

## VII. DE VERDAMPING UIT VEGETATIES IN VERBAND MET DE FORMULE VAN PENMAN

G. F. MAKKINK

*Instituut voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbouwgewassen*

### SUMMARY

#### EVAPORATION FROM VEGETATIONS IN RELATION WITH THE FORMULA OF PENMAN

*Evaporation from vegetations is discussed, especially from agricultural and hydrological view-points. Causes are mentioned which can make evaporation higher or lower than evaporation from a free water surface ( $E_o$ ).*

*The potential evapotranspiration from a short grass vegetation without water shortage ( $E_p$ ) is compared with  $E_o$  (fig. 1 and 2). Research by the author (1957) with lysimeters is resumed; the empirical formulae found for  $E_p$  is (2) (fig. 4) and for  $E_o$  is (5) (fig. 9). From these it may be concluded that a constant factor 0,65 for  $E_p/E_o$  can be applied (fig. 11).*

*A comparison of  $E_o$  according to PENMAN or to (5), with the evaporation from a floating pan in the IJssel-lake, is not conclusive as for the correctness of the calculation of  $E_o$  (fig. 10).*

*The relationships between the actual evapotranspiration from a grass cover ( $E_r$ ) at one hand, and the moisture tension at  $-5$  cm and the soil type other hand, are summarized (fig. 13—16) (MAKKINK and VAN HEEMST 1956).*

*New observations from the Netherlands are mentioned, proving that for any vegetation  $x$  (grass, arable crops or forests) the actual evapotranspiration  $E_{rx}$  can be higher than  $E_p$ , even equal to  $E_o$  (fig. 17—19). This can be due to advective heat. A more detailed study on vegetation factors is wanted for the relationships between  $E_{rx}$  and  $E_p$  or  $E_o$ .*

*The author recommends  $E_p$  as a standard and not  $E_o$ , because  $E_r$  and  $E_{rx}$  physically and biologically relate to it, thus facilitating to estimate vegetation factors.*

## 1. INLEIDING

De formule van PENMAN voor de verdamping van vrij water gaat uit van de premissen dat het watervlak zeer uitgestrekt is en zeer ondiep. De formule geldt dus eigenlijk niet voor verdampingsbakken en voor meren en zeeën. Hij krijgt hierdoor het karakter van een benaderingsformule. Ook bevat de formule nog een aantal schematiseringen, die maken dat de berekende verdamping van de werkelijke verdamping zal afwijken.

Nu is een watervlak in zekere zin een eenvoudig object. Veel groter zijn de moeilijkheden, die een vegetatie aan de berekening van de verdamping stelt. Het aantal verschillende vegetaties is zeer groot. Hun dichtheid loopt uiteen van een vrijwel kale grond tot een volkomen gesloten plantendek.

## 2. VEGETATIES VERGELEKEN MET VRIJ WATER

Wanneer we ons beperken tot volkomen gesloten vegetaties, kunnen we op theoretische gronden vaststellen, dat de werkelijke verdamping uit een willekeurig gewas ( $E_{rx}$ ) ten opzichte van de verdamping uit een watervlak ( $E_o$ ) zowel kleiner als groter kan zijn.

*$E_{rx}$  kan kleiner zijn dan  $E_o$ . De oorzaken zijn de volgende:*

- 1e. De reflectie-coëfficiënt van een gewas is groter dan van water. Bij een rijpend gewas, dat lichter van kleur wordt, wordt de reflectie-coëfficiënt nog groter.
- 2e. De bladeren bezitten huidmondjes. Het totale oppervlak van alle poriën is slechts een gering deel van het bladoppervlak, zodat men een sterke reductie zou verwachten. De verdamping is echter nog ca. 70% van die van een overeenkomstig nat filtreerpapier.
- 3e. Als reactie op een watertekort in het blad worden de huidmondjes gesloten. Hierdoor daalt de verdamping van een vegetatie nog verder beneden die van vrij water.

*$E_{rx}$  kan groter zijn dan  $E_o$ . De oorzaken zij de volgende:*

- 4e. De aerodynamische ruwheid van een vegetatie-oppervlak is groter dan die van water. Hierop heeft de hoogte een grote invloed, maar ook de vorm van de plant en zijn soepelheid. Hoe groter de ruwheid, des te groter is ook de turbulente damp- en warmte-uitwisseling. Ook de dichtheid van een plantendek zal een rol spelen.

- 5e. Warme lucht die van elders aangevoerd wordt (advectie), kan in niet te verwaarlozen mate bijdragen tot vergroting van de verdamping, vooral naarmate het plantendek hoger is en daardoor de passerende lucht een groter oppervlak voor uitwisseling biedt. Dit punt laat PENMAN eenvoudigheidshalve buiten beschouwing. Het aantal waarnemingen, enkele van PENMAN zelf inbegrepen, dat dwingt om advectieve warmte in de beschouwing op te nemen, wordt echter steeds groter.
- 6e. De donkere straling (uitstraling van stralen met lange golflengte) is bij een vegetatie kleiner dan bij water, als gevolg van een lagere oppervlakte-temperatuur van de bladeren.

Zou het mogelijk zijn voor elk der zes genoemde omstandigheden een factor — en voor elk gewas een andere! — aan  $E_o$  toe te voegen, dan zou  $E_{rx}$  gemakkelijk kunnen worden berekend.

### 3. DE POTENTIËLE EVAPOTRANSPIRATIE VERGELEKEN MET DE VERDAMPING VAN VRIJ WATER

In navolging van THORNTHWAITE (1948) gebruikte PENMAN het begrip potentiële evapotranspiratie (door mij met  $E_p$  aangeduid). Hieronder wordt door PENMAN de verdamping verstaan uit een korte gesloten vegetatie, die optimaal van water wordt voorzien. PENMAN zelf (1948) werkte met een kortgeschoren grasveld; daarom is hier  $E_p$  op kort gras betrokken. De samenhang tussen  $E_p$  en  $E_o$  geeft PENMAN weer door:

$$E_p = f E_o \quad (1)$$

De factor  $f$  werd door PENMAN (1948) empirisch in twee jaren bepaald met behulp van een verdampingsbak en van een met kort gras begroeide lysimeter, waarin een hoge waterstand werd aangehouden. De bak geeft echter a priori niet het cijfer dat met de formule voor  $E_o$  wordt berekend, omdat het water erin niet aan de gestelde premissen voldoet. Bij de berekening van  $f$  is dus het gebruik van de waarden van een bak in plaats van de berekende waarden voor  $E_o$  zonder meer niet geoorloofd. De gemiddelde waarden die PENMAN vond, bevatten dus ook een bakfactor. Deze, hierna vermelde getallen zijn daarom wellicht onjuist.

0,6		0,7		0,8	
jan	feb	mrt	apr	mei	jun
dec	nov	okt	sep	aug	jul

Gemiddeld voor het hele jaar neemt PENMAN als factor 0,75, omdat

aan de winterwaarden een geringer gewicht toekomt dan aan de zomerwaarden.

Dat deze waarden kleiner zijn dan 1, is duidelijk, omdat een vegetatie huidmondjes bezit die 's nachts gesloten zijn en een watervlak niet. Dat de waarden in de winter lager zijn dan in de zomer, volgt uit het feit dat de nachten (met de huidmondjes dicht) in de winter langer zijn dan in de zomer. Dit lijkt zeer vanzelfsprekend. Bovendien ontwikkelden PENMAN en SCHOFIELD (1951) een theoretische beschouwing, waarin zij tot ongeveer dezelfde numerieke waarden komen. Naar mijn mening wordt hierbij aan de donkere straling onvoldoende aandacht besteed. Deze is, zoals we zullen zien, voor het seizoeneffect van beslissende betekenis.

#### *a. Bepaling van $E_p$ met behulp van lysimeters*

Met de lysimeterinstallatie van het voormalige Centraal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek te Wageningen, thans beheerd door het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen, heb ik een onderzoek ingesteld om de formule van PENMAN, in het bijzonder de factor  $f$ , te toetsen (MAKKINK 1953, 1955, 1957a en 1957b). Het toetsen van de formule voor  $E_o$  is, zoals gezegd, met een verdampingsbak niet gemakkelijk mogelijk. Het vaststellen van de potentiële evapotranspiratie is echter goed mogelijk. Vergelijking van de waargenomen  $E_p$  met de berekende  $E_o$  voert tot een verhouding, die de  $f$  van PENMAN voorstelt.

$E_p$  werd ontleend aan 5 of 6 lysimeters met een zandgrond, waarin de waterstand het hele jaar door op — 50 cm werd gehouden. Het gras groeide hier goed en had steeds genoeg water tot zijn beschikking. Twee wegingen per week maakten het mogelijk  $E_p$  uit de waterbalans-vergelijking voor 3- of 4-daagse perioden te berekenen. De moeilijkheid was, dat in de loop van het seizoen de lengte van het gras varieerde; het werd elke 4 of 5 weken geknipt. Hierdoor beïnvloedde de aerodynamische ruwheid het cijfermateriaal ongelijkmatig. Bovendien ontving het gras extra-straling als gevolg van de 16 cm brede gaping tussen het gras op en het gras rondom de lysimeter. Deze extra-straling was groter, naarmate het gras langer was. Om deze factoren uit te sluiten zijn de  $E_p$ -waarden herleid op een graslengte van 2 cm, waarbij zowel het turbulentie-effect als het stralingseffect geëlimineerd werden. Hoe deze herleiding is uitgevoerd, is elders meegedeeld (MAKKINK 1957b). Door deze herleiding werden de uitkomsten vergelijkbaar met die van PENMAN, die met zeer kort gras werkte.

De  $E_o$  werd berekend met de formule van PENMAN en met de gegevens van temperatuur, relatieve vochtigheid en windsnelheid van het proefveld; de relatieve zonneshijncijfers werden van het Laboratorium voor Natuur-

en Weerkunde te Wageningen betrokken. In de formule van PENMAN (1956b) werd het instralingsdeel vervangen door dat van REESINCK en DE VRIES (1942), dat voor Wageningen was afgeleid en waarin het zonneshijnpercentage aan lokale stralingswaarden werd gekoppeld.

Het uitzetten van de herleide  $E_p$ -waarden tegen de berekende  $E_o$ -waarden voor de maanden maart tot en met oktober van 1953, 1954 en 1955 leverde een rechte lijn op met vrij aanzienlijke spreiding (fig. 1). De hellingstangens was 0,73 en verschilt dus weinig van die van PENMAN. De spreiding werd kleiner wanneer in plaats van de straling, berekend met

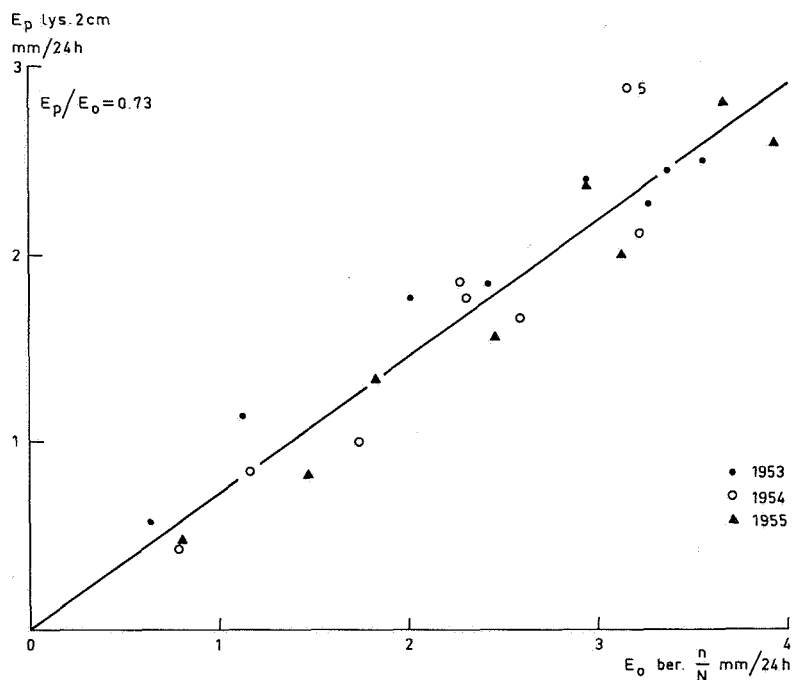


FIG. 1.  $E_p$  van 5—6 lysimeters met gras op een zandgrond waarin de waterstand constant op  $-50$  cm werd gehouden, herleid op een grashoogte van 2 cm, uitgezet tegen de berekende  $E_o$  (hierbij is het zonneshijnpercentage gebruikt); maandgemiddelden van maart tot oktober 1953, 1954 en 1955; 5 = mei

FIG. 1.  $E_p$  of 5-6 lysimeters with grass on sandy soil in which the watertable was held at  $-50$  cm, reduced for a grass height of 2 cm, plotted against the calculated  $E_o$  (in this the sunshine percentage is used); monthly means from March till October incl. in 1953, 1954 and 1955; 5 = May

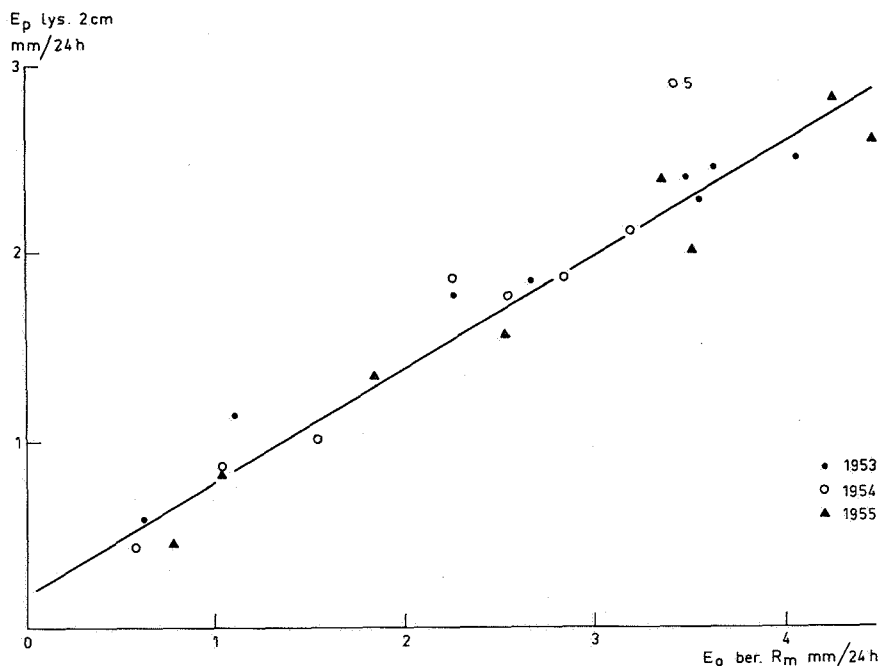


FIG. 2. Als figuur 1, maar nu is bij  $E_o$  de gemeten straling voor de berekening gebruikt  
 FIG. 2. As fig. 1, but for  $E_o$  the measured radiation ( $R_m$ ) is used in the calculation

het zonnenschijnpercentage, de met de thermozuyl gemeten globale straling in de formule van PENMAN werd ingezet (fig. 2). Dat een verbetering moest optreden is duidelijk, omdat de correlatie tussen berekende en gemeten straling niet zo hoog is als men zou wensen (DE VRIES 1955). Bovendien bleek, dat de waarden van de zomermaanden bij de gemeten straling systematisch een weinig hoger zijn dan bij de berekende straling (fig. 3). Dit is ook door RIJTEMA gevonden (mondelijke mededeling 1956).

De vraag rees, of er ook een behoorlijke correlatie bestaat tussen  $E_p$  en de gemeten straling alleen. Omdat de straling hoofdzakelijk de verdamping bepaalt, was deze verwachting gemotiveerd. Het bleek nu (MAKKINK 1957b), dat er een rechtlijnige samenhang bestond tussen de waargenomen, herleide

$E_p$  en  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  ( $R_m$  is de gemeten straling, uitgedrukt in mm verdampt water per etmaal;  $\Delta^*$  is de stijging van de verzadigingsdampdruk met de temperatuur, uitgedrukt in mm Hg per °C en  $\gamma$  de in dezelfde eenheid

\*  $\Delta$ , gebruikt in navolging van PENMAN, is identiek aan  $\delta$  (hoofdstuk I t.m. IV).

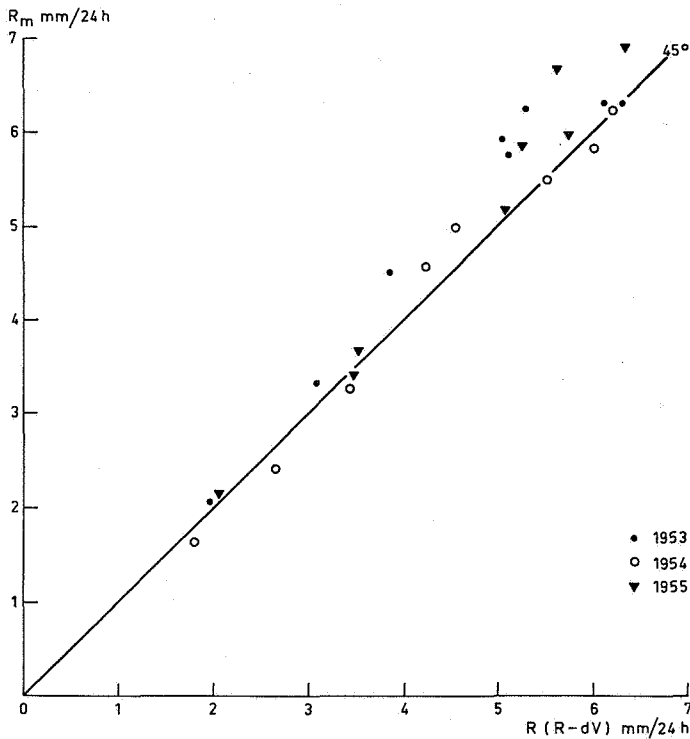


FIG. 3.  
De gemeten straling  
vergeleken met de vol-  
gens REESINCK en DE  
VRIES berekende;  
maandgemiddelden in  
mm per etmaal voor de  
maanden maart tot  
oktober 1953, 1954 en  
1955

FIG. 3.  
*The measured radiation  
( $R_m$ ) compared with  
calculated according to  
REESINCK and DE VRIES;  
monthly means in mm  
per 24 h. for the months  
of March till October  
in 1953, 1954 and 1955*

uitgedrukte psychrometer-constante, ter grootte van 0,49). Verrassend was, dat de spreiding van die regressie kleiner was dan bij het gebruik van de volledige PENMAN-berekening (fig. 4).

Over het afwijkende gedrag van het punt van mei 1954 in de figuren 1, 2 en 4 zal nog worden gesproken.

We beschikken dus nu over een nieuwe formule voor  $E_p$ , namelijk:

$$E_p = 0,61 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,12 \quad (2)$$

waarin  $E_p$  in mm per etmaal wordt uitgedrukt. Het voordeel van deze formule is, dat we nu onafhankelijk zijn van de min of meer verdachte factor  $f$  van PENMAN, waarmee  $E_p$  uit  $E_o$  wordt afgeleid.

Het nadeel is echter, dat de formule empirisch is en dus een lokale geldigheid heeft. Bovendien is de formule afhankelijk van een meting, die in Nederland slechts te Wageningen en de Bilt wordt uitgevoerd. Voor een andere plaats in Nederland kan echter  $E_p$  (Wageningen) met een plaats-

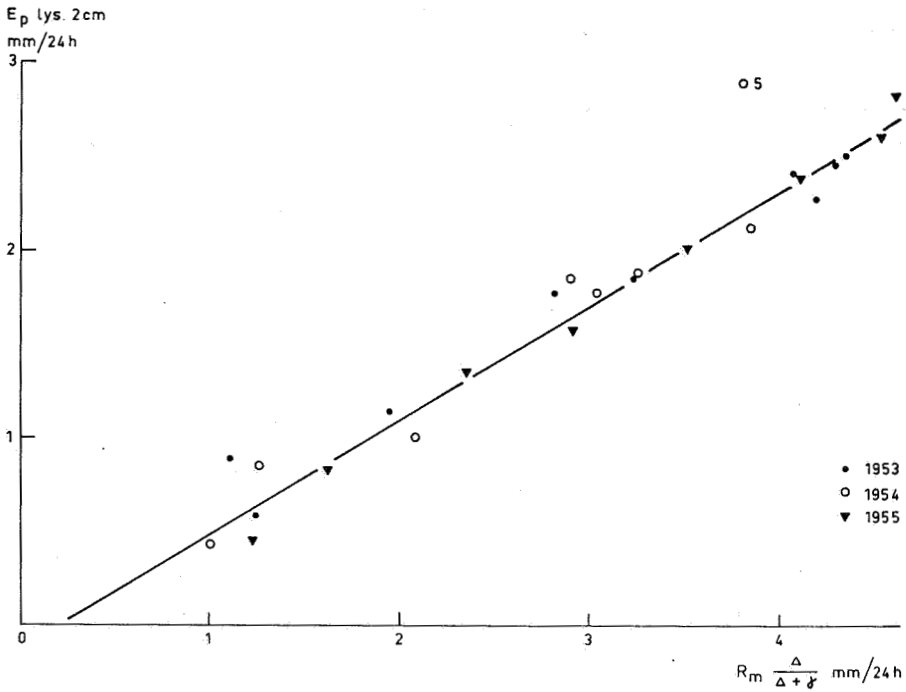


FIG. 4.  $E_p$  (als in figuur 1), uitgezet tegen  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$

FIG. 4.  $E_p$  (as in fig. 1), plotted against  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$

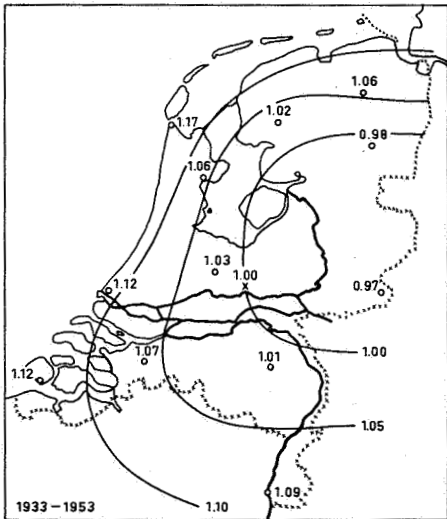


FIG. 5. Iso-evaporettenkaartje met relatieve gemiddelde jaarcijfers; Wageningen = 1,00 (naar gegevens van KRAMER 1957)

FIG. 5. Map of iso-evaporettes with relative figures of yearly averages;  $E_o$  at Wageningen = 1.00 (according to KRAMER 1957)



factor worden vermenigvuldigd. Deze kan men uit kaartjes van de gemiddelde  $E_o$  (per jaar of per maand) afleiden. Deze iso-evaporetenkaartjes kan men met behulp van de gegevens van KRAMER (1957) tekenen. Interpoleert men hierin een waarde voor Wageningen, dan is het mogelijk soortgelijke iso-lijnenkaartjes te maken met relatieve waarden t.o.v. Wageningen = 1,00 (fig. 5). Hieruit kan men voor elke plaats in Nederland de factor aflezen. Eventueel kan men nog een seizoenvereffening toepassen, wanneer men de gevonden maandwaarden tegen de tijd uitzet.

*b. Empirische formule voor  $E_o$*

Het lag voor de hand ook eens na te gaan, of de berekening van  $E_o$  door een eenvoudige functie van de gemeten straling zou kunnen worden vervangen. Daartoe werd voor de maanden maart tot en met oktober van 5 jaren de berekende  $E_o$  tegen  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  uitgezet. Ook hier kwam een rechte regressie te voorschijn, met een verrassend kleine spreiding (fig. 6). De formule ervoor is:

$$E_o = 1,01 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,50 \quad [\text{mm per etmaal}] \quad (3)$$

De betrekkelijk geringe spreiding volgt uit de volgende analyse. Men kan namelijk de formule van PENMAN als volgt splitsen:

$$E_o = \frac{\Delta H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} = \frac{\Delta R_{in}}{\Delta + \gamma} - \frac{\Delta R_{ui}}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

Hierin is  $R_{in}$  gebruikt om de instraling aan te duiden en  $R_{ui}$  voor de uitstraling, terwijl  $E_a$  een van  $E_o$  afgeleide grootheid voorstelt. De grootheid  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  is identiek met de eerste term van (4). Zet men hem uit tegen de tweede term van (4), dan krijgt men een zwerm punten waardoor een lijn kan worden getrokken, die de  $y$ -as vrij hoog snijdt (fig. 7). Dit duidt erop, dat de donkere straling in zomer en winter belangrijk is. Zet men de bewuste factor uit tegen de laatste term van (4), dan krijgt men een rechte lijn, die door de oorsprong gelegd kan worden (fig. 8). Het feit dat de lijnen alle een constante hellingstangens hebben, heeft de mooie

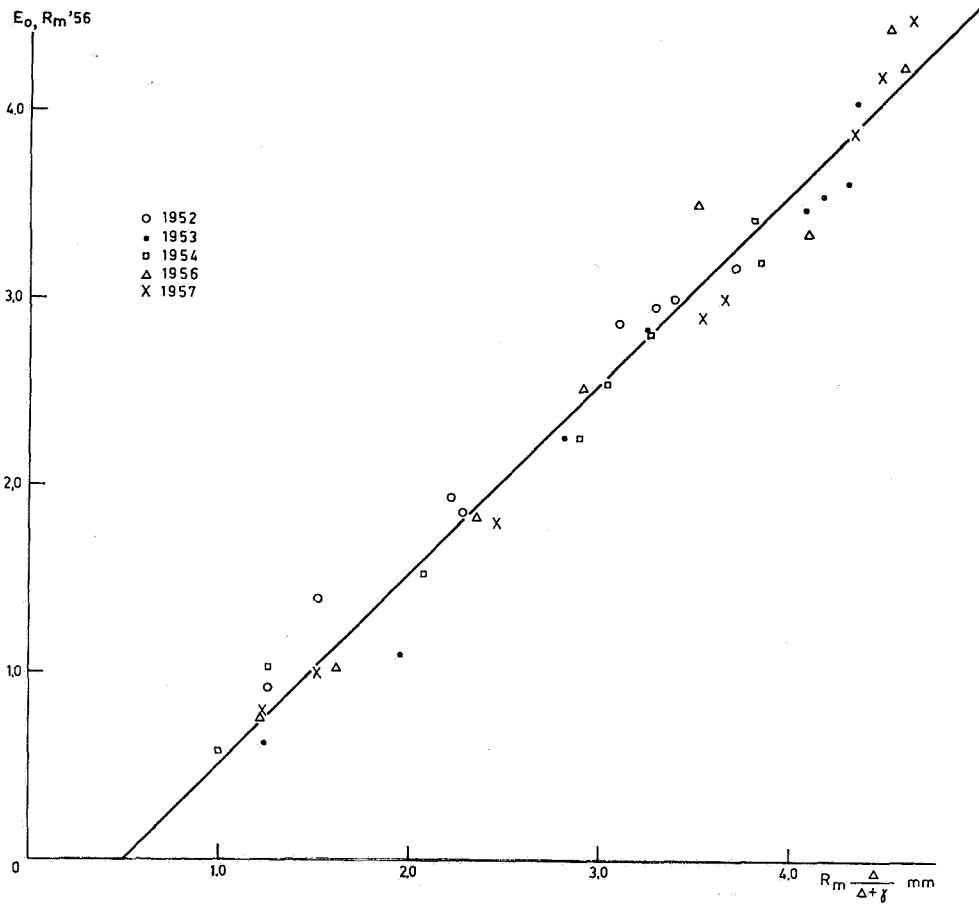


FIG. 6.  $E_o$  berekend met de gemeten straling, uitgezet tegen  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; maanden maart tot oktober van 1952—1957

FIG. 6  $E_o$  calculated with the measured radiation ( $R_m$ ), plotted against  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; March till October incl. in 1952-1957

correlatie tussen  $E_o$  en  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  tot gevolg. Zet men de door KRAMER (1957) over 20 jaren voor de Bilt berekende maandwaarden van  $E_o$  uit tegen de waarden van  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  ( $R_m$  voor 20 jaren te Wageningen,  $t$  over 30

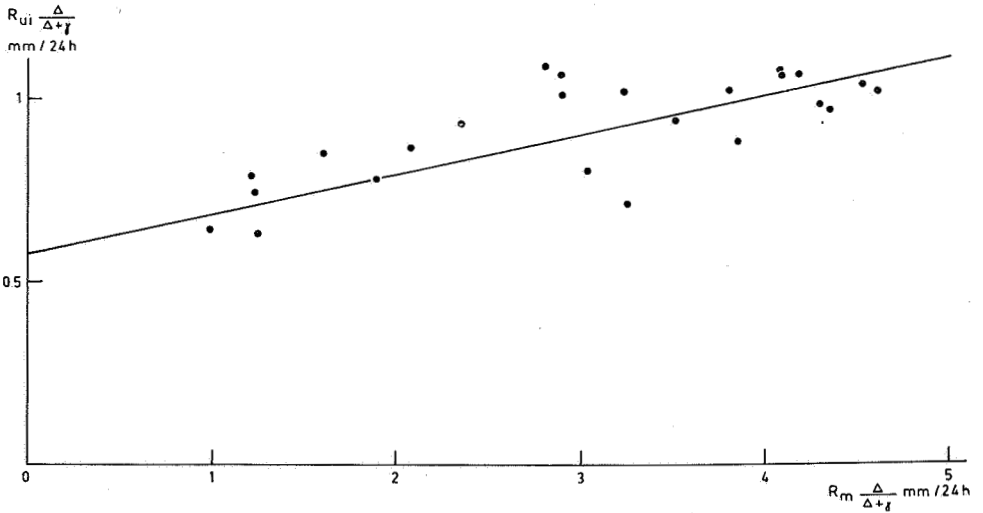


FIG. 7. De berekende uitstraling maal  $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  uitgezet tegen de gemeten instraling maal  $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; dezelfde maanden als in figuur 1

FIG. 7. The calculated backradiation times  $\Delta/(\Delta + \gamma)$  plotted against the measured incoming radiation times  $\Delta/(\Delta + \gamma)$ ; same months as in fig. 1

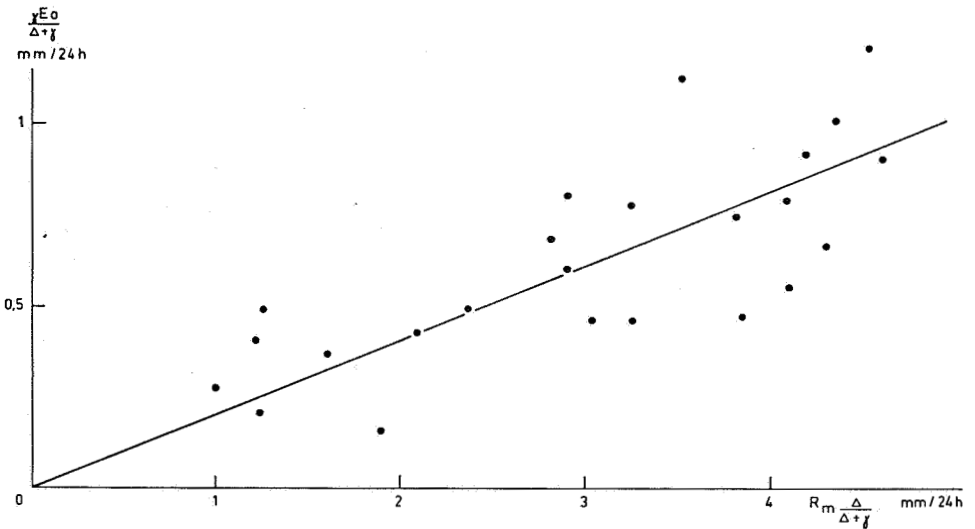


FIG. 8.  $\frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma}$ , uitgezet tegen de gemeten straling maal  $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; dezelfde maanden als in figuur 1

FIG. 8.  $\gamma E_a/(\Delta + \gamma)$ , plotted against the measured radiation times  $\Delta/(\Delta + \gamma)$ ; same months as in fig. 1

jaren te de Bilt, waar de gemiddelde temperatuur nagenoeg dezelfde is als te Wageningen), dan krijgt men figuur 9.

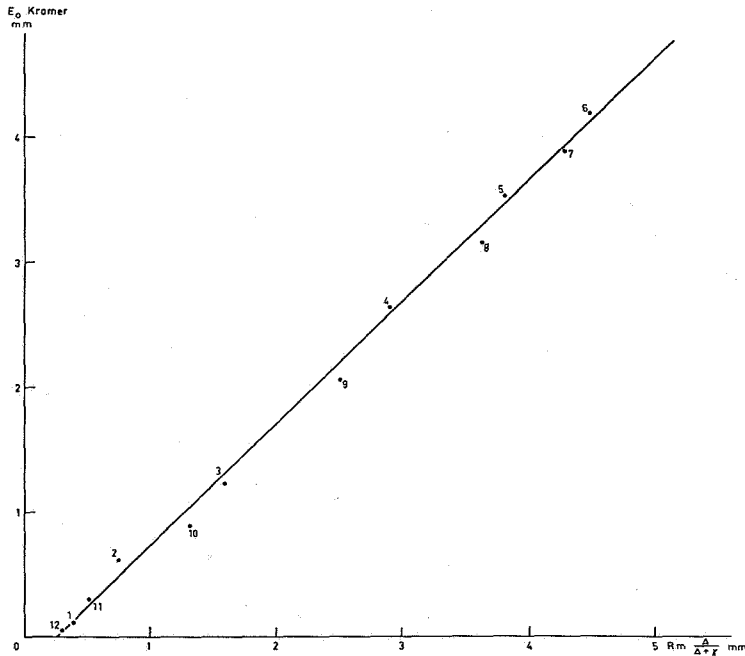


FIG. 9.  $E_o$  (maandgemiddelde van 1933—1953 volgens KRAMER 1957) vergeleken met de gemiddelde  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; de cijfertjes geven de volgnummers der maanden aan ( $R_m$  : 1938 t/m 1957 Wageningen,  $t$  : 1921 t/m 1950 de Bilt)

FIG. 9.  $E_o$  (monthly average of 1933—1953 according to KRAMER 1957) compared with the mean  $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ ; figures indicate the consecutive months ( $R_m$  from Wageningen 1938—1957,  $t$  from de Bilt 1921—1950)

De formule:

$$E_o = 0,98 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,27 \quad (5)$$

voldoet aan de punten. Bij nauwkeurige beschouwing blijken de punten op een sterk platgedrukte ellips te liggen, hetgeen betekent dat de uitkomsten van beide berekeningen niet geheel in fase zijn. Welke berekeningswijze de beste benadering van  $E_o$  is, kan niet gemakkelijk worden uitgemaakt.

Een toetsing is mogelijk aan de resultaten van de drijvende verdampingsbakken in de haven van Urk. Zoals verwacht mocht worden, verschillen de lijnen, berekend door KRAMER (1957) en die volgens de hier beschreven werkwijze, weinig. Ze lopen beide iets voor op de uitkomsten van de bak (fig. 10). Dit moet ook, omdat bij de berekende  $E_o$  de warmte-inhoud van

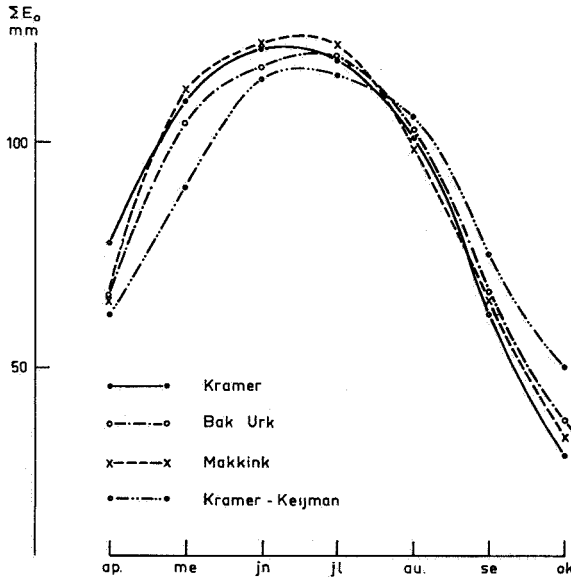


FIG. 10.  
 $E_o$  per maand in mm berekend volgens KRAMER 1957,  $E_o$  herleid voor een waterdiepte van 4,5 m (KEYMAN),  $E_o$  berekend volgens formule (2) x plaatsfactor en  $E_o$  waargenomen aan de drijvende bak in de haven van Urk

FIG. 10.  
 $E_o$  per month in mm calculated according to KRAMER 1957,  $E_o$  reduced to a water depth of 4.5 m (KEYMAN),  $E_o$  calculated according to formula (2) times the factor for locality and  $E_o$  observed at the floating pan in the harbour of Urk

de watermassa buiten beschouwing werd gelaten. Corrigeert men hiervoor, uitgaande van een waterlaag van 4,5 m diepte, dan blijken de uitkomsten belangrijk bij de gemeten waarden van de bak achter te blijven.\* Neemt men deze correctie als juist aan, dan moet de ongecorrigeerde  $E_o$  ervan verdacht worden voor te lopen bij de juiste, onbekende  $E_o$ . Het is echter niet zeker of de correctie volledig is.

### c. De factor $f$

Zet men in eenzelfde figuur de beide regressielijnen van (2) en (5) uit tegen  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  op de gemeenschappelijke  $x$ -as, dan kan men deze factor elimineren (fig. 11). Men krijgt dan in het 2e kwadrant een regressielijn

\* De schrijver is Dr. J. Q. KEYMAN van het K.N.M.I. dankbaar voor het uitvoeren van deze correctie.

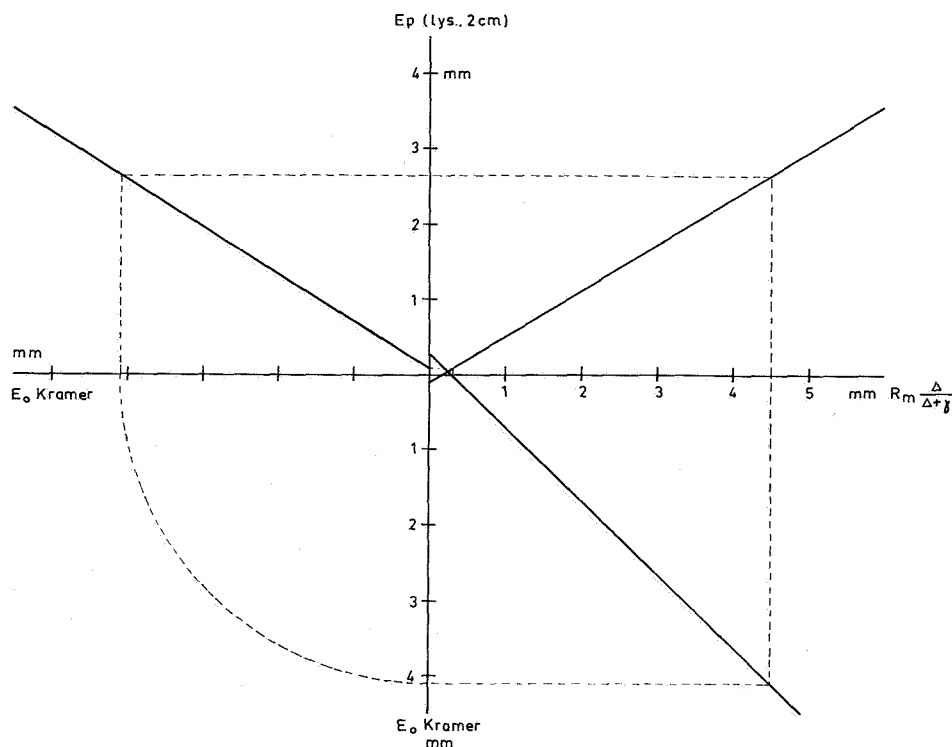


FIG. 11. Lijnen van figuur 4 en 9 gecombineerd om  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  te elimineren; in het tweede kwadrant het verkregen verband tussen  $E_p$  en  $E_o$

FIG. 11. Lines of figures 4 and 9 combined to eliminate  $R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ ; in the second quadrant appears the relationship between  $E_p$  and  $E_o$

die het verband tussen  $E_p$  en  $E_o$  voorstelt. Deze moet recht zijn. Het is betwistbaar of deze lijn door de oorsprong gaat of niet (MAKKINK 1957). Dit hangt vooral af van de constante in de uitstralingsterm (fig. 6). Wanneer men de waarden van de wintermaanden niet te zwaar telt (hun onnauwkeurigheid is groot), dan kan men  $E_p/E_o$  gerust constant beschouwen. Deze verhouding moet dan op 0,65 worden gesteld; de gemiddelde jaarsom van  $E_p$  over 20 jaren volgens (2) is nl. 448 mm; die van  $E_o$  over 20 jaren volgens KRAMER (1957) 693 mm. Wij vinden dus:

$$E_p = 0,65 E_o \quad (6)$$

Men kan dus nu de verdamping van de standaardvegetatie (een korte gesloten grasvegetatie, die optimaal van water is voorzien) òf uit de  $E_o$  afleiden met formule (6), òf rechtstreeks berekenen met formule (2).

#### 4. DE REELE EVAPOTRANSPIRATIE VAN KORT GRAS VERGELEKEN MET DE POTENTIELE

##### a. PENMAN's werkwijze

De werkelijke verdamping uit een korte gesloten vegetatie, waarvan de watervoorziening niet optimaal is, is in de regel lager dan bij optimale watervoorziening. PENMAN heeft al dadelijk de noodzakelijkheid ondervonden, ook voor zulke vegetaties de verdamping te schatten. Hij maakte daarbij gebruik van het in figuur 12 weergegeven schema (PENMAN 1949). Hierin is de werkelijke verdamping als sommatie uitgezet tegen de potentiële, eveneens als som. Als uitgangspunt wordt een ogenblik genomen waarop de grond op veldcapaciteit is. In overeenstemming met de opvatting van VEIHMAYER en HENDRICKSON wordt aangenomen, dat al het water in de bewortelde laag van de grond even gemakkelijk door het gewas kan worden onttrokken, totdat het punt bereikt is waarop de planten onherstelbaar beginnen te verwelken.

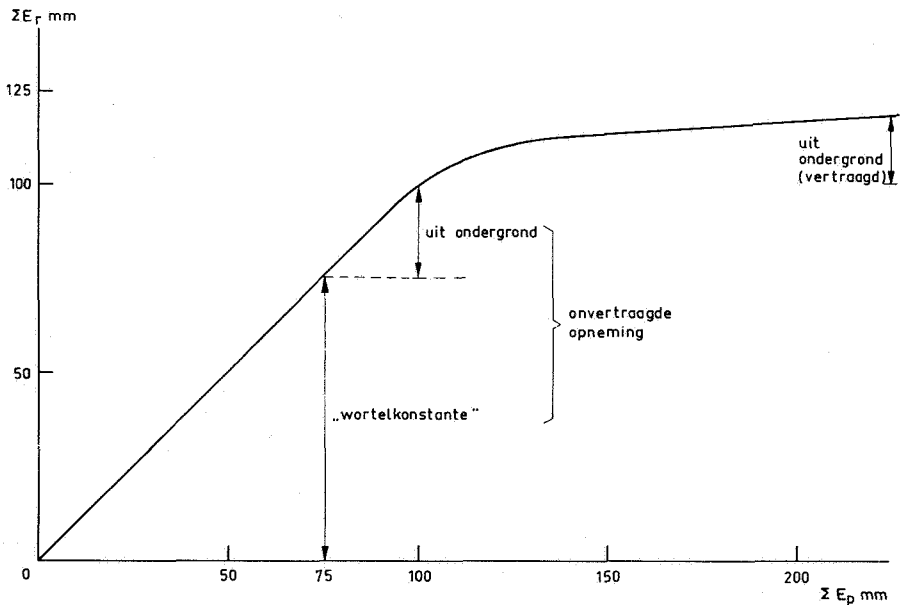


FIG. 12. Samenhang tussen de gesommeerde werkelijke verdamping en de gesommeerde potentiële verdamping; verklaring zie tekst (vrij naar PENMAN 1949)

FIG. 12. Relationship between the summarized actual evapotranspiration and the summarized potential evapotranspiration; explanation in text (freely after PENMAN 1949)

PENMAN neemt aan, dat ruwweg 75 mm onttrekbaar water in de bewortelde laag voorhanden is (de „wortelconstante”). Weliswaar bevat een zandgrond per dm veel minder onttrekbaar water dan een kleigrond, maar dit bedrag wordt — naar PENMAN aanneemt — gecompenseerd door een diepere beworteling in de vochtarme grond. Zijn de 75 mm verbruikt, dan kan onder invloed van de sterk gestegen capillaire potentiaal in de wortelzone, nog 25 mm opstijgen uit de niet bewortelde ondergrond, analoog met wat men bij een kale grond vindt. Is ook deze 25 mm verdampt, dan daalt de verdamping sterk beneden de potentiële en wel tot een tiende à een twaalfde daarvan. Valt er opnieuw regen, dan begint men evenveel mm lager op de kromme als de regenhoeveelheid bedroeg, of in de oorsprong wanneer al het onttrokken water werd aangevuld.

Naar gelang van de situatie neemt PENMAN afwijkende wortelconstanten aan (1949, 1950). Bij een voldoende hoge grondwaterstand neemt PENMAN een verbruik volgens  $E_p$  aan (1950).

### b. Eigen onderzoek

Uit een onderzoek aan lysimeters met kleigrond werd gevonden (MAKKINK en VAN HEEMST 1956), dat bij een bepaalde verdampingsintensiteit ( $E_p$ ) de werkelijke verdamping geringer is, naarmate de grond droger d.w.z. de vochtspanning lager is (fig. 13). Bij een minder intensieve verdamping is deze daling minder steil en bij een zeer zwakke verdampingsintensiteit is de werkelijke verdamping even groot als de potentiële, ongeacht of de

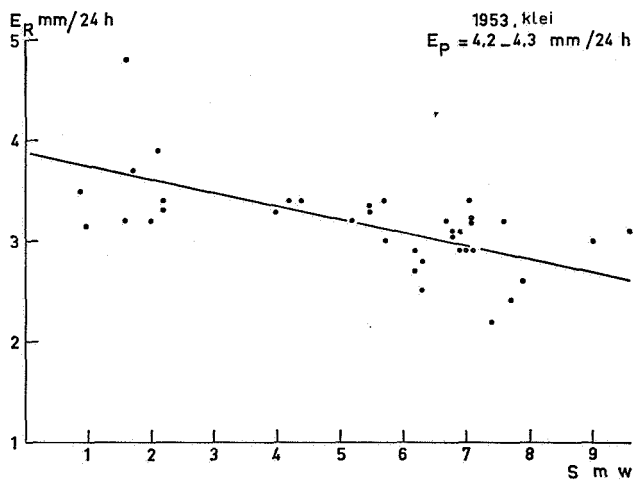


FIG. 13.  
 Werkelijke verdamping van lysimeters met klei, uitgezet tegen de vochtspanning op  $-5$  cm in m waterkolom voor perioden van 3—4 dagen, waarin de gemiddelde  $E_p$  4,2 tot 4,3 mm/etmaal bedroeg

FIG. 13.  
 Actual evapotranspiration of lysimeters with clay soil, plotted against the moisture tension at  $-5$  cm in m water column for periods of 3—4 days, in which the average  $E_p$  was 4.2—4.3 mm/24 h



grond nat of droog is. Dit alles klinkt aannemelijk, omdat voor gras mag worden aangenomen dat de beworteling niet diep gaat en in klei in de diepere lagen vermoedelijk spoedig ijl wordt. De toedracht is in figuur 14 uitgebeeld. In veengrond bleek de invloed van de droogte van de grond geringer (fig. 15). Mogelijk was er in deze grond een snellere capillaire opstijging, of was de beworteling dichter en dieper.

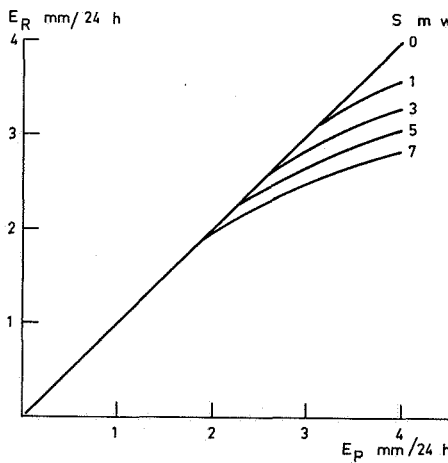


FIG. 14.  
Het verband tussen de werkelijke verdamping ( $E_r$ ) en de potentiële verdamping ( $E_p$ ) in 1953 bij verschillende vochtspanningen op  $-5$  cm; de cijfers bij de lijnen geven de vochtspanning aan in m waterkolom

FIG. 14.  
*The relationship between the actual evapotranspiration ( $E_r$ ) and the potential evapotranspiration ( $E_p$ ) in 1953 with various moisture tensions at  $-5$  cm; the figures near the curves indicate the moisture tension in m water column*

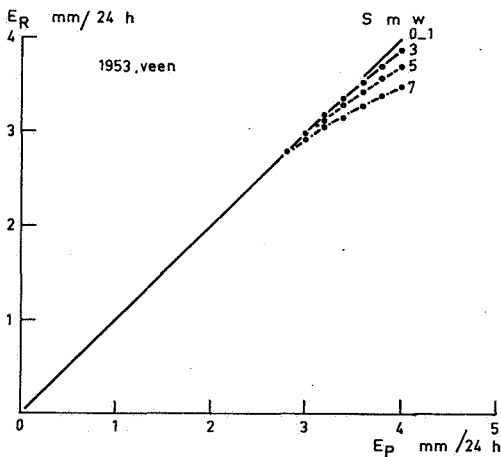


FIG. 15.  
Hetzelfde verband als in figuur 13, maar nu bij veen en in 1953

FIG. 15.  
*The same relationship as in fig. 13, but with peat soil and in 1953*

In drie verschillende jaren werden bij een bepaalde vochtspanning op  $-5$  cm niet geheel dezelfde krommen gevonden (fig. 16). Of deze significant van elkaar verschillen, zou ik niet durven zeggen. (Bij dit onderzoek is de verdamping van het gras niet op een lengte van 2 cm herleid. Maar het is niet waarschijnlijk, dat bij een bewerking waarbij de evapotranspi-

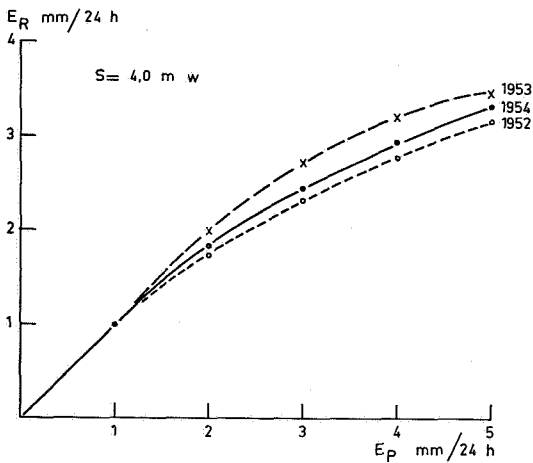


FIG. 16.  
Lijnen als in figuur 13 en 14 bij een vochtspanning van 4 m waterkolom op  $-5$  cm bij kleigrond in de jaren 1952, 1953 en 1954

FIG. 16.  
Curves as in fig. 13 and 14 with a moisture tension of 4 m water column at  $-5$  cm on clay soil in 1952, 1953 and 1954

ratie wel herleid zou zijn, de invloed van de verdampingsintensiteit en van de vochtspanning van de grond kleiner zouden uitvallen, omdat niet alleen het waterverbruik maar ook de vochtspanning, die haar mede bepaalt, overeenkomstig herleid zou moeten worden.) Omdat er vele soorten grond bestaan, waarin ook de beworteling kan verschillen, is het niet mogelijk in elk willekeurig geval voor gras de reële evapotranspiratie uit de potentiële te berekenen; nog minder is dit voor een willekeurig gewas mogelijk. Wel stelt het gewonnen inzicht ons in staat in bepaalde gevallen voor de verhouding  $E_r/E_p$  een zekere factor schattenderwijs te kiezen, overeenkomstig de gegevens die men over graslengte, grond en beworteling heeft.

## 5. DE REËLE EVAPOTRANSPIRATIE VAN WILLEKEURIGE VEGETATIES

### a. PENMAN's onderzoek

PENMAN (1948, 1949, 1955) heeft zijn berekeningen aan allerlei gevallen getoetst: aan verdampingsbakken, lysimeters, velden waarin het optreden van drainwater kon worden waargenomen, afvoergebieden van beken en rivieren. Bovendien deed hij dit zowel in Engeland als in andere landen. Voorzover het vegetaties van gras betreft waren de uitkomsten bevredigend, evenals die van berekening van aardappels en suikerbieten (PENMAN 1952, 1953). Voor boomgaarden bracht hij de hoogte, de kroon diameter en de afstand tussen de bomen in rekening in de  $E_a$ , met bevredigend resultaat (PENMAN 1953).

Een stroomgebied in de Verenigde Staten met een hoge en zware bossing gaf echter een 20—40% hogere waarde dan de berekende, zodat

PENMAN onderstelt dat er ongemerkt water verdwenen is, tengevolge van een geologische constellatie. In een tweede stroomgebied in de Verenigde Staten komen de waarden weliswaar goed met de berekende overeen, maar de opgetreden droogteperioden en de plaatselijk schaarse vegetatie deden een veel geringere verdamping verwachten dan volgens  $E_p$ , zoals PENMAN aannam. In beide gevallen acht WILM het dan ook aannemelijker, dat PENMAN de  $E_p$ -verdamping aanzienlijk heeft onderschat (PENMAN 1956a).

Ook in Australië onderstelt DE VRIES (1957), dat advectieve warmte de verdamping aanzienlijk boven de berekende kan doen uitkomen. RIDER (1957) vindt op grote percelen zoveel meer verdamping bij hoge gewassen dan bij lage, dat hij advectie mogelijk oordeelt. Ook DE WIT (1958) oppert deze onderstelling op grond van een uitvoerige theoretische studie.

#### *b. Enige Nederlandse gegevens*

**Kort gras.** In de grafieken van de figuren 1, 2 en 4 viel mei 1954 te hoog uit. Een deel van deze maand en een deel van april eraan voorafgaand waren zeer droog, zo droog zelfs dat de grond van de omgeving van de lysimeters scheuren vertoonde. De lucht was droog en warm, terwijl de verdampingsmogelijkheden van de lysimeters onbepakt waren. Er werd dus warmte uit de omgeving aangevoerd, waardoor de lysimeters meer water konden verliezen dan de formule deed verwachten.

**Lang gras.** Uit een onderzoek op grasland door WIND (1954), waarbij het waterverbruik met behulp van elektrische weerstandselementen werd gemeten, bleek dat bij alle vijf sneden het waterverbruik ( $E_r$ ) de met (2) berekende verdamping meestal te boven ging (fig. 17).

**De Haarlemmermeerpolder.** De gemiddelde verdamping uit de Haarlemmermeerpolder (berekend uit de waterbalans, waarbij de kwel in aanmerking is genomen) moet op 477 mm per jaar worden gesteld (ELINK STERK 1898) en na correctie van de regenval op 535 mm (STOLP en MOHRMANN 1953). De gemiddelde  $E_p$  is 470 mm ( $0,65 E_o$ ,  $E_o$  volgens KRAMER) of 480 mm ( $E_p$  volgens (2)  $\times$  plaatsfactor 1,07). Deze bedragen worden dus door de werkelijke verdamping overschreden. Voor een bouwvolder, waarvan de grond in een deel van het jaar geen gewas draagt of een afgerijpt gewas of een gewas dat niet maximaal transpireert, betekent dit dus dat de wel verdampende oppervlakken een hogere verdamping hadden dan het polder-gemiddelde van 535 mm, dus belangrijk hoger dan de berekende  $E_p$  van 470 tot 480 mm.

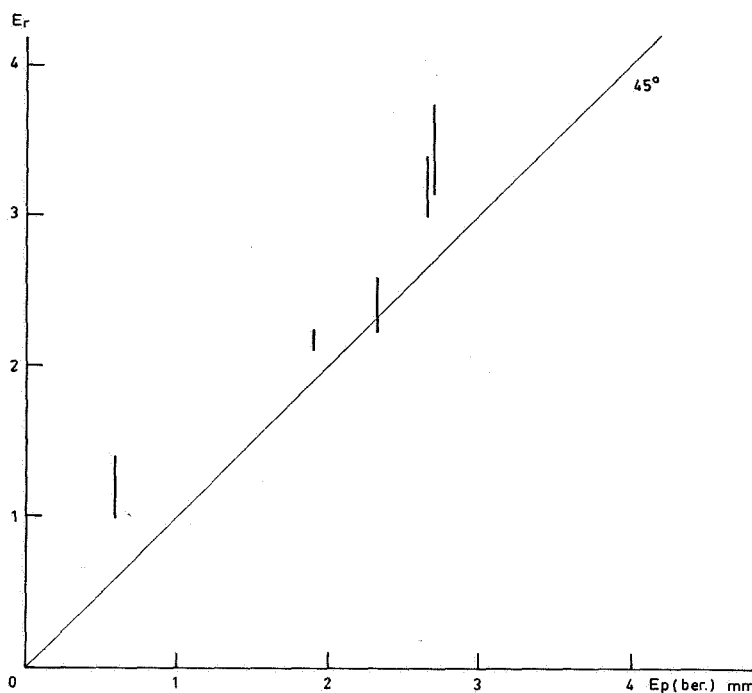


FIG. 17.  
Gemiddelde werkelijke verdamping van grasland in vergelijking tot de  $E_p$ , naar gegevens van G. P. WIND; elk streepje stelt 5 stikstofniveaus voor en heeft op één snede betrekking

FIG. 17.  
Average actual evapotranspiration of grassland compared with  $E_p$ , according to figures of G. P. WIND (1954); each dash represents 5 levels of nitrogen and concerns one cut

De Wieringermeer. Van de Wieringermeer, eveneens een bouwplolder, kan hetzelfde worden gezegd als van de Haarlemmermeerpolder. Aan Ir A. G. BRUGGEMAN heb ik 10 jaarcijfers te danken van de verdamping uit de polder, berekend uit waterbalansen waarbij de kwel geëlimineerd is. De gemiddelde verdamping bedraagt, nadat een regenmetercorrectie is toegepast, 538 mm en ligt dus boven die van de met (2) en een plaatsfactor berekende  $E_p$  van 480 mm en boven de met (5) berekende 470 mm.

De Rottegatpolder. In deze polder zijn op een proefveld 4 vakken ondergronds met een damwand omgeven, zodat ze als lysimeters werken. Hiervan is de waterbalans voor perioden van ongeveer een maand bekend (Verslagen 1951—1957). Op deze proefvakken worden van jaar tot jaar verschillende gewassen geteeld, die met die op het omringende perceel een ononderbroken geheel vormen. Het blijkt (fig. 18), dat de reële verdamping vaak hoger is dan de potentiële, in het bijzonder voor perioden waarin een gesloten groen gewas te velde staat. Perioden met een opkomend of rijpend gewas hebben overwegend een lagere verdamping. Kale grond gedraagt

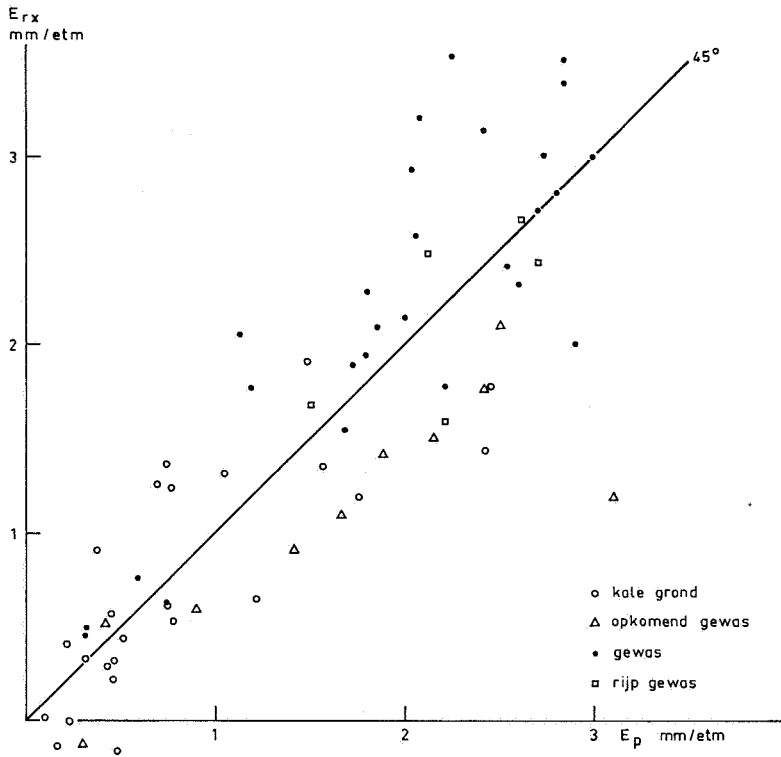


FIG. 18. Werkelijke verdamping over perioden van ongeveer een maand op het drainage-lysimeterproefveld in de Rottegatpolder, uitgezet tegen de  $E_p$  (1950—1955)

FIG. 18. Actual evapotranspiration in periods of about a month at the drainage-lysimeter field in the Rottegatpolder, plotted against  $E_p$  (1950—1955)

zich verschillend; in de winter kunnen de waarden hoog zijn, vermoedelijk doordat dan de verdamping volgens  $E_o$  ( $= 1,55 E_p$ ) plaats heeft.

Lysimeters te Castricum. De 4 lysimeters hebben elk een oppervlak van  $25 \times 25$  m<sup>2</sup>. Eén lysimeter is geheel kaal (duinzand); één heeft een normale duinbegroeiing van mossen, grassen (o.a. helm) en duindoorns; één heeft een loofhoutvegetatie (zomereik, els en berk) en één een begroeiing van Oostenrijkse dennen. Beide laatste lysimeters hebben een gordel van 30 m breedte, waarop dezelfde beplanting staat. In 1950 was het dennebestand gesloten te achten, het loofbos vermoedelijk ook. Berekent men voor het hydrologische jaar (maart — februari) de verhouding tussen de werkelijke en de berekende potentiële verdamping, dan heeft deze ver-

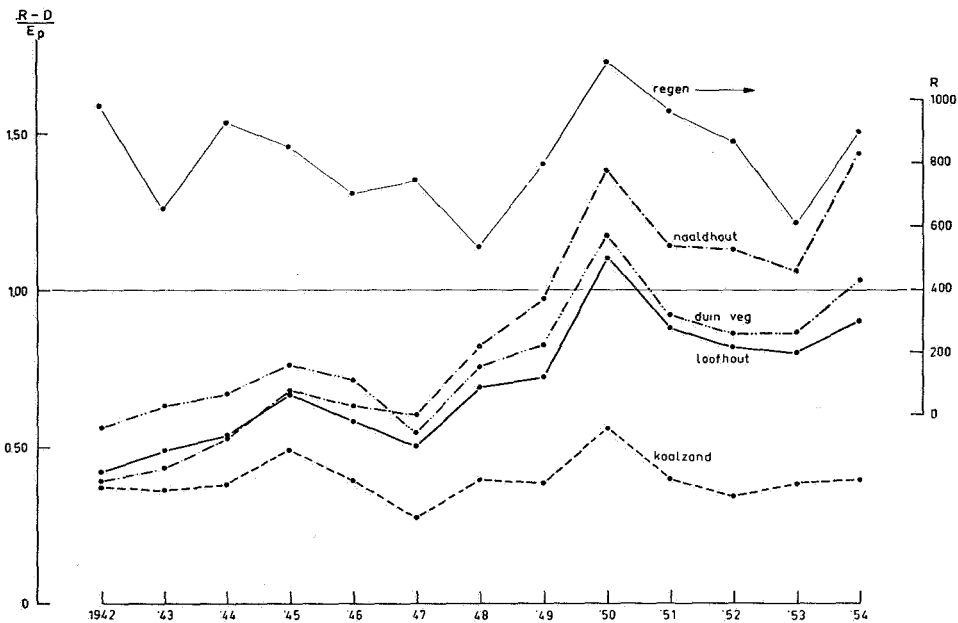


FIG. 19. Jaarlijkse verdamping gedeeld door de berekende  $E_p$  voor de vier lysimeters te Castricum; van 1942 tot en met 1954; ook de jaarlijkse regenval is vermeld

FIG. 19. Yearly evapotranspiration divided by the calculated  $E_p$  for the 4 lysimeters at Castricum in 1942—1954; also the yearly rainfall is mentioned

houding in de loop der jaren een verloop dat in figuur 19 is weergegeven. Dit verloop verandert slechts onbelangrijk wanneer  $E_p$  in plaats van volgens formule (2)  $\times$  plaatsfactor, volgens  $E_o \times 0,65$  wordt berekend. Ook hier is het duidelijk, dat bij het gesloten bos en in het bijzonder het naaldbos, maar ook bij de natuurlijke duinvegetatie in een regenrijk jaar, de werkelijke verdamping belangrijk boven de potentiële kan uitkomen. De fluctuaties zijn groot en hangen ongetwijfeld met de neerslaghoeveelheid in de zomer samen. De gebruikte gegevens zijn ontleend aan WIND (1955).

Noordwest-Veluwe. In 1957 heb ik in een voordracht voor de Hydrologische Commissie T.N.O. het resultaat meegedeeld van een berekening van de verdamping van het deel van de Veluwe, dat afwatert naar het IJsselmeer. Voor de jaren 1948 tot en met 1950 had de Dienst van de Zuiderzeewerken volgens verschillende hydrologische werkwijzen voor de „nuttige neerslag” een gemiddeld bedrag van 320 mm gevonden,

hetgeen bij een gemiddelde neerslag van 770 mm een verdamping oplevert van 450 mm. Naar de topografische kaart werd het procentuele aandeel van de verschillende begroeiingen geschat, hetwelk hierna is weergegeven. Hiervoor zijn de hierbij opgegeven factoren toegepast, waarmee  $E_p$  moest worden vermenigvuldigd.

	Vegetatie-aandeel	Factor	
Naaldhout	0,44		1,0
Loofhout	0,12	(mei-oktober)	1,0
		(november-april)	0,4
Hei en zandverstuiving	0,27	(hei)	0,9
		(zand)	0,4
Bouwland	0,09		0,8
Grasland	0,07		0,8
	0,99		

Dit voerde tot een gemiddelde verdamping van 450 mm, evenals een berekening op de grondslag van lysimetergegevens (zie voor details WIND en MAKKINK, in druk).

Achteraf vraagt men zich af hoe het komt, dat in dit geval factoren van 1,0 of kleiner tot het juiste resultaat voerden, terwijl uit het voorgaande is gebleken dat hogere factoren waarschijnlijker zijn. Het blijkt nu (KRAMER 1957), dat de verdamping  $E_o$  op de N.W.-Veluwe, in 1948, 1949 en 1950 gemiddeld 675 mm is geweest, terwijl het bedrag van de Bilt (708 mm) werd gebruikt. Verder blijkt uit het voorgaande dat voor factor  $f$  0,65 waarschijnlijker is dan 0,75. Hierdoor komt  $E_p$  op 438. Houdt men de werkelijke verdamping op 450 mm, zoals uit het hydrologische onderzoek en uit de lysimetergegevens bleek, dan zou de gemiddelde vegetatiefactor op 1,03 komen of nog hoger, omdat de grond niet volledig bedekt was en de verdamping niet steeds volgens  $E_p$  verliep.

Alle hier vermelde gegevens tonen aan dat de verdamping uit een gewas belangrijk boven de potentiële kan uitgaan, soms zelfs boven  $E_o$ . Dit geldt zelfs voor een vegetatie die men geneigd is kort te noemen (gras). Dit is alleen mogelijk door aanvoer van warmte. Over dit punt is nader onderzoek gewenst.

## 6. DE VEGETATIEFACTOREN

### a. Korte en lange perioden

Wanneer een gewas  $x$  zijn groeicyclus doormaakt en daarna door een ander wordt vervangen en wanneer gedurende die tijd natte en droge pe-

rioden elkaar afwisselen, zal de vegetatiefactor ( $E_{rx}/E_p$ ) veranderen. Hoe deze verandert, kan alleen in kortdurende meetperioden worden vastgesteld. Voorlopig kan dit alleen met de methode van het verticale damptransport. Eén ding is hierbij duidelijk, namelijk dat de veranderingen als gevolg van de groei van het gewas zeer geleidelijk verlopen, uitgezonderd de momenten dat de mens door ploegen of oogsten ingrijpt. De veranderingen als gevolg van het weer hebben een wisselvallig karakter, omdat elke regenbui een bepaalde uitdrogingstoestand van de grond plotseling wijzigt. En ook tijdens een periode van uitdroging hoeft de reductiefactor niet voortdurend lager te worden, maar kan weer hoger worden zodra de intensiteit van de verdamping geringer wordt. Naarmate de beworteling dieper en dichter is en de grond een groter vochthoudend vermogen heeft, zijn de veranderingen van de vegetatiefactor geringer.

Het bepalen van de verdamping in korte perioden stuit op moeilijkheden, evenzo dus de bepaling van de vegetatiefactoren. Over langere perioden echter kunnen uit verschillende onderzoeken vegetatiefactoren worden afgeleid. Deze zijn echter door middeling vervlakt. Dit bemoeilijkt bij schattingen het kiezen van de vereiste vegetatiefactor. Daarom zal het nodig zijn, dat wij over een groot sortiment van factoren beschikken, niet alleen met betrekking tot gewas en grond, maar ook met betrekking tot de lengte van de periode en de weersomstandigheden.\*

#### *b. De verdampingsnorm*

Men kan van twee verschillende normen uitgaan, van  $E_o$  en van  $E_p$ . Het uitgaan van  $E_o$  heeft het voordeel, dat dit een theoretisch welomschreven grootheid is. Het nadeel is, dat deze in geen enkele biologische relatie staat tot de verdamping van een vegetatie en dus weinig houvast biedt voor de schatting van een reductiefactor bij  $E_o$ . Het uitgaan van  $E_p$  heeft zin, wanneer men dit doet met betrekking tot de zes op pagina 91 genoemde factoren (behalve factor 3). Verder is er het nadeel, dat men bij de berekening uit  $E_o$  factor  $f$  nodig heeft, waarvan PENMAN's waarden dubieus zijn.

Bij het gebruik van formule (2) is het nadeel weliswaar, dat men slechts beschikt over de straling te Wageningen of te de Bilt en voor een andere plaats een plaatsfactor moet gebruiken; het voordeel is echter, dat men een grootheid heeft waarmee de vegetatiefactoren in fysisch en biologisch verband staan (hoogte, dichtheid, watervoorziening). Verder is bij  $E_p$  geen

\* Intussen is een poging ondernomen de vegetatiefactoren te hanteren, door hun grootte afhankelijk te stellen van de voorraad bodemvocht, de wortelgroei en de gewashoogte (MAKKINK G. F., *Publ. 49 Ass. Internat. d'Hydro. Sc.* 1959: 13—25).



factor  $f$  nodig. Heeft men  $E_p$  met (2) berekend, dan kan men door vergelijking van kleur, bedekkingsgraad en hoogte met die van een kort grasdek een vermenigvuldigingsfactor schatten. Een tweede factor schat men voor de vochtvoorziening, waarbij figuren als 14 en 15 leren hoe men  $E_p$ , de vochttoestand van de grond en de grondsoort (resp. de beworteling) in de schatting van de factor tot hun recht kan laten komen.

Voor een kale grond echter is  $E_o$  als uitgangspunt beter, omdat deze in natte perioden volgens  $E_o$  verdampft, in droge praktisch helemaal niet.

Het volgende overzicht geeft de verhoudingen globaal weer:

$E_o$ vrij water	$E_o/E_p = \text{gem. } 1,55$
$E_p$ korte gesloten grasvegetatie met optimale watervoorziening	$E_p/E_p = 1$
$E_r$ korte gesloten grasvegetatie bij beperkte watervoorziening	$E_r/E_p = \text{of } < 1$
$E_{px}$ vegetatie $x$ bij optimale watervoorziening	$E_{px}/E_p \text{ meestal } > 1$
$E_{rx}$ vegetatie $x$ bij beperkte watervoorziening	$E_{rx}/E_r \text{ meestal } > 1$
	$E_{rx}/E_{px} = \text{of } < 1$
$E_g$ onbedekte grond, naar gelang van natte of droge toestand	$E_g/E_p = 1,55 \text{ tot } 0$

## 7. CONCLUSIE

Uit het vorenstaande blijkt dat er nog onderzoek gewenst is, in het bijzonder met betrekking tot de vegetatiefactoren. Het gebruik van methodieken, waarbij het waterdampverlies uit een willekeurige vegetatie — liefst rechtstreeks — gemeten wordt, is hierbij onmisbaar. Het is van groot belang parallel met de metingen de toestand van gewas en grond en de omstandigheden voor advectie zo uitvoerig mogelijk vast te leggen.

Intussen biedt ook de werkwijze van DE WIT, die op de samenhang tussen verdamping en productie gebaseerd is, een nieuwe mogelijkheid om het werkelijke waterverbruik van gewassen te schatten (DE WIT 1958).

## LITERATUUR

- |                 |  |
|-----------------|--|
| ELINK STERK, A. | Verhandelingen over regen, verdamping en kwel in den Haarlemmerpolder. <i>Tijdschr. Kon. Inst. v. Ing.</i> , 1897—'98: 63—75.  |
| KRAMER, C.      | Berekening van de gemiddelde grootte van de verdamping voor verschillende delen van Nederland volgens de methode van Penman. <i>K.N.M.I. Med. en Verh.</i> 70, 1957. |
| MAKKINK, G. F.  | Een nieuw lysimeterstation. <i>Water</i> 37: 159—163, 1953.  |
| MAKKINK, G. F.  | Toetsing van de berekening van de evapotranspiratie volgens Penman. <i>Landb. Tijdschr.</i> 67: 267—282, 1955.   |

- MAKKINK, G. F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journ. Inst. of Water Eng.* 11: 277—288, 1957 (a).
- MAKKINK, G. F. Exzamen de la formulo de Penman. *Neth. Journ. Agr. Sci.* 5: 290—305, 1957 (b).
- MAKKINK, G. F. en H. D. J. VAN HEEMST The actual evapotranspiration as a function of the potential evapotranspiration and the soil moisture tension. *Neth. Journ. Agr. Sci.* 4: 67—72, 1956.
- PENMAN H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. A*, 193: 120—145, 1948.
- PENMAN H. L. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. *Journ. of Soil Sc.* 1: 74—89, 1949.
- PENMAN H. L. The waterbalance of the Stour Catchment area. *Journ. Inst. of Water Eng.* 4: 457—469, 1950.
- PENMAN, H. L. and SCHOFIELD, R. K. Some physical aspects of assimilation and transpiration. *Symposia Soc. Exper. Biol. U*: 115—129, 1951.
- PENMAN H. L. Experiments on irrigation of sugar beet. *Neth. Journ. Agr. Sci.* 42: 286—292, 1952.
- PENMAN, H. L. The physical bases of irrigation control. Report 13th Int. Hort. Congr., 1953.
- PENMAN, H. L. Components in the waterbalance of a catchment area. *Quat. Journ. Royal Met. Soc.* 81: 280—283, 1955.
- PENMAN, H. I. Estimating evaporation, *Transact. Amer. Geophys. Un.* 37: 43—50, 1956 (a).
- PENMAN H. L. Evaporation: an introductory survey. *Neth. Journ. Agr. Sci.* 4: 9—29, 1956 (b).
- REESINCK, J. J. M. en DE VRIES, D. A. De jaarlijkse en dagelijkse gang van het daglicht in Nederland. *Med. Landbouwhogesch. Wageningen* 46: 1—24, 1942.
- RIDER, N. E. Water losses from various land surfaces. *Quat. Journ. Met. Soc.* 83: 181—193, 1957.
- STOLP, D. W. en MOHRMANN, J. C. J. Droogtekansen en beregening op hoge zandgronden. *Med. Dir. Tuinb.* 16: 363—378, 1953.
- THORNTWHAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55—94, 1948.
- VERSLAGEN 4 t/m 10 Werkcommissie voor Verdampingsonderzoek 1950 t/m 1956 (Rijkswaterstaat, Den Haag).
- VRIES, D. A. DE Solar radiation at Wageningen. *Med. Landbouwhogesch. Wageningen* 55: 277—304, 1955.
- VRIES, D. A. DE Agricultural Physics in the C.S.I.R.O. division of plant industry (Pamphlet Deniliquin, July 1957).
- WIND, G. P. The influence of nitrogen fertilizing on water consumption of grassland. Europ. grassland confer. Paris, June 1954.
- WIND, R. Lysimeters in Nederland, Rapport Hydrologische Commissie T.N.O., Den Haag, 1955.
- WIND, R. en MAKKINK G. F. De nuttige neerslag bij Nederlandse zandgronden, Verslagen Techn. Bijenk. Comm. Hydrol. Onderz. T.N.O., Den Haag (in druk).
- WIT, C. T. DE Transpiration and crop yields. *Uerslagen Landb. Onderz.* 64, 6, 1958.