y}) \qquad (3)$$

De hierboven genoemde correlatie coefficient is de covariantie van E_w en E_m gedeeld door het product van de standaardafwijkingen en E_w en E_m.
De regressiecoefficient b_1, blijkt gelijk te zijn aan de covariantie gedeeld door de variantie van E_m.

Om de dispersie in een steekproef te beschrijven wordt dikwijls de z.g. variatiecoefficient gebruikt, die gedefinieerd is als

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \qquad (4)$$

Dat wil zeggen dat de standaardafwijking wordt uitgedrukt als fractie of percentage van het gemiddelde. Deze dimensoloze coefficient kan worden gebruikt om de consistentie van steekproeven met elkaar te vergelijken.
In deze evaluatie wordt de variatiecoefficient van een model (met betrekking tot verdamping) gedefinieerd als

$$\text{var.coeff.} = \frac{\sqrt{\frac{\Sigma (E_m - E_w)^2}{n}}}{\bar{E}_w} \qquad (5)$$

De variatiecoefficient van een model geeft dus een aanwijzing over de spreiding tussen modelberekende en waargenomen verdamping. De absolute fout van een model (m.b.t. verdamping) wordt berekend volgens:

$$A = \frac{\Sigma |E_w - E_m|}{n\ \bar{E}_w} \qquad (6)$$

Neerslag en verdamping tijdens calibratie en verificatie periode

	← calibratie →			← verificatie →			
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
ΣN	—	794.6	646.8	749.3	754.6	798.0	648.9
ΣE	—	466.4	487.8	484.2	501.2	498.5	510.7
$\Sigma N - \Sigma E_{act\,w}$	—	+328.2	+159.0	+265.1	+253.4	+299.5	+138.2
$\Sigma N - \Sigma E_{act\,w}$ groeiseizoen	-167.7	+ 24.7	- 67.9	-38.1	+ 15.3	- 93.2	-178.2
$\Sigma N - \Sigma E_{pot}$ groeiseizoen	-304.2	+ 22.5	- 59.7	-27.3	- 1.1	- 82.7	-202.3

Tabel 1.

2 Statistische kenmerken

Bij het vergelijken van de uitkomsten van de modellen met waargenomen cq uit waarnemingen berekende grootheden, gaat het uiteraard niet alleen om de juistheid van totalen over een bepaalde periode maar ook om de verschillen tussen waarneming en model in de tijd.

In de statistiek wordt de term regressie gebruikt om het verband tussen twee variabelen te beschrijven. Het ligt voor de hand waargenomen verdamping E_w en model berekende verdamping E_m met elkaar te vergelijken. In plaats van $E_w = fu(E_m)$ spreken we van de regressie van E_w op E_m. In het onderhavige geval is de te verwachten relatie: $E_w = E_m$. Om de mate van samenhang tussen model en waarneming te toetsen wordt regressie analyse gebruikt. In dit geval is de lineaire regressie functie:

$$E_w = b_o + b_1 \quad E_m \qquad (1)$$

waarin de regressiecoefficienten b_o en b_1 schattingen zijn, die zodanig bepaald worden dat de som van de kwadraten van de afwijkingen tussen waarnemingen en de te schatten lijn minimaal is.

De correlatie coefficient is een maat voor de juistheid van de lineaire regressiefunctie.

3 Vergelijking van de modeluitkomsten

3.1 Actuele verdamping

De potentiële verdamping werd steeds bepaald volgens de methode Thom en Oliver (STRICKER, 1981).Voor het winterhalfjaar werd er van uitgegaan dat de werkelijke verdamping E_{act} gelijk is aan E_{pot}.
Voor het zomer halfjaar werd E_{act} berekend met behulp van de profiel methode (STRICKER 1981). Elk van de modellen berekende E_{act} uit de gegeven potentiële verdamping met behulp van z.g. reductiefuncties (zie blz. 26) alleen MUST 2 berekent een eigen E_{pot}.
De werkelijke verdamping was voor alle modellen de belangrijkste verificatie grootheid.

Tabel 2 geeft een overzicht van de actuele verdamping (waargenomen en modelberekend) voor de verschillende kalenderjaren en groeiseizoenen van calibratie- en verificatie-periode, alle cijfers zijn afgerond op hele mm.

Periode	E_{pot}	E_{act}	DEMGEN	MUST	ONZAT	SOMOF	SWATRE
groeiseizoen 76	502	365	379	346	361	382	361
1977	469	466	468	466	463	467	467
groeiseizoen 77	361	359	362	359	355	360	361
1978	479	488	480	475	466	477	477
groeiseizoen 78	371	381	372	368	359	370	371
1979	473	484	474	471	472	473	474
groeiseizoen 79	382	393	382	380	341	382	382
1980	518	501	521	494	487	489	501
groeiseizoen 80	411	394	413	387	380	383	394
1981	488	499	489	481	484	488	490
groeiseizoen 81	396	406	395	389	391	395	396
1982	535	511	509	489	482	494	489
groeiseizoen 82	440	416	413	393	387	399	395

Tabel 2.

De grootste afwijkingen per groeiseizoen komen voor in 1976, 1978 en 1982 en bedragen maximaal 7%. De totaalcijfers per jaar vertonen minder spreiding, omdat gedurende het winterseizoen de actuele verdamping vrijwel gelijk is aan de potentiële verdamping, zodat verschillen tussen E_w en E_m voornamelijk in het groeiseizoen tot stand komen.

In 1978, 1979 en 1981 blijkt de som van E_{act} groter te zijn dan de som van E_{pot}, dit wordt veroorzaakt doordat twee verschillende methoden worden gebruikt om E_{pot} en E_{act} te berekenen tijdens het groeiseizoen (zie blz. 33 en 34). De door de modellen berekende E_{act} kan echter niet groter worden dan E_{pot}.

Een nadere analyse van de groeiseizoenen 1976 en 1982 levert de tabellen 3 en 4.

Verdampingsvergelijking groeiseizoen 1976

E_W vs E_m 18 decaden

ΣE_W= 365.1 ; $\overline{E_W}$= 20.3 ; s = 5.5

	Demgen	Must	Must 2	Onzat	Somof	Swatre
Σ Em	378.6	345.6	363.6	361.0	381.8	360.7
helling	0.67	0.53	0.67	0.74	0.78	0.45
stand. afw. helling	0.11	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15
intercept	6.22	10.14	6.72	5.53	3.69	11.31
corr. coëff.	0.82	0.63	0.76	0.77	0.80	0.60
abs. fout %	15.6	18.2	15.7	13.7	15.0	22.1
variatie coëff. %	19.2	26.4	20.2	18.7	17.9	29.4

Tabel 3.

Verdampingsvergelijking groeiseizoen 1982.

E_W vs E_m 18 decaden

$\Sigma E_W = 416.2$; $\overline{E_W} = 23.1$; $s = 6.7$

	Demgen	Must	Must 2	Onzat	Somof	Swatre
ΣE_m	412.9	392.9	400.2	386.6	399.2	394.9
helling	0.88	0.87	0.97	1.23	1.11	0.82
stand. afw. helling	0.07	0.09	0.07	0.11	0.09	0.08
intercept	3.02	4.17	1.54	- 3.29	- 1.40	5.08
corr. coëff.	0.95	0.92	0.97	0.94	0.95	0.93
abs. fout %	7.7	10.6	6.0	10.0	8.4	10.1
variatie coëff. %	9.7	13.5	8.6	12.9	10.4	13.1

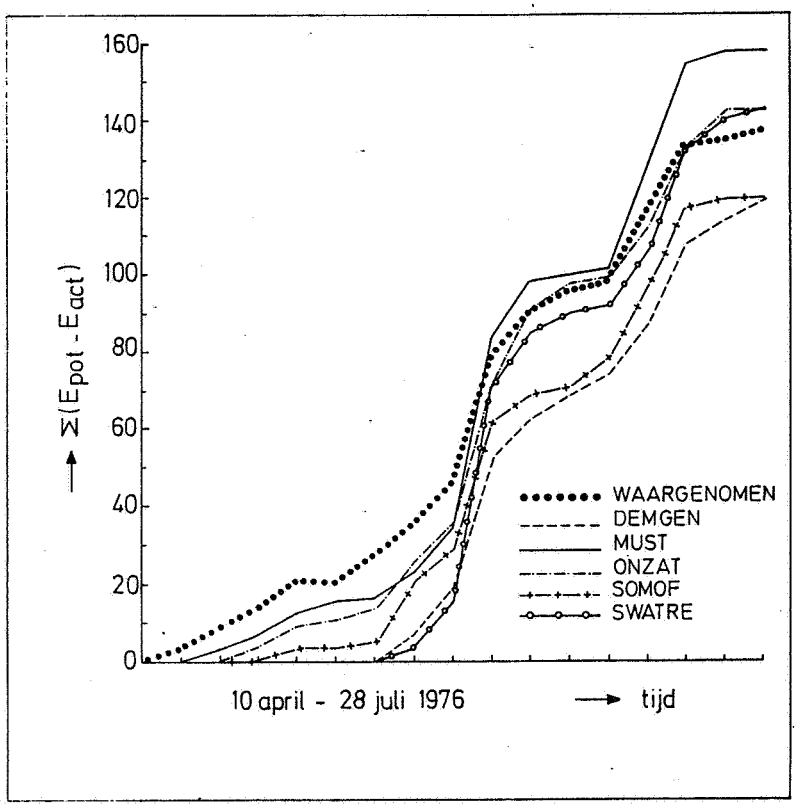
Tabel 4.

Uit de tabellen blijkt dat de spreiding voor alle modellen in 1976 beduidend groter is geweest, dit lijkt samen te hangen met de waarden E_{pot} en de verdampingsreductie ($E_{pot} - E_w$), die in 1976 eveneens veel groter waren.
De geringere spreiding in 1982 weerspiegelt zich ook in de correlatiecoefficienten en de absolute fout per model.

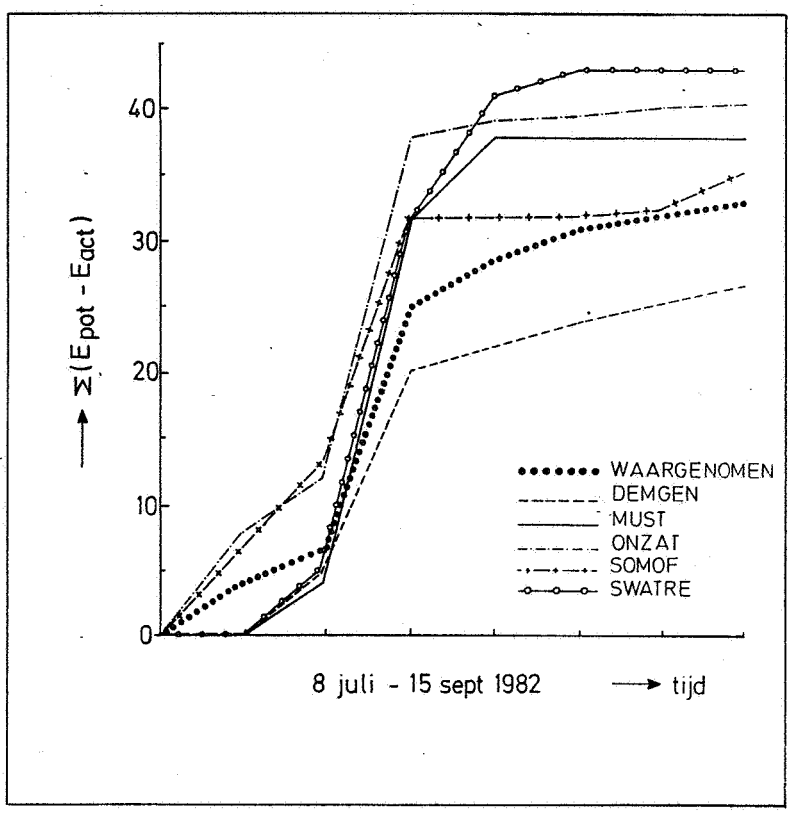
3.2 Verdampingsreductie.

Een belangrijke gebruiksfunctie van de modellen is het berekenen en voorspellen van verdampingsreductie $E_{pot}-E_{act}$ en daaruit voortvloeiende droogteschade.

Uit de gegevens blijkt, dat alleen gedurende de groeiseizoenen van 1976, 1980 en 1982 verdampingsreductie van enige betekenis is opgetreden.
Aaneengesloten perioden zijn bepaald schaars:
in 1976, 16 decaden 5-20 (10 april t/m 16 september) : 136. 5 mm.
in 1982, 7 decaden 128-134 (8 juli t/m 15 september): 32. 8 mm.



Figuur 1.



Figuur 2.

Verdampingsreductie 1976 - 1978

$(E_{pot} - E_W)$ vs $(E_{pot} - E_m)$

decaden $E_{pot} - E_W \geq 1.0$ mm

$\Sigma (E_{pot} - E_W) = 153.3$; $\overline{E_{pot} - E_W} = 6.7$; $s = 7.3$

	D	M	M2	O	S	SW
$\Sigma (E_{pot} - E_m)$	117.7	156.3	105.5	147.4	119.7	141.3
helling	0.84	0.61	0.58	0.78	0.83	0.59
stand. afw. helling	0.08	0.03	0.06	0.08	0.07	0.05
intercept	2.38	2.54	2.40	1.66	2.39	3.05
corr. coëff.	0.92	0.98	0.91	0.91	0.93	0.93
abs. fout %	14.0	15.7	14.3	13.0	13.8	19.8
variatie coëff. %	16.9	22.7	18.0	16.8	16.3	25.7

Tabel 5.

Verdampingsreductie 1979 - 1982

$(E_{pot} - E_W)$ vs $(E_{pot} - E_m)$

decaden $E_{pot} - E_W \geq 1.0$ mm

$\Sigma (E_{pot} - E_W) = 71.3$; $\overline{E_{pot} - E_W} = 3.8$; $s = 4.2$

	D	M	M2	O	S	SW
$\Sigma (E_{pot} - E_m)$	23.1	51.1	27.4	54.4	40.4	43.4
helling	0.85	0.62	0.68	0.74	0.81	0.53
stand. afw. helling	0.20	0.07	0.15	0.09	0.10	0.11
intercept	2.72	2.08	1.91	1.63	2.03	2.55
corr. coëff.	0.71	0.90	0.75	0.89	0.89	0.75
abs. fout %	13.1	11.4	9.7	9.1	10.6	14.6
variatie coëff. %	17.9	14.4	12.1	11.3	12.2	19.4

Tabel 6.

Het cumulatieve verloop van beide perioden tonen de figuren 1 en 2. Statistische informatie is uit deze perioden nauwelijks te verkrijgen door het geringe aantal decaden.

Er is daarom een vergelijking gemaakt van alle decaden waarin verdampingsreductie optrad gedurende calibratie-en verificatieperiode. Om verwarring door afrondingsfouten te vermijden zijn alleen de decaden geselecteerd waarvoor $E_{pot} - E_{act} > 1,0$ mm. De resultaten zijn samengevat in de tabellen 5 en 6. Tabel 5 heeft betrekking op 23 data paren uit de calibratieperiode, tabel 6 betreft 19 data paren uit de verificatieperiode.

Alle modellen berekenen in tabel 6 een kleinere verdampingsreductie, hetgeen betekent dat ΣE_m groter is dan ΣE_w.

De regressielijnen zijn voor de verificatie- en calibratieperiode getekend in de figuren 3 en 4.

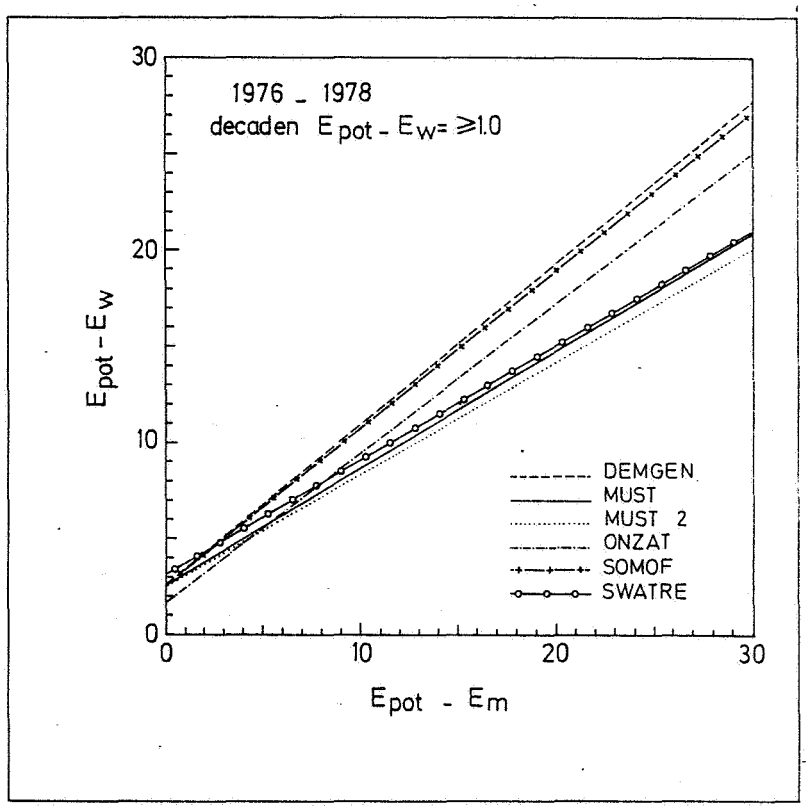
Wanneer per model de ligging van de dataparen wordt onderzocht, dan blijkt voor de verificatieperiode dat ca. 90% van de punten ligt in het gedeelte $E_{pot} - E_w < 10.0$ mm en $E_{pot} - E_m < 10.0$ mm. m.a.w. slechts twee dataparen bepalen in hoge mate de helling van de regressielijn.

Tabel 7 tenslotte geeft de statistische informatie ten aanzien van de werkelijke verdamping E_{act} voor de 19 decaden in de verificatieperiode waarvoor $E_{pot} - E_w > 1,0$ mm.

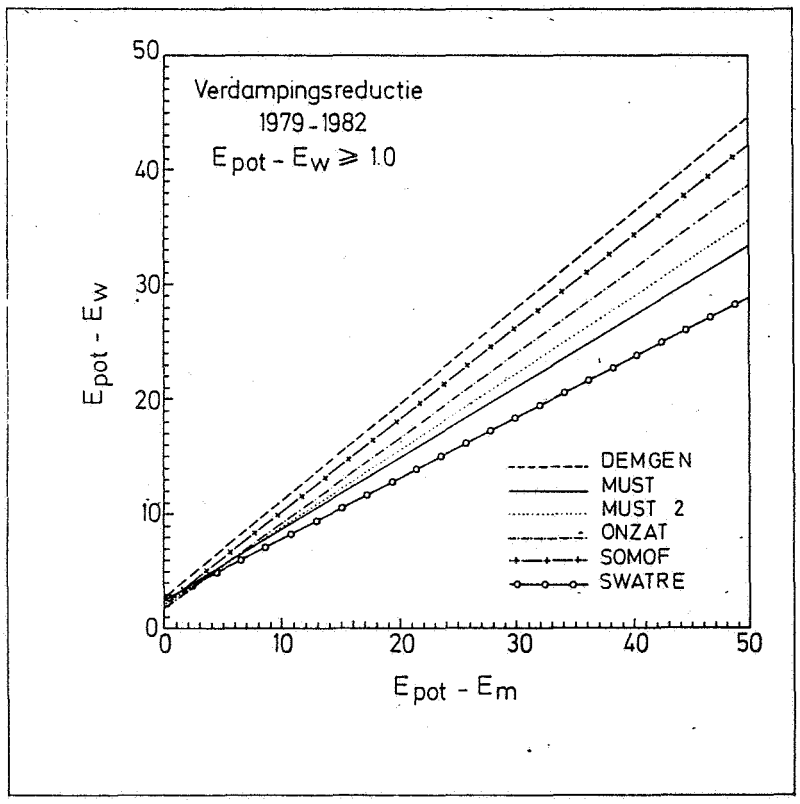
Actuele verdamping 1979-1982.
E_w vs E_m
decaden waarin $E_{pot} - E_w \geq 1.0$ mm
$\Sigma E_{pot} = 488.3$ $\Sigma E_w = 417.0$ $\bar{E}_w = 21.9$ $s = 5.4$

	Demgen	Must	Must 2	Onzat	Somof	Swatre
ΣE_m	465.2	437.3	444.4	433.9	447.9	445.2
helling	0.70	0.75	0.87	1.07	0.98	0.62
stand. afw. helling	0.07	0.09	0.09	0.12	0.10	0.09
intercept	4.73	4.65	1.55	*-2.39*	*-1.23*	7.34
corr. coëff.	0.92	0.89	0.92	0.91	0.92	0.86
abs. fout %	0.13	0.11	0.10	0.09	0.11	0.15
variatie coëff. %	0.18	0.14	0.12	0.11	0.12	0.19

Tabel 7.



Figuur 3.



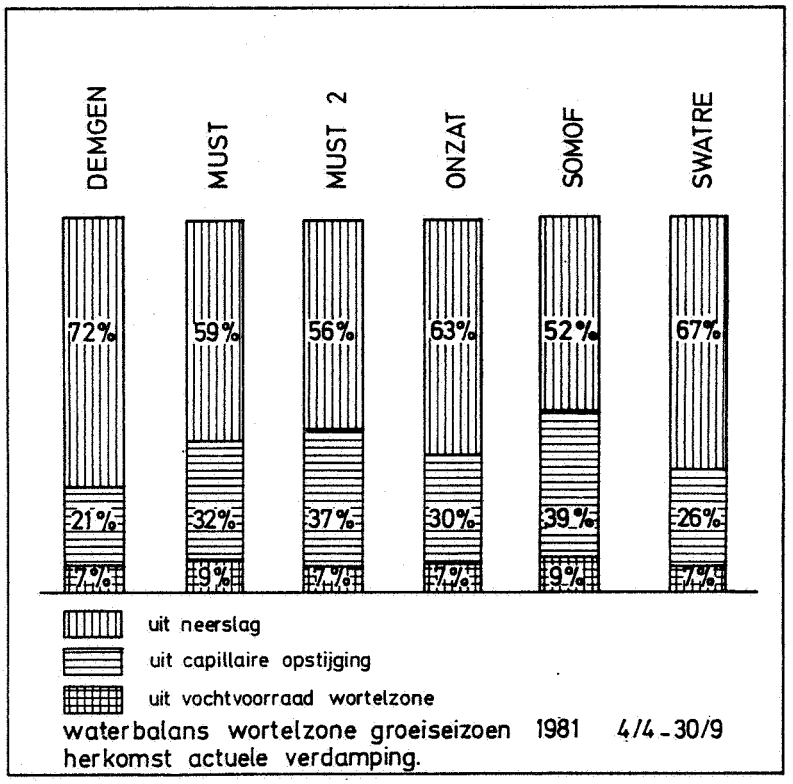
Figuur 4.

4. De waterbalans van de wortelzone.

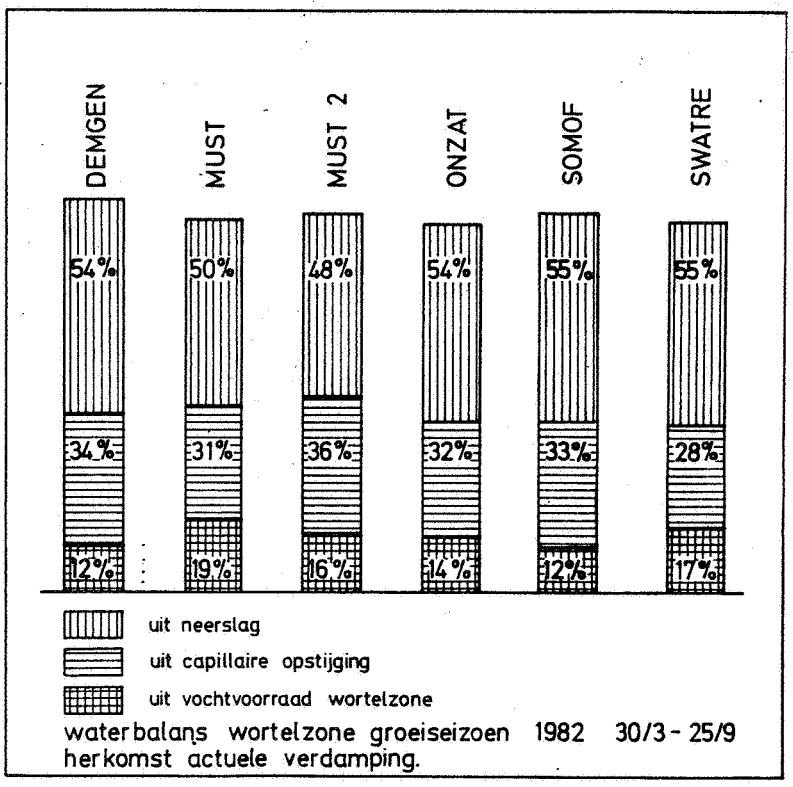
Door alle modellen werd de waterbeweging aan de onderzijde van de wortelzone - verdeeld over positieve en negatieve flux - opgegeven, evenals de vochtinhoud van de wortelzone aan het einde van elke decade. Gecombineerd met de gegevens over neerslag en verdamping levert dit de mogelijkheid om de waterbalans van de wortelzone te bepalen.
Vochtinhouden gemeten met de neutronensonde zouden hierbij als vergelijkingsmateriaal kunnen dienen. De meetdata hiervan vielen echter niet samen met de decade indelingen. Interpolatie tussen de meetdata bleek een hachelijke zaak, zodat is afgezien van een statistische vergelijking van de vochtinhoud van waarneming en modelsimulatie. Voor een aantal groeiseizoenen is vergeleken uit welke categorie water onttrokken werd voor de verdamping. Daarbij werd onderscheiden: neerslag, opwaartse capillaire flux en water onttrokken aan de wortelzone. Per decade werd een negatieve flux aan de onderzijde van de wortelzone beschouwd als doorzakkend regenwater. Figuren 5 en 6 geven de resultaten voor de groeiseizoenen van 1981 en 1982. In de kolommen is steeds van boven naar beneden de hiervoor genoemde volgorde van de drie categorie gehouden. De flux gegevens en de berekende verschillen in vochtinhoud hebben voor de meeste modellen betrekking op een wortelzone van 30 cm, behalve DEMGEN (25 cm) en SOMOF (37.5 cm).
Uit de waarnemingen met de neutronensonde volgt dat het verlies aan vochtinhoud van de bovenste 25 cm in 1981 9% bedroeg en in 1982 15%, berekend over de waargenomen E_{act}. tijdens het groeiseizoen.

Samenvatting.

Voor het onderzochte bodemprofiel, waarvan de bodemfysische karakteristieken geen sterke wisselingen vertonen, en onder Nederlandse klimaatomstandigheden wordt het totaal van de werkelijke verdamping E_{act}, door alle modellen per jaar en per groeiseizoen goed berekend. De overeenkomst in de tijd, van E_{act} en verdampingsreductie $E_{pot} - E_{act}$, tussen gemeten en modelberekende waarden per decade, laat soms te wensen over. Geen van de onderzochte modellen is hierbij significant beter of slechter. De afwijkingen, t.a.v. de verdampingsreductie zijn deels terug te voeren tot de verschillende meetmethoden voor E_{pot} en E_{act}. Het model MUST 2 berekent E_{pot} op een eigen manier.
De pseudo-stationaire modellen die met grote tijdstappen rekenen, zijn m.b.t. de uitkomsten zeker gelijkwaardig aan de niet-stationaire differentiemodellen die onder de gesimuleerde omstandigheden veel kleinere tijdstappen hanteren.



Figuur 5.



Figuur 6.

	DEMGEN	MUST	ONZAT	SOMOF	SWATRE
1. Is het model beschikbaar?	ja, onder bepaalde voorwaarden m.b.t. RWS-begeleiding	ja	ja	ja, onder bepaalde voorwaarden	ja
2. Handleiding	ja	ja	ja	ja, zie 4	ja
3. Kosten van 1.	geen	geen	geen	afhankelijk van gebruiker	geen
4. Kan het model zelfstandig worden gebruikt?	ja	ja	ja	ja, als onderdeel van pakket Predis	ja
5. Kennisniveau voor 3.	- ervaring computertoepassingen en modellen - agrohydrologie	- ervaring computertoepassingen - FORTRAN - agrohydrologie	- ervaring computertoepassingen - FORTRAN - agrohydrologie	- ervaring coumputertoepassingen en wiskundige modellen - agrohydrologie	- ervaring computertoepassingen - FORTRAN - agrohydrologie
6. Geschikt voor de berekening van:	- Eact - vochttekorten - vochtleverend vermogen - landbouwschade en benodigd suppletie water in het bijzonder op regionale schaal	- Eact - vochttekorten - vochtleverend vermogen - gewasopbrengsten - irrigatie-effecten	- Eact - vochttekorten - vochtleverend vermogen - irrigatie-effecten - stoftransport - snelwisselende randvoorwaarden	- Eact - vochttekorten - vochtleverend vermogen - snel wisselende randvoorwaarden	- Eact - vochttekorten - vochtleverend vermogen - gewasopbrengsten - irrigatie-effecten - snelwisselende randwaarden
7. Aanpassingen zijn nodig bij:	- sneeuw - zwel en krimp - variabele dikte van de wortelzone - schijnspiegels	- sneeuw - zwel en krimp - variabele dikte van de wortelzone - schijnspiegels	- sneeuw - zwel en krimp - hysteresis pF curve - schijnspiegels	- sneeuw - zwel en krimp - hysteresis pF curve - schijnspiegels	- sneeuw - zwel en krimp - hysteresis pF curve - schijnspiegels
8. Calibratie vereist?	programma biedt standaard schematisatie, nadere calibratie mogelijk indien gewenst	programma biedt aantal standaard opties, nadere calibratie mogelijk indien gewenst	ja	in de meeste gevallen: ja	programma biedt aantal standaard opties, nadere calibratie mogelijk indien gewenst
9. Computersysteem gebruikt bij deze simulatie	U 1100/84 Sperry/Univac	AMDAHL 470-7-B	VAX 750 Unix	Cyber 175/855	VAX 11/750
10. Rekentijd voor puntsimulatie gedurende 1 jaar:	afhankelijk van het gebruikte computersysteem ca. 10 tot 150 cpu, kosten: f 10,- à f 20,-.				
11. Voorbereidingstijd:	afhankelijk van de aanwezige data-bestanden, kan variëren van enkele dagen tot enkele weken.				

Tabel 8. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping.

DISCUSSIE

samengevat door J.C. Hooghart

Inleiding

De CHO-studiebijeenkomsten zijn gericht op discussie, waartoe een beperkt aantal deskundigen wordt uitgenodigd.
Op 24 oktober 1984 werd de 4e CHO-studiebijeenkomst gehouden in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek met als titel "Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping".
Aan de hand van reeds van tevoren toegezonden discussiepunten opgesteld door de voorbereidingsgroep, werd gediscussieerd. Deze discussiepunten hadden als doel de discussie op gang te brengen. Ze zijn wel gebaseerd op de resultaten van de modelvergelijking, maar mogen niet beschouwd worden als definitieve conclusies. De discussie beperkte zich ook veelal niet alleen tot deze punten.
In het navolgende wordt, telkens na het discussiepunt, een korte samenvatting van de discussie gegeven.

1. Numerieke modellen voor het beschrijven van het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping zijn inmiddels in ruime kring geaccepteerd als een bruikbaar instrument bij waterhuishoudkundige studies.

DISCUSSIE

Naast het gebruik van deze modellen voor waterhuishoudkundige studies, worden ze ook gebruikt om de processen beter te leren begrijpen en om te extrapoleren naar andere omstandigheden/gebieden.

In deze modellen staan vochttekorten in de landbouw centraal, die in de PAWN-studie ook een belangrijke rol hebben gespeeld.
Vaak werd gerekend met een gemiddelde wateraanvoerbehoefte voor de landbouw van 100 mm per jaar. Uit het werk van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland bleek echter dat de wateraanvoerbehoefte voor de planten 20-30 mm/jaar is.
De 100 mm was erop gebaseerd dat er geen capillaire opstijging was. Het blijkt dat de behoefte voor de landbouw ruwweg toch 100 mm is. Dat volgt ook uit het feit dat bij de toediening 2 à 3 maal zoveel water nodig is, dan de uiteindelijke behoefte van het gewas. Door beregening wordt de capillaire aanvoer onderdrukt. Uit de modelberekening is dit duidelijker geworden en ook wat de waterbehoefte van de Hupselse Beekgebied is.

Hoe is bij de zes modellen het verschil in vochttekort per groeiseizoen? In het groeiseizoen van 1982 is de totale neerslag 238 mm, de potentiële verdamping is 441 mm en de werkelijke verdamping is ± 400 mm. De modellen berekenden een verdampingsoverschot (verdamping-neerslag) van ongeveer 160 mm in 1982.

Uit de evaluatie van Koopmans blijkt dat de resultaten van de modellen niet ver uit elkaar liggen. Men zou derhalve kunnen kiezen voor het meest eenvoudige model. Dit hangt echter af van de toepassing. Voor bijvoorbeeld een regionale toepassing kan men wellicht rekenen met een eenvoudig model op decadebasis. Als men echter wil weten wat er in het profiel gebeurt b.v. hoe de neerslag doordringt naar het grondwater, dan kan men niet vooruit met de pseudo-stationaire modellen.

De modellen zijn in dit geval toegepast voor een relatief ondiepe grondwaterstand, bovendien treden er geen grote vochttekorten op. Bij diepe grondwaterstanden moet men echter met pseudo- stationaire modellen erg voorzichtig zijn.
De pseudo-stationaire modellen kunnen niet in alle gebieden in Nederland zonder meer worden gebruikt, beperkingen zijn: diepe grondwaterstand en beregening.
Bij de simulatie van beregening treden uitgedroogde bovengronden op en steile neerslagfronten; pseudo-stationaire modellen hebben moeite dit te beschrijven.
In zijn algemeenheid kan men niet stellen dat de zes modellen voor alle toepassingsgebieden in Nederland even goed zijn.

Bij deze vergelijking heeft het rekenen op dagbasis t.o.v. het rekenen op decadebasis één keer duidelijk voordeel geboden in een voorjaarssituatie in 1980.
Dit bodemprofiel is echter ook zodanig opgebouwd dat het instationaire gedrag er niet uitkomt. Zodoende hebben de instationaire modellen weinig van hun voordelen kunnen laten zien. Dit pleit voor een modelvergelijking voor andere profielen, bijvoorbeeld met diepe grondwaterstand of voor een gebiedssimulatie voor het proefgebied Hupsel, al dan niet in combinatie met het proefgebied Sleen (zie ook punt 7).

Voor semi-aride gebieden zijn wellicht andere modellen nodig. Daar speelt b.v. bodemverdamping, runoff, afwezigheid van grondwaterspiegel etc. Voor het model SWATRE zijn er diverse opties voor randvoorwaarden aan de onderzijde, zoals opgegeven grondwaterstand, drainage flux etc. Het model voldoet ook onder andere omstandigheden goed. SWATRE wordt ook toegepast voor "water harvesting" in een sterk hellend gebied in Israël. Het hangt af van de randvoorwaarden van het model of het ook in andere gebieden toegepast kan worden
Met de andere modellen bestaat geen ervaring in het buitenland.
De vraag is of voor waterhuishoudkundige studies, of modellen die rekenen op dagbasis, zin hebben of zit er zoveel buffering in elke grond dat met langere perioden gerekend kan worden?

Met het model MUST is gekeken wat het verschil is om te rekenen met tijdstappen van 1 dag en van 10 dagen. Bij de 10-daagse tijdstappen, is de neerslag uitgemiddeld over die 10 dagen. Dit heeft toch een groot effect in het zomerhalfjaar, namelijk met 10-daagse tijdstappen treedt er totaal zo'n 20 mm meer verdamping op. Er bestaat wellicht een directe relatie tussen de dikte van de wortelzone in DEMGEN en de tijdstap van 10 dagen.

2. De in het kader van deze studiedag uitgevoerde puntsimulaties leveren voor alle modellen vergelijkbare en betrouwbare resultaten op.

3. De niet-stationaire differentiemodellen kunnen een gedetailleerde bodemvochtverdeling en -beweging beschrijven en in de tijd sterk wisselende meteorologische omstandigheden simuleren. Bij deze modellen zijn minder conceptuele aannamen nodig dan bij pseudo-stationaire modellen (in feite moet gesproken worden van pseudo-niet-stationaire modellen).

4. Voor de bepaling van de verdampingsreductie in droge zomerperioden kan worden volstaan met invoergegevens op lange tijdsbasis van een dag tot een decade.

DISCUSSIE

Vorengenoemde 3 stellingen kwamen tijdens de discussie tegelijkertijd aan de orde.

Stelling 2 geldt uitdrukkelijk voor de onderhavige toepassing/bodemprofiel. Voor andere toepassingen staat dit nog ter discussie. De modellen geven voor dit gesimuleerde profiel geen grote verschillen.

Tussen de modellen is er weinig verschil in verdampingstotalen over het groeiseizoen; in de verdampingsreducties per tijdstap zitten echter grotere verschillen. Dat heeft toch grote gevolgen i.v.m. schadeberekeningen.

Voor o.a. 1982 is de energiebalans profielmethode gemeten en berekend vergeleken. Als voor dezelfde periode de Bowen ratio relatie genomen wordt, geeft dit andere resultaten. Een betrouwbaarheidsanalyse is nodig om uit te spreken of de modellen echt verschillen.

Zijn voor deze studie de juiste parameters gemeten? Aanwezig zijn gemeten/berekende verdampingsreducties en gemeten grondwaterstanden. Als er een goede drainage functie voor het Hupselse Beekgebied was, dan hadden de modellen de grondwaterstand kunnen simuleren. Gevoelig blijkt te zijn het tijdstip waarop in de herfst de grondwaterstand begint op te lopen, wordt dat goed gesimuleerd?

De modellen,die toch zeer verschillend lijken, leveren alle betrouwbare resultaten in dit geval. Waarin verschillen deze modellen dan? Zijn dat rekentijden, rekenkosten, invoergegevens e.d.? Welk model is precies geschikt voor welk doel?

Door de voorbereidingsgroep is getracht hier meer over aan te geven. Het probleem is dat elk model op een andere computer heeft gedraaid en kosten zijn dan moeilijk te achterhalen en ook moeilijk te vergelijken.

Het rekenen op decade-basis heeft het voordeel dat geen dagcijfers ingevoerd hoeven te worden; het bestand is dan kleiner.

Afhankelijk van de toepassing moet nagegaan worden of op decade-basis gerekend mag worden. Er zitten wellicht zoveel terugkoppelingen in het model dat de verschillen tussen gemeten en berekende waarden gering zijn.

DEMGEN heeft een relatief eenvoudige structuur, hetgeen weinig blijkt uit te maken. Fouten die gemaakt worden in de ene tijdsperiode, worden direct in de volgende periode gecorrigeerd. Dit kan ook een gevaar inhouden; men heeft namelijk niet precies inzicht in de processen op detailniveau in een profiel. Dat was ook niet het doel van dit model. DEMGEN was bedoeld om de waterbehoefte en de economische gevolgen van het wel of niet toekennen van water aan een bepaalde sector te berekenen. Het heeft resultaten opgeleverd, die bijgedragen hebben tot het formuleren van het landelijk waterhuishoudkundig beleid. Andere modellen hebben tot doel de waterbeweging in het bodemprofiel te beschrijven.

De zwakste schakel in het rekenproces in de niet-stationaire modellen is niet de differentiaalvergelijking of de numerieke oplossingstechniek, maar de kennis over de plantonttrekking in relatie met de verdamping. De wateronttrekking hangt af van de worteldruk ter plaatse van het grensvlak grond-wortel, maar deze is erg moeilijk te meten en te definiëren. Verder is het de vraag hoe de verdeling van de wortels goed gekarakteriseerd kan worden: Is dit het gewicht, de lengte, het aantal wortels? Na een droge periode, gaat het regenen, dat heeft een explosieve groei van wortels tot gevolg. Dit is allemaal erg moeilijk te beschrijven.

SWATRE maakt gebruik van de benadering van een maximale sink-term, waarbij impliciet wordt aangenomen dat de wortelverdeling in de diepte gelijk is, zodat potentieel (overal) evenveel kan worden onttrokken. Dit concept werkt omdat er zoveel terugkoppelingen in zitten.

STIBOKA hanteert als worteldiepte de zone waar 80% van de wortels zitten, echter een paar wortels die dieper gaan kunnen zeer effectief zijn. Er zou onderzoek gedaan moeten worden waarbij de wortelopname wordt teruggerekend uit lysimeter- en waterbalansstudies en dan is de effectieve worteldiepte uit te rekenen.

Als overgegaan wordt naar de chemie in het bodemprofiel dan is de wortelverdeling ook zeker belangrijk, b.v. bij natuurlijke vegetatie.

In deze studie met een bekende grondwaterstand moet de $k-h_p$ relatie goed geweest zijn, daar de berekende verdamping overeenstemt met de gemeten verdamping. De opgegeven grondwaterstand is een strakke randvoorwaarde. De verdeling van de verdamping in de tijd moet goed zijn, dit is afhankelijk van het verdampingsconcept, en de calibratie en verificatie van de verdampingsfunctie.

Als gevolg van de opgegeven grondwaterstand springt de drainage-flux op en neer, wat niet overeenstemt met de werkelijkheid. Wellicht is er bij dit bodemprofiel een zijdelingse interactie met het omliggende gebied.

De bodemsamenstelling ter plaatse waar gemeten is, is zodanig dat de planten daar niet snel verdrogen.

Zoals reeds bij 1. is vermeld kan het rekenen op dag- of decadebasis een verschil geven van 20 mm per groeiseizoen, op een totale verdamping van ongeveer 400 mm. Dit komt geleidelijk tot stand. Voor de wateraanvoerbehoefte is dit nog niet zo veel, maar wel bij schadeberekeningen bij onttrekkingen door waterleidingbedrijven. De piekvraag wordt ook uitgesmeerd per week of tien dagen, bij wateraanvoer.

5. De voor deze studiedag gebruikte verdampingscijfers (Epot volgens Thom & Oliver en Eact volgens profielmethode) zijn voldoende nauwkeurig om als vergelijkingsmateriaal voor modelstudies te dienen.

DISCUSSIE

In de meeste gevallen voldoet de formule van Thom & Oliver, echter tijdens zeer droge zomers, zoals 1976, komen de verdampingscijfers te hoog uit. Beter is dan de methode volgens Priestley & Taylor te gebruiken, waarin het dampdrukdeficiet niet zit, zodat de potentiële verdamping niet te groot wordt. De verschillen zijn veel groter dan die uit de modelvergelijking naar voren komen.

Er is evenwel een grote prestatie geleverd; men heeft nu voor het Hupselse Beekgebied de beschikking over een reeks actuele verdampingscijfers over een groot aantal jaren.
De profielmethode lijkt redelijk betrouwbaar; de vraag is echter of deze voor dit geval voldoende betrouwbaar is. Er wordt gekeken naar het verschil tussen de potentiële en actuele verdamping, in beide kunnen fouten zitten. Bij het meten van verdamping in het veld zijn er al snel fouten van 5%, bij veel verdamping lopen de fouten op tot tientallen mm's.

Nieuwe stelling:
"Potentiële verdamping bestaat alleen als de situatie ook werkelijk potentiëel is".

Als onder droge omstandigheden de potentiële verdamping wordt gedefinieerd t.o.v. de hypothetische natte situatie, is dit zeer dubieus.
Het concept van potentiële verdamping van een gewas is het maken van een scheiding tussen weersinvloeden en eigenschappen van het oppervlak. Verondersteld wordt dat de potentiële verdamping voor een gegeven oppervlak begroeid met een gewas onafhankelijk is van de eigenschappen van het oppervlak en alleen door het weer wordt bepaald. Op het moment dat een droog gebied nat wordt gemaakt, wordt de meteorologische situatie vlak boven het oppervlak beïnvloed en is er een interactie tussen eigenschappen van het oppervlak en de potentiële verdamping.

Onder zeer extreme omstandigheden, in de woestijn, geeft de formule van Thom & Oliver zeer hoge waarden, daar is het concept potentiële verdamping niet goed.

Voor het waterbeheer is de definitie van potentiële verdamping: "de verdamping die zou optreden als het gewas van voldoende water is voorzien". Er zouden in Nederland een aantal plots moeten zijn met gewas dat voldoende van water wordt voorzien en waar met behulp van meetmasten de verdamping wordt gemeten.
Dit zouden dan echter grote gebieden moeten zijn, daar anders de invloed van het omringende gebied te groot is.

Bij de modellen keert de fout in de potentiële verdamping terug in de reductiefunctie.
Deze modellen mogen niet zomaar op buitenlandse omstandigheden worden toegepast, vaak zijn ook géén Thom & Oliver-gegevens beschikbaar.
Voorgesteld wordt om ook 1983 te gaan doorrekenen, daar dit jaar behoorlijk droog was. De cijfers op dagbasis zijn er.
Het is zinvol om meerdere bodemprofielen met diverse grondwaterstandsdiepten door te rekenen.
Verdampingscijfers zijn er echter nog niet of nauwelijks voor andere punten in het Hupselse Beek gebied. De bodemvochtcijfers en bodemfysische karakteristieken zijn er wel.

6. Een beter onderbouwde functie voor de vochtonttrekking biedt voor de toepassing van modellen geen voordelen, wanneer de bodemfysische parameters ($k-h_p$) en ($\theta-h_p$) niet met grotere nauwkeurigheid kunnen worden vastgesteld, hetgeen in praktijksituaties zelden het geval zal zijn.

DISCUSSIE

De bodemvochtinhoud is te variëren naar gelang er wel of niet met hysteresis rekening wordt gehouden. De nauwkeurigheid waarmee bv. de (k-h)-relatie wordt bepaald is belangrijk. De meetnauwkeurigheid van bodemfysische karakteristieken is zodanig dat afwijkingen in het plantonttrekkingssysteem daar voor een groot deel in verloren gaan.
De vraag is of een beter model zin heeft als er niet betere bodemfysische parameters zijn. Is het niet mogelijk om met twee extreme curves te rekenen? Er zit een bepaalde range in de curves, het is niet zo dat ze niet goed bepaald worden.

Door de flux door de onderrand treedt er compensatie op. Van de diepe ondergrond waren er geen gegevens beschikbaar. De grondwaterstand gaat soms wel diep. Bij onderzoek in 't Klooster* bleek dat er op grotere diepte: een dichtere pakking is, een kleinere porositeit en een ander (k-θ)-relatie.
Met de k(-θ)-relatie gemeten in 't Klooster bleek dit voor het Hupselse Beekgebied een groot effect te hebben op de verdamping, er werd minder naar de ondergrond afgevoerd. Voor het Hupselse Beekgebied is de bergingscoëfficiënt 19-24%, dit is erg hoog. Voor 't Klooster is dit ongeveer 5-10%, daardoor gaat de flux naar beneden. De bodemfysische parameters voor de diepere ondergrond zijn voor Hupsel niet bevredigend beschreven. De doorlatendheid die de capillaire opstijging bepaalt, wordt door ieder model op een verschillende manier bepaald.

Er wordt gesteld dat ook aan de plantonttrekkingsfunctie meer aandacht geschonken dient te worden. Het is tijdens de discussie niet duidelijk geworden of dit punt belangrijker of minder belangrijk is dan de bodemfysische eigenschappen.

* Studiegebied rondom waterwinplaats 't Klooster nabij Hengelo (Gelderland).

7. De beperking van deze vergelijkende studie is dat de simulaties betrekking hebben op slechts één punt. Deze beperking is slechts te ondervangen door de toepassing van een gebiedssimulatie, waarin op puntniveau meerdere situaties kunnen worden beschouwd.

DISCUSSIE

Een aantal aanwezigen stelden dat het voor de modellen voor de onverzadigde zone géén hoge prioriteit mag hebben om ze te vergelijken voor meerdere punten. Dat lijkt namelijk veel op deze studie. Wel is het interessant om deze modellen te koppelen aan modellen voor de verzadigde zone. Dit zou gelden voor regionale grondwaterstromingsmodellen gekoppeld aan het oppervlaktewater, dat zijn de modellen: GELGAM en PREDIS.

Op gebiedsniveau simuleren is al erg moeilijk en zeker een onderlinge vergelijking van diverse modellen op gebiedsniveau. Aan knooppunten worden zekere oppervlakten toegekend, er worden gemiddelden aan gegeven en die per definitie niet te vergelijken zijn met bodemvochtmetingen of met een grondwaterstandsbuis. Voor het Hupselse Beekgebied zijn gebiedsafvoeren bekend. De vraag is nog of het een grote lysimeter is en in hoeverre zijn de gemeten gebiedsafvoeren representatief voor de gekozen knooppunten.

Met 18 meetpunten voor het proefgebied Hupsel en Sleen is de bodemvochtinhoud per bodemprofiel goed te bepalen. Verder is in beide gebieden de afvoer bekend.

Is het mogelijk om een vergelijkende studie te herhalen voor Cabauw met een ander bodemprofiel dan Hupsel, namelijk klei op veen?
Grondwater- en bodemvochtmetingen zijn er minder voor Cabauw. Ook afvoergegevens zijn niet bekend; wel zijn deze eventueel af te leiden uit de administratie (maalstaten) van de gemalen. Op grond van deze overwegingen lijkt het derhalve niet haalbaar een vergelijkende studie te herhalen m.b.v. Cabauw-gegevens.
In het Hupselse Beekgebied kan in de verzadigde zone de kD-waarde sterk wisselen in de tijd. Bij vergelijking van de actuele verdamping berekend uit de verdampingswaarden met die berekend uit de waterbalans (waarin dus ook de afvoergegevens van Hupsel zijn verwerkt), blijkt dat over de periode 1976 t/m 1982 er een verschil optreedt van ongeveer 120 mm (gemiddeld dus 17 mm/jaar).

8. Een klein goed bemeten stroomgebied als het Hupselse Beekgebied is onontbeerlijk voor hydrologische modelstudies en modelvergelijkingen.

DISCUSSIE

Hetgeen op de studiedag is gepresenteerd onderschrijft deze stelling op duidelijke wijze.

Zonder de beschikbare gegevens van het Hupselse Beekgebied zou een modelvergelijking als de onderhavige niet mogelijk zijn geweest. Een hydrologisch proefgebied zoals het Hupselse Beekgebied speelt ook in vele andere opzichten een belangrijke rol.

Bovenstaand punt wordt dan ook onderschreven.

BIJLAGEN

A Programma studiebijeenkomst

B Deelnemerslijst studiebijeenkomst

C Lijst van gebruikte afkortingen

A PROGRAMMA STUDIEBIJEENKOMST

4e CHO-studiebijeenkomst i.s.m. Studiegroep Hupselse Beek
"Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping".

woensdag 24 oktober 1984, in het Cultureel- en Congrescentrum "De Reehorst", Bennekomseweg 24 te Ede. Zaal: Kernhem/Bospoort.

09.00 - 09.30	Aanmelden (koffie)	
09.30 - 09.35	Opening door voorzitter CHO-TNO	
09.35 - 09.50	Inleiding over het hydrologisch proefgebied Hupselse Beek door Ir. P.M.M. Warmerdam (LH), dagleider	
09.50 - 10.20.	Inleiding over modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping door Dr. Ir. R.W.R. Koopmans (LH)	
10.20 - 10.45	Koffie	
10.45 - 12.25	Presentatie van de berekeningsresultaten van de 5 deelnemende modellen	
	DEMGEN	Ir. W.E. van Vuuren (RWS)
	MUST 1	Dr. Ir. P.J.M. de Laat (IHE)
	ONZAT	Ir. G. van Drecht (RIVM)
	SOMOF	Dr. B.H. Gilding (WL)
	SWATRE	Dr. R.A. Feddes (ICW)
12.25 - 13.25	Lunch	
13.25 - 13.40	De reductie in verdamping in Must 2, door Dr. Ir. Th.J. v.d. Nes (Prov. Gelderland)	
13.40 - 14.15	Evaluatie berekeningsresultaten door Dr. Ir. R.W.R. Koopmans (LH)	
14.15 - 14.30	Thee	
14.30 - 15.45	Discussie, discussieleider Prof. Dr. Ir. W.H. van der Molen (LH)	
15.45 - 15.55	Samenvatting en conclusies door Prof. Dr. Ir. W.H. van der Molen (LH)	
15.55 - 16.00	Sluiting door voorzitter CHO-TNO	

B DEELNEMERSLIJST STUDIEBIJEENKOMST

Deelnemers aan de CHO-studiebijeenkomst i.s.m. Studiegroep Hupselse Beek

1.	RWS-W&W	Drs. A. van der Giessen
2.	"	Ir. W. Silva
3.	RSW-WWZO	Ir. J.P. de Lange
4.	"	Ir. W.E. van Vuuren
5.	"	Ing. B. Wesseling
6.	"	Hr. B. Schutte
7	RWS-WWN	Drs. F.A.M. Claessen
8	RWS-WWZW	Ir. J.P.G. Bakker
9	RWS-DIV	Ir. R. Awater
10.	P.W. Groningen	Ir. G. Miedema
11.	P.W. Friesland	Ir. H. Siebering
12.	P.W. Drenthe	Ir. J. Kreling
13.	P.W. Overijssel	Ir. H. Tienstra
14.	P.W. Gelderland	Ir. G. Kant
15.	"	Dr.Ir. Th.J. v.d. Nes
16.	"	Drs. E. Romijn
17.	P.W. Utrecht	Ing. G.A. den Hartogh
18.	RIJP	Ing. G.A. Ven
19.	KIWA	Ir. M.G.M. den Blanken
20.		Ir. G. v.d. Velde
21.	RIVM	Ir. G. van Drecht
22.	"	Ir. K. Kovar
23.	Waterschappen	Ing. F.C. Hamster
24.	Landinr. Dienst	Ing. G.J. Grotentraast
25.	Cogrowa	Ing. Th. Reuling
26.	ICW	Ir. P.J.T. van Bakel
27.	"	Dr. R.A. Feddes
28.	"	Ir. M. de Graaf
29.	Stiboka	Dr.Ir. J. Bouma
30	"	Ir. J.M.M. Wösten
31.	"	Ir. H.A.J. van Lanen
32.	IB	Dr.Ir. P.A.C. Raats
33.	THD	Ir. R.H. Boekelman
34.	VUA	Dr. L.A. Bruijnzeel
35.	LH	Dr.Ir. R. Koopmans
36.	"	Ir. J. Stricker
37.	"	Ir. P. Warmerdam
38.	"	Prof.Dr.Ir. W.H. v.d. Molen
39.	"	B. Overmars
40.	LH Vakg. Bodemk&Pl.V.	Dr.ir. L. Stroosnijder
41.	Un. v. Amsterdam	Ir. W. Bouten
42.	IHE	Dr. P. de Laat
43.	Inst. für Bodenkunde	Ir. R.R. v.d. Ploeg
44.	IWACO	Ir. A.P. Bot
45.	Grontmij.	Ir. M.J.H. Smale
46.	Haskoning	Ir. H.J. Opdam
47.	Heidemij	Ir. H. Mooy
48.	WL	Dr. B.H. Gilding
49.	"	Ir. E. Van Beek
50.	"	Ir. J.W. Wesseling

51.	DGV	Ir. H.L.M. Rolf
52.	KNMI	Dr. H.A.R. de Bruin
53.	Bundesanstalt G.R.	Ir. W. Duynisveld
54.	Rijksun. Gent	Ir. M. Hesters
55.	CHO	Prof.Ir. D.A. Kraijenhoff van de Leur
56.	"	Ir. H.J. Colenbrander
57.	"	J.C. Hooghart
58.	Stiboka	Ing. M. Bannink
59.	RWS, W&W, Z.O.	Ing. B. Schutte
60.	TH Delft	Ir. C. Volp
61.	RWS, W&W, Noord	Ir. R.P.H.A.L. Westval
62.	RIVM	Dr.Ir. C. v.d. Akker
63.	IHE	Ir. W. Spaans

C LIJST VAN GEBRUIKTE AFKORTINGEN

ARIADNE	= Analytical Resources for Integrated Allocation and Distribution problems in NEtworks (distributiemodel WL)
CHO-TNO	= Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO
COGROWA	= COmmissie GROndwaternet WAterleidingbedrijven (Utrecht)
CWG	= Commissie bestudering Waterhuishouding Gelderland
DEMGEN	= DEMand GENerator (computerprogramma)
DISTAG	= DISTrict AGricultural model (computerprogramma)
DIV	= Dienst InformatieVerwerking (RWS)
DM	= Distribution Model (PAWN, RWS)
E_{act}	= Actuele evapotranspiratie (werkelijke verdamping)
E_{pot}	= Potentiële evapotranspiratie
GELGAM	= GELders Grondwater Analyse Model (computerprogramma)
GROMULA	= GROundwater flow in a MULti-Layered systen of aquifers (grondwatermodel, WL)
IB	= Instituut voor Bodemvruchtbaarheid (Haren, Gr.)
ICW	= Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (Wageningen)
IHE	= International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (Delft)
IHD	= International Hydrological Decade
IHP	= International Hydrological Programma
KIWA	= KeuringsInstituut voor WAterleidingartikelen (Rijswijk)
KNMI	= Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (De Bilt)
LH	= LandbouwHogeschool (Wageningen)
MUST	= Model for Unsaturated flow above a Shallow WaterTable
ONZAT	= Naam (geen afkorting) van computermodel voor onverzadigde stroming
PAWN	= Policy Analysis of the Water management for the Netherlands

PREDIS	= PREcipitation-DIScharge (computerprogramma)
PW	= Provinciale Waterstaat
RID	= RijksInstituut voor Drinkwatervoorziening (thans RIVM).
RIVM	= RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (Leidschendam)
RWS	= RijksWaterStaat
RIJP	= Rijksdienst voor de IJsselmeerPolders
SHB	= Studiegroep Hupselse Beek
SOMOF	= SOil MOisture Flow (computerprogramma)
STIBOKA	= STIchting voor BOdemKArtering (Wageningen)
SWATRE	= Soil Water Actual TRanspiration Extended (computerprogramma)
TFDL	= Stichting Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw (Wageningen)
THD	= Technische Hogeschool Delft
TNO	= Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
UNESCO	= United Nations Education and SCiences Organisation
UNSAT	= Model for UNSATurated flow (computerprogramma)
VUA	= Vrije Universiteit Amsterdam
WL	= Waterloopkundig Laboratorium
WWZO	= Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District ZuidOost

TNO
11-2-1985
MS

RAPPORTEN EN NOTA'S VAN DE COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

1. Tweede rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van hydrologische gegevens TNO.
Januari 1977.

2. Verslag en aanbevelingen
van de ad hoc-groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur TNO.
Juli 1978.

3. De droogte in 1976.
Een samenvatting en overzicht van de over de droogte van 1976 verschenen literatuur - (P.K.M. v.d. Heijde).
Augustus 1978.

4. Nederlandse activiteiten in internationaal hydrologisch verband.
Lezingserie, gehouden op 25 april 1978 te Delft, aangevuld met (schematische) overzichten van internationale organisaties en een overzicht van hun vertegenwoordigers in Nederland.
Augustus 1978.

5. Waterkwaliteit in grondwaterstromingsstelsels.
Een verslag van de Workshop op 1 en 2 april 1980 te Wageningen - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen en een inventarisatie van het onderzoek in Nederland.
Augustus 1980.

6. Derde Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van hydrologische gegevens TNO.
Februari 1981.

7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten aanzien van het operationele regenwaarnemingennet van het KNMI - J.C. Hooghart.
Oktober 1981.

8a. Verklarende Hydrologische Woordenlijst.
I. Water in de onverzadigde zone
II. Water in de verzadigde zone
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Januari 1982.

8b. Verklarende Hydrologische Woordenlijst
III. Atmosferisch water
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Juni 1983.

8c. Verklarende Hydrologische Woordenlijst
IV. Oppervlaktewater
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Maart 1985.

9. Waterkwaliteit en waterkwantiteit in het IJsselmeergebied.
Een verslag van de 2e CHO-studiebijeenkomst op 2 en 3 november 1981, De Eemhof, Zuidelijk Flevoland - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.
Februari 1982.

10. Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Grondwatermodellen, CHO-TNO.
April 1982.

11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen.
L.J.M. Boumans
Oktober 1982.

12. Grondwaterkwaliteit in relatie met onderzoek en beleid.
Een verslag van de 3e CHO-studiebijeenkomst op 15 maart 1983 te Wageningen - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.
Juni 1983.

12a. Voorlopig overzicht van inventarisaties waarin grondwater(kwaliteits)-modellen voorkomen of hiermee in verband staan.
J.C. Hooghart.
Januari 1984.

13. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping.
Een verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst op 24 oktober 1984 in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek - (J.C. Hooghart).
Maart 1985.