

Aris Lourens

**VAN PENMAN NAAR MAKKINK**

**EEN NIEUWE BEREKENINGSWIJZE VOOR DE KLIMATOLOGISCHE  
VERDAMPINGSGETALLEN**

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Verdamping

Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen/(red. J.C. Hooghart en W.N. Lablans) – 's-Gravenhage: Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. – III. – (Rapporten en Nota's/Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; no. 19) Eindrapport van de project- en begeleidingsgroep Verdampingsberekeningen. – Ook verschenen bij: De Bilt: KNMI. – (Technische Rapporten, ISSN 0169-1708; T.R. 111). – Met lit. opg.; reg.  
ISBN 90-6743-138-9  
SISO 555.3 UDC 556.13  
Trefw.: verdamping

**COPYRIGHT © Nederlandse organisatie voor  
toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek  
TNO, 1988**

Bibliotheek  
Centraal Kantoor TNO  
's-Gravenhage  
28 SEP 1988

**VAN PENMAN NAAR MAKKINK**

**EEN NIEUWE BEREKENINGSWIJZE VOOR DE KLIMATOLOGISCHE  
VERDAMPINGSGETALLEN**



**EINDRAPPORT VAN DE PROJECT- EN BEGELEIDINGSGROEP  
VERDAMPINGSBEREKENINGEN**

**COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO – 's-Gravenhage – 1988**

**RAPPORTEN EN NOTA'S No. 19**



## INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	1
2	PENMAN- EN MAKKINKFORMULE	3
2.1	Penmanformule	3
2.1.1	Algemeen	3
2.1.2	Ontwikkeling van de Penmanformule	4
2.2	De formule van Makkink	7
2.2.1	Algemeen	7
2.2.2	Referentie-gewasverdamping volgens Makkink	8
2.3	Vergelijking tussen $E_r$ (Makkink) en $E_o$ (Penman) in het groeiseizoen	9
3	GEWASFACTOREN	15
3.1	Algemeen	15
3.2	Gewasfactoren in relatie tot de Penmanformule	16
3.3	Gewasfactoren in relatie tot de Makkinkformule	17
3.4	Bepaling van gewasfactoren	18
4.	BIJZONDERE OMSTANDIGHEDEN	23
4.1	Verdamping van oppervlaktewater	23
4.2	Berekening van de verdamping van gewassen	26
4.2.1	Discussie Penman-Monteith vergelijking	26
4.2.2	Zeer droge omstandigheden	29
4.3	Toepassing van de Makkinkformule in de winterperiode	31
4.4	Stedelijke gebieden	33
5	DE PRAKTIJK MET BETREKKING TOT DE BEREKENING EN VERSTREKKING VAN VERDAMPINGSGEGEVENS DOOR HET KNMI	35
5.1	Inleiding	35
5.2	Makkinkverdamping en referentie-gewasverdamping	36
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	39
7	LITERATUUROVERZICHT	41

BIJLAGEN

A - Lijst van de gebruikte symbolen	45
B - Samenstelling project- en begeleidingsgroep	49
Verdampingsberekeningen	
C - Overzicht van de op het KNMI berekende tijdreeksen van de verdamping volgens Penman	51
D - 1 Décadewaarden $E_o$ en $E_r$ van De Bilt voor de periode 1965 - 1985	59
2 Grafieken van 5 stations met gemiddelde decadewaarden voor $E_o$ en $E_r$ voor de periode 1965 - 1985	65
3 Grafiek met de $E_o/E_r$ -waarden voor de periode 1965 - 1985 voor De Bilt en de "gladgestreken" waarden	67

Begin 1983 heeft het Klein Comité van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO) aan de hoofddirecteur van het KNMI verzocht om over te gaan tot een nadere beschouwing van de verdampingsgetallen, zoals die al enkele tientallen jaren door het KNMI werden berekend volgens de Penmanformule. Reden tot deze nadere beschouwing was, dat er verschillende reeksen getallen in omloop waren die niet alle op dezelfde wijze waren bepaald. Eind 1983 zijn een projectgroep van het KNMI en een begeleidingsgroep "Verdampingsberekeningen" van de CHO-TNO, met de werkzaamheden van start gegaan. De groepen hebben van het begin af aan nauw samengewerkt hetgeen ook blijkt uit het onderhavige gezamenlijke rapport. De samenstelling van beide groepen is in bijlage B vermeld. De werkzaamheden resulteerden uiteindelijk in de overgang van de "Penmanformule" naar de "Makkinkformule" per 1 april 1987 voor de routinematige bepaling van de verdampingsgetallen door het KNMI.

Op 25 maart 1987 is tijdens het morgengedeelte van de 44e Technische Bijeenkomst van de CHO-TNO in Ede de overgang van de Penman- naar de Makkinkformule uitvoerig aan de orde gesteld. Van deze bijeenkomst is in 1987 een engelstalig verslag "Evaporation and weather" verschenen in de serie Verslagen en Mededelingen van de CHO-TNO als no. 39. In dat verslag zijn tevens de middaglezingen opgenomen omtrent experimenten en modellen op het gebied van de verdamping. Deze laatste onderwerpen zijn overigens niet in de project- en begeleidingsgroep Verdampingsberekeningen aan de orde geweest.

De Penmanformule bestaat uit een term waarin naast andere grootheden de netto straling voorkomt en een term die hoofdzakelijk wordt bepaald door de windsnelheid en het verzadigingsdeficiet van de lucht. Uit waarnemingen blijkt echter dat voor de verdamping van goed van water voorziene landbouwgewassen in het groeiseizoen en voor de verdamping van een wateroppervlak de stralingsterm veel belangrijker is dan de tweede term in de Penmanformule. Dit kwam tot uiting in het werk van Makkink (1957), die een goed verband vond tussen de verdamping van grasland en de inkomende kortgolvlige straling. Ook Priestley en Taylor (1972) stelden een formule op waarin de verdamping van een wateroppervlak lineair afhangt van de (netto) straling. De formules van Penman, Makkink en Priestley-Taylor komen in hoofdstuk 2 aan de orde.

De routinematig bepaalde verdampingsgetallen worden vaak toegepast voor het schatten van de verdamping van gewassen, met behulp van de zogenaamde gewasfactoren-methode. Deze methode wordt in hoofdstuk 3 behandeld. De verdamping vanuit oppervlaktewater en de verdamping onder bijzondere omstandigheden, zoals in droge perioden en in de winter worden in hoofdstuk 4 behandeld. De praktijk van de berekening en de verstrekking van de verdampingsgetallen komen in hoofdstuk 5 aan de orde. In hoofdstuk 6 worden conclusies en aanbevelingen gegeven. In hoofdstuk 7 is de literatuur vermeld waarnaar in de tekst wordt verwezen.

De bijlagen omvatten:

- A Lijst van de gebruikte symbolen.
- B Samenstelling van de project- en begeleidingsgroep  
Verdampingsberekeningen.
- C Overzicht van de op het KNMI berekende tijdreeksen van de verdamping volgens Penman.
- D - 1 Decadewaarden  $E_o$  en  $E_r$  van De Bilt voor de periode 1965 - 1985.  
- 2 Grafieken van 5 stations met gemiddelde decadewaarden voor  $E_o$  en  $E_r$  voor de periode 1965 - 1985.  
- 3 Grafiek met de  $E_o/E_r$ -waarden voor de periode 1965 - 1985 voor De Bilt en de "gladgestreken" waarden.

De project- en begeleidingsgroep is veel dank verschuldigd aan de heer C. Hofman (KNMI), die de benodigde verdampingsgegevens voor bewerking toegankelijk heeft gemaakt en de in het rapport gepresenteerde berekeningen heeft uitgevoerd.



## 2 PENMAN- EN MAKKINKFORMULE

### 2.1 Penmanformule

#### 2.1.1 Algemeen

Van 1956 tot 1 april 1987 verstrekke het KNMI routinematig verdampingsgetallen die zijn berekend met de Penmanformule. Deze grootheid wordt veelal de "open waterverdamping" ( $E_0$ ) genoemd. In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van de Penmanformule: de fysische uitgangspunten waarop deze is gebaseerd, de toepassingen en de beperkingen. Er wordt aangetoond dat ondanks het feit dat de Penmanformule is gebaseerd op fysische grondslagen, de toepassingen voornamelijk empirisch zijn. In Nederland houden de meeste toepassingen verband met de zogenaamde gewasfactoren-methode. Hierbij wordt het door het KNMI verstrekke verdampingsgetal vermenigvuldigd met een geschikte gewasfactor. Op deze wijze wordt onder de optredende weersomstandigheden een schatting verkregen van de potentiële verdamping van een gewas, dat is de verdamping van gewaspercelen die van voldoende water zijn voorzien.

Om allerlei theoretische en praktische redenen zijn in binnen- en buitenland in de loop der tijd vele modificaties van de Penmanformule toegepast. Dit betreft bijvoorbeeld de schattingschema's voor de (netto en globale) straling en de invloed van de wind. Delen van de Penmanformule werden vanuit een fysisch standpunt verbeterd. Helaas betekenden deze verbeteringen niet altijd een verbetering in de toepassingssfeer. Voorbeelden zijn bekend dat na introductie van een "verbetering" de uiteindelijke resultaten slechter waren dan met de oorspronkelijke methode werden verkregen. Dit kwam doordat in de oorspronkelijke aanpak een aantal fouten tegen elkaar wegvielen. In de loop van de jaren heeft het KNMI de wijze waarop  $E_0$  werd bepaald, om praktische redenen, enkele malen veranderd (De Bruin, 1979; Lablans, 1987). Daarbij werden o.a. correctietermen bepaald om inhomogeniteiten in de  $E_0$ -reeksen te vermijden.

Het resultaat van de beschreven ontwikkelingen is dat in en buiten het KNMI de Penmanformule in de laatste tientallen jaren niet steeds op dezelfde wijze is toegepast. Dit veroorzaakte veel verwarring, vooral

bij de gebruikers van de gegevens die veelal niet op de hoogte waren van deze ontwikkelingen.

### 2.1.2 Ontwikkeling van de Penmanformule

De overgang aan het aardoppervlak van water van de vloeibare naar de dampfase is een ingewikkeld proces waarbij zowel meteorologische factoren als eigenschappen van het aardoppervlak en de vegetatie een rol spelen.

In 1948 combineerde Penman Dalton's vergelijking voor de verdamping met de energiebalansvergelijking van het aardoppervlak. Hij beschouwde het geval dat de lucht aan het oppervlak verzadigd is en benaderde de verzadigingsdampdruk aan het oppervlak  $e_s(T_o)$  door  $e_s(T_a) + s(T_o - T_a)$ , waarbij:

$e_s$	= verzadigingsdampdruk	(mbar)
$s$	= helling van de verzadigingsdampdrukcurve	(mbar.K <sup>-1</sup> )
$T_a$	= heersende temperatuur op waarnemingshoogte	(K)
$T_o$	= temperatuur aan het aardoppervlak	(K)

Zo ontstond de formule die er, in de in dit rapport gebezigde notatie, aldus uitziet:

$$\lambda E = \frac{s(Q^* - G) + \rho_a c_p [e_s(T_a) - e_a] / r_a}{s + \gamma} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1)$$

waarin:

$\lambda$	= specifieke verdampingswarmte van water	(J.kg <sup>-1</sup> )
$E$	= evapotranspiratie	(kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )
$Q^*$	= netto stralingsstroombichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$G$	= bodemwarmte stroombichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$\rho_a$	= dichtheid van lucht op waarnemingshoogte	(kg.m <sup>-3</sup> )
$c_p$	= specifieke warmte per eenheid massa van de lucht bij constante druk	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$r_a$	= aerodynamische weerstand voor waterdamptransport	(s.m <sup>-1</sup> )
$\gamma$	= psychrometerconstante	(mbar.K <sup>-1</sup> )
$e_a$	= dampdruk bij temperatuur $T_a$	(mbar)

In veel publikaties wordt in de Penmanformule  $r_a$  benaderd door een functie van de windsnelheid. De vergelijking wordt dan geschreven als:

$$\lambda E = \frac{s(Q^* - G) + \gamma \lambda E_a}{s + \gamma} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (2)$$

waarin:

$$\lambda E_a = f(u) (e_s(T_a) - e_a) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (3)$$

en  $f(u)$  is een functie van de windsnelheid op 2 m hoogte. Beschouwing van verg. (1), (2) en (3) leert dat  $r_a$  kan worden geschreven als:

$$r_a = \frac{\rho C_p}{\gamma f(u)} \quad (\text{s.m}^{-1}) \quad (4)$$

Penman veronderstelde dat het aardoppervlak en de atmosfeer in horizontale richting homogeen zijn, zodat effecten ten gevolge van advectie konden worden verwaarloosd. Verg. (1) geldt zowel voor open water als voor een nat grond/bladoppervlak, maar de grootheden  $Q^*$ ,  $G$  en  $r_a$  hangen sterk af van de aard van het oppervlak.

Penman (1948) ontwikkelde zijn formule in eerste instantie om de verdamping uit verdampingspannen te beschrijven, die opgesteld waren in Zuid Engeland (Rothamsted). Hij gebruikte parameters die behoorden bij die situatie. Dit geldt in het bijzonder voor de windfunctie, die de afhankelijkheid van de aerodynamische weerstand  $r_a$  van de windsnelheid beschrijft. De originele Penmanformule is dus gebaseerd zowel op fysische grondslagen als op empirische relaties.

Penman was één van de eersten die het belang van de (netto) straling voor het verdampingsproces onderkende. In de veertiger jaren bestonden er evenwel nauwelijks directe metingen van netto straling; Penman moest de netto straling ( $Q^*$ ) daarom schatten met behulp van semi-empirische relaties. Het is dan ook niet verbazingwekkend dat later werd aangetoond dat de schattingsmethode van Penman voor  $Q^*$  verbeterd kon worden. Voor meer details zie Holtslag (1987).

Voor bepaalde toepassingen, in het bijzonder voor de verdampingsspannen, verwaarloosde Penman de term G. Dit gaf voor zijn verdampingspan geen grote afwijkingen. Aanzienlijke fouten kunnen echter worden gemaakt indien G wordt verwaarloosd bij diepe meren en rivieren.

Voor het schatten van de verdamping van oppervlakken van zeer uiteenlopende aard wordt vaak als eerste stap de berekening uitgevoerd voor een **hypothetisch wateroppervlak zonder warmteberging**. Dit rekenresultaat wordt de "open waterverdamping"  $E_o$  genoemd en de vergelijking 2 gaat dan over in:

$$\lambda E_o = \frac{sQ_w^* + \gamma \lambda E_a}{s + \gamma} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (5)$$

waarin:

$Q_w^*$  = de netto stralingsstroomdichtheid van een  
hypothetisch wateroppervlak ( $\text{W.m}^{-2}$ )

In Bijlage C worden de  $E_o$ -reeksen, berekend door het KNMI, nog nader behandeld.

Bij een bepaalde toepassing, zoals bijvoorbeeld de bepaling van de potentiële verdamping van gewassen, dient men te beschikken over empirische relaties over het verband tussen  $E_o$  en het gezochte verdampingsgetal.

Met het bovenstaande zijn enkele paradoxaal aandoende verschijnselen te verklaren, die aanleiding tot verwarring hebben gegeven.

- De "open waterverdamping"  $E_o$  is vaak geen goede maat voor de **verdamping van oppervlaktewater**. In het bijzonder voor dieper oppervlaktewater is de warmteberging van groot belang; de waarden voor G kunnen die voor  $Q^*$  zelfs overtreffen.
- Het gebruik van eigenschappen van een wateroppervlak, zoals bijvoorbeeld de reflectiecoëfficiënt, bij de berekening van de verdamping van droge (gewas)oppervlakken.

## 2.2 De formule van Makkink

### 2.2.1 Algemeen

Uit veldproeven is gebleken dat de verdamping van goed van water voorziene landbouwgewassen nauw samenhangt met de netto straling. Hiervan uitgaande stelden Priestley en Taylor (1972) de volgende formule op:

$$\lambda E = \alpha \frac{s}{s + \gamma} (Q^* - G) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (6)$$

waarin  $\alpha$  een coëfficiënt is met een waarde van ongeveer 1,2 - 1,3.

Voor grasland is  $G$  in het algemeen klein (zie o.a. De Bruin en Holtslag, 1982). Tijdens het groeiseizoen blijkt voor gras in Nederland dat de netto straling ongeveer 0,5 maal de inkomende kortgolvlige straling te zijn. Voor grasland, dat goed van water is voorzien, bracht Makkink dit in 1957 tot de opstelling van de volgende formule:

$$\lambda E = C_1 \frac{s}{s + \gamma} K^\downarrow + C_2 \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (7)$$

waarin:

$K^\downarrow$  = globale stralingsstroomdichtheid ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$C_1$  en  $C_2$  = constanten

Op het eerste gezicht lijken de verg. (6) en (7) zuiver empirisch. Uit recent onderzoek is evenwel gebleken dat ook op fysische gronden kan worden ingezien dat met deze relatief eenvoudige formules verdampingsgegevens worden verkregen die ongeveer gelijkwaardig zijn aan de Penman-getallen. Dit houdt verband met de onderlinge afhankelijkheid van de meteorologische grootheden die invloed hebben op de verdamping. Een gedetailleerde bespreking van dit onderwerp zou hier te ver voeren. Verwezen wordt naar de publikatie van De Bruin en Holtslag (1987). Hier wordt de conclusie overgenomen, namelijk dat de evapotranspiratie van een goed van water voorzien kort gewas hoofdzakelijk wordt bepaald door

de netto straling en de luchttemperatuur. De laatste komt tot uiting via de grootheden  $s$ ,  $\gamma$  en  $\lambda$ . Met factoren zoals verzadigingsdeficiet en de windsnelheid blijkt de verdamping minder strak verband te houden. (Het gemiddelde effect van deze factoren komt tot uiting in de empirische constanten). Dit betekent dat de formules van Priestley-Taylor en van Makkink onder "potentiële" omstandigheden de evapotranspiratie van gras redelijk goed beschrijven. Beide formules kunnen dus dienen als een alternatieve berekeningsmethode voor het  $E_o$ -getal van het KNMI. Rekening houdend met de eisen die aan een nieuw verdampingsgetal moeten worden gesteld (zie 5.2), is besloten om een vereenvoudigde vorm van de formule van Makkink te kiezen; deze heeft als invoer alleen de **globale straling** en **luchttemperatuur** nodig, welke variabelen in Nederland tegenwoordig op een voldoende aantal stations routinematig direct worden waargenomen. Er is niet voor de Priestley-Taylor formule gekozen, omdat daarvoor de netto straling,  $Q^*$ , nodig is. Deze grootheid wordt niet direct gemeten en de bestaande semi-empirische bepalingmethoden van  $Q^*$  vereisen veel invoergegevens en bevatten diverse empirische constanten, die nog niet nauwkeurig bekend zijn.

#### 2.2.2 Referentie-gewasverdamping volgens Makkink

Gezien hetgeen in de voorgaande paragraaf is besproken is uiteindelijk besloten de zogeheten referentie-gewasverdamping  $E_r$  in te voeren. Deze is als volgt gedefinieerd:

$$E_r = C \frac{s}{s + \gamma} \frac{K^\dagger}{\lambda} \quad (\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \quad (8)$$

waarin de constante  $C = 0,65$ .

$E_r$  wordt geïntroduceerd om het  $E_o$ -cijfer van het KNMI te vervangen. De toepassing van  $E_r$  in relatie met gewasfactoren wordt in hoofdstuk 3 behandeld.

Makkink (1957, 1961) stelde een formule met twee constanten voor, zie verg. (7). Opgemerkt wordt dat de keuze t.a.v. het gebruik van  $C$  of van  $C_1$  en  $C_2$  arbitrair is. De veranderingen in de constante(n) werken direct

door in de gewasfactoren. Verg. (8) met één constante  $C = 0,65$  blijkt de evapotranspiratie van gras goed te beschrijven (De Bruin, 1981; Keijman, 1982) terwijl deze ook goed aansluit bij de resultaten gepresenteerd door Makkink en Van Heemst (1967). De gewasfactoren behorende bij  $E_r$  (hoofdstuk 3) zijn gebaseerd op verg. (8) (Feddes, 1987).

### 2.3 Vergelijking tussen $E_r$ (Makkink) en $E_o$ (Penman) in het groeiseizoen

Ter vergelijking van het nieuwe verdampingsgetal,  $E_r$ , en het oude getal,  $E_o$ , zijn de gegevens geanalyseerd van 1965 tot en met 1985. Dit is de langste periode waarover de vereiste meteorologische invoergegevens beschikbaar zijn. De lengte van de periode wordt hoofdzakelijk bepaald door het feit dat het KNMI in Nederland in 1965 is begonnen met (routine)waarnemingen van de globale straling op verschillende stations. Dit waren de stations De Bilt, Eelde, Beek, Den Helder/De Kooy en Vlissingen (zie tabel 1). Voor slechts twee stations in Nederland, Wageningen en De Bilt, bestaan langere reeksen van  $K^\downarrow$ .

Voor deze 5 stations zijn per decade<sup>1)</sup>  $E_r$  en  $E_o$  beschouwd,  $E_r$  berekend met verg.(8) en  $E_o$  berekend volgens de KNMI-procedure zoals beschreven door De Bruin (1979) en Buishand en Velds (1980). De decadesommen zijn afgerond op hele mm.

Als vergelijkingsmethode is allereerst lineaire regressie toegepast en wel voor de decadesommen voor april tot en met september, het "groeiseizoen", voor elk station afzonderlijk. Elk groeiseizoen bestaat uit 18 decades, dus voor elke berekening (21 jaren) zijn 378 paar decadesommen geanalyseerd. De resultaten zijn in tabel 1 weergegeven.

1) Een decade wordt als volgt gedefinieerd: van de 1<sup>e</sup> t/m 10<sup>e</sup>, de 11<sup>e</sup> t/m 20<sup>e</sup> en de 21<sup>e</sup> t/m einde van de maand. De derde decade bestaat dus, afhankelijk van de maand, uit 8, 9, 10 of 11 dagen.

Tabel 1

Gemiddelde decadesommen (1965 - 1985) van de verdamping in het  
 groeiseizoen (april-september) volgens Makkink ( $E_r$ ) en Penman ( $E_o$ ), voor  
 5 hoofdstations van het KNMI en het gemiddelde van de 3 landstations

Station	Makkink	Penman	Mak/Pen	Pen/Mak	A''	A'	B	R	$s_e$
	(mm/dec)	(mm/dec)	-	-	-	-	(mm/dec)	-	(mm/dec)
De Bilt (260)	24.25	30.82	0.787	1.271	0.786	0.776	0.32	0.962	2.09
Eelde (280)	24.42	30.20	0.809	1.237	0.806	0.776	1.00	0.961	2.16
Beek (308)	24.61	31.54	0.780	1.282	0.781	0.791	- 0.35	0.955	2.31
Den Helder/De Kooij (235)	26.34	32.73	0.805	1.243	0.805	0.802	0.09	0.951	2.43
Vlissingen (310)	26.0	33.53	0.776	1.290	0.776	0.781	- 0.19	0.948	2.42
3 landstations	24.43	30.85	0.792	1.263	0.791	0.782	0.29	0.965	1.99

In tabel 1 staan van  $E_r$  en  $E_o$  de gemiddelde waarden van de decadesommen  
 aangegeven, hun verhoudingen, de regressieconstanten van respectievelijk  
 $E_r = A''E_o$  en  $E_r = A'E_o + B$ , de correlatiecoëfficiënt R en de  
 standaardfouten  $s_e$ , hier gedefinieerd als:

$$s_e = [(E_r - A''E_o)^2]^{1/2}$$

Het blijkt dat het intercept B voor geen van de stations significant  
 afwijkt van nul. Het regressiemodel  $E_r = A''E_o$  is een geschikte  
 beschrijving voor deze gegevens. Uit het resultaat weergegeven in tabel  
 1 kan worden geconcludeerd dat de correlatie tussen de decadesommen van  
 $E_r$  en  $E_o$  hoog is.

Den Helder/De Kooy en Vlissingen liggen dichtbij de kust. Daar het hier  
 landbouwkundige toepassingen betreft en het lokale klimaat in een smalle  
 strook langs de kust aanzienlijk afwijkt van het binnenland, is besloten  
 om de data van deze twee kuststations niet bij de verdere analyse te  
 betrekken.



De regressietechniek, zoals hierboven beschreven, is vervolgens toegepast voor het rekenkundig gemiddelde van de decadesommen van  $E_r$  en  $E_o$  voor de drie landstations.

Geconcludeerd kan worden dat, vergeleken met de gemiddelde waarde van 0.791, de regressieconstante A" een ruimtelijke variabiliteit vertoont van minder dan 2%. Rekening houdend met het feit dat de gewasfactoren-methode, waarvoor  $E_r$  is bedoeld, vrij grof is, kan dit uit praktische overwegingen worden verwaarloosd. Verdere analyses tonen aan dat de constante A" een seizoensvariatie vertoont. Dit is gebleken bij de lineaire regressie van de gemiddelde decadesommen van de drie landstations voor iedere maand apart.

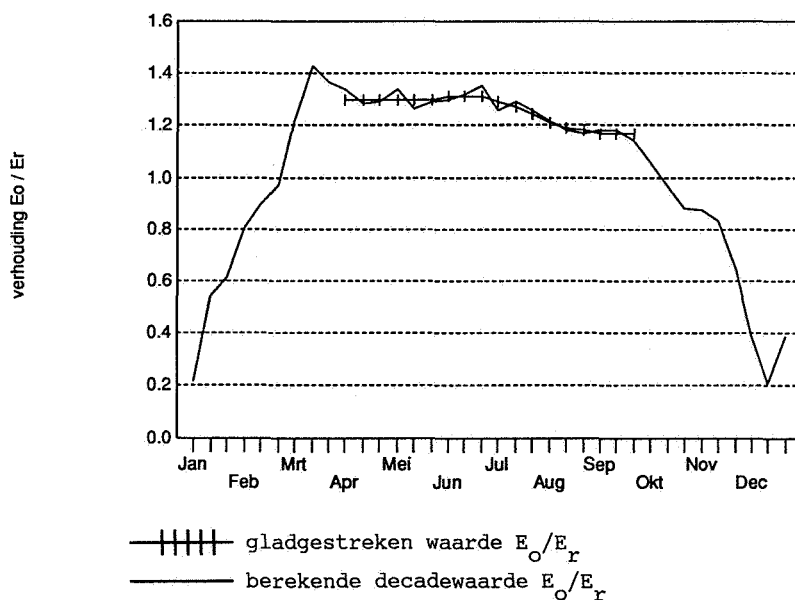
Tabel 2

Vergelijking tussen Penman en Makkink voor april t/m september; gemiddelde waarden van drie landstations over de periode 1965 t/m 1985 per decade. Ook de gladgestreken waarden van Penman/Makkink ( $E_o/E_r$ ) per decade worden gegeven. R = correlatiecoëfficiënt.

3 landstations	$E_r$ (mm decade <sup>-1</sup> )	$E_o$ (mm decade <sup>-1</sup> )	$E_o/E_r$ -	Decade	Gladgestreken waarde	R
april	17.78	23.16	1.30	I	1.30	0.945
				II	1.30	
				III	1.30	
mei	26.44	34.29	1.30	I	1.30	0.971
				II	1.30	
				III	1.30	
juni	29.43	38.93	1.32	I	1.31	0.97
				II	1.31	
				III	1.31	
juli	29.81	37.79	1.27	I	1.29	0.971
				II	1.27	
				III	1.24	
augustus	26.47	31.49	1.19	I	1.21	0.948
				II	1.19	
				III	1.18	
september	16.62	19.45	1.17	I	1.17	0.867
				II	1.17	
				III	1.17	

In dit geval betreft elke berekening  $3 \times 21 = 63$  paren van  $E_r$  en  $E_o$ . In tabel 2 worden de resultaten gegeven. Hierbij worden de gemiddelde waarden en hun verhoudingen gegeven evenals de correlatiecoëfficiënten. Vastgesteld kan worden dat de verhouding  $E_o/E_r$ , die nodig is voor de bepaling van de nieuwe gewasfactoren (Feddes, 1987) maandafhankelijk is. De verhouding neemt aanzienlijk af in augustus en september.

Voor de berekening van nieuwe gewasfactoren moet de verhouding  $E_o/E_r$  bekend zijn voor iedere decade in de periode april tot en met september. Het blijkt dat de direct bepaalde waarden van  $E_o/E_r$  per decade te veel spreiding vertonen. Klaarblijkelijk is een periode van 21 jaar te kort voor stabiele waarden. Daarom is besloten om met "de hand" de decadewaarden glad te strijken (zie fig. 1). De maandwaarden en de gladgestreken decadewaarden zijn in tabel 2 weergegeven. Deze afgeleide decadewaarden waarden van  $E_o/E_r$  (zie tabel 2 en 4) zijn gebruikt door Feddes (1987) om de gewasfactoren te bepalen die bij de verdampingsgetallen behoren zoals die berekend zijn met de Makkinkformule (z.g. nieuwe gewasfactoren). Onderkend wordt dat de bepaling van de "gladgestreken" waarden van  $E_o/E_r$  per decade tamelijk subjectief is en dat het gemiddelden zijn van een populatie gemiddelde, droge en natte jaren, welke jaren zeker niet homogeen zijn verdeeld.



Figuur 1 Berekende en gladgestreken decadewaarden van  $E_o/E_r$  voor het gemiddelde van de stations De Bilt, Eelde en Beek

In Bijlage D worden decadewaarden gegeven voor  $E_o$  en  $E_r$  van De Bilt voor de periode 1965-1985. Tevens worden grafieken gegeven van 5 stations van gemiddelde decadewaarden voor  $E_o$  en  $E_r$  voor de periode 1965-1985.



### 3 GEWASFACTOREN

#### 3.1 Algemeen

De werkelijke verdamping van een begroeid oppervlak (evapotranspiratie),  $E$ , kan worden beschouwd als de som van de verdamping van het interceptiewater,  $E_i$ , de verdamping van de bodem,  $E_s$ , en de transpiratie via de huidmondjes en cuticula van een droog bladoppervlak van een gewas,  $E_t$ :

$$E = E_i + E_s + E_t \quad (9)$$

Als onder de heersende meteorologische omstandigheden voldoende water aanwezig is voor evapotranspiratie (en als de meteorologische omstandigheden niet veranderen tengevolge van het verdampingsproces zelf) treedt de maximale verdamping op. Onder de omstandigheden dat zowel het **bladoppervlak als de bodem vochtig** zijn, ziet verg. (9) er als volgt uit:

$$E_{\max} = E_i + E_{sp} + E_{tp} \quad (10)$$

waar  $E_{\max}$  is de grootst mogelijke verdamping van een begroeid oppervlak,  $E_{sp}$  is de potentiële bodemverdamping en  $E_{tp}$  de potentiële transpiratie. Voor grote uniforme velden is de advectie verwaarloosbaar klein. De grootte van de maximaal mogelijke evapotranspiratie hangt dan af van de meteorologische omstandigheden (zoals straling, luchttemperatuur, windsnelheid en waterdampdruk) en van het soort en de structuur van het gewas.

Indien het **gewasoppervlak droog** is, dan is de interceptieverdamping  $E_i = 0$ . Indien de **watervoorziening** zowel van de wortels als van het grondoppervlak nog steeds **optimaal** is, neemt de maximale evapotranspiratie af tot de potentiële evapotranspiratie,  $E_p (=E_{\max} - E_i)$ , volgens:

$$E_p = E_{sp} + E_{tp} \quad (11)$$

Tijdens perioden met en zonder regen, kan de maximaal mogelijke evapotranspiratie theoretisch worden benaderd, zie 4.2.1.

### 3.2 Gewasfactoren in relatie tot de Penmanformule

Om op een eenvoudige manier van een bepaald droog gewas de potentiële evapotranspiratie,  $E_p$ , te berekenen kan men deze grootheid meestal empirisch afleiden van de verdamping van een hypothetisch dunne laag water, vaak 'open water verdamping',  $E_o$  genoemd.  $E_p$  is eenvoudig te berekenen uit  $E_o$ , met behulp van een gewasfactor,  $g$ , volgens:

$$E_p = g E_o \quad (\text{mm.d}^{-1}) \quad (12)$$

waarbij  $E_o$  is berekend volgens Penman (1948) volgens verg. (5).

In tabel 3 worden de gewasfactoren gegeven zoals die werden gebruikt in de landbouw, in combinatie met  $E_o$ , berekend volgens de KNMI-rekenwijze.

Tabel 3

Decadewaarden voor de gewasfactoren  $g$  behorende bij de open water verdamping  $E_o$  (Penman) volgens de Werkgroep Landbouwkundige Aspecten (1984)

Maand	april			mei			juni			juli			augustus			september		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Gras	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Granen	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	-	-	-	-	-
Mais	-	-	-	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Aardappelen	-	-	-	-	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	-	-
Suikerbieten	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
Peulvruchten	-	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	-	-	-	-	-	-	-
Plantui	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	-	-
Zaaiui	-	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	-	-
Witlof	-	-	-	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Winterpeen	-	-	-	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Knoiselderij	-	-	-	-	-	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	-
Prei	-	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Bol/knolgewassen	-	-	-	-	0.4	0.5	0.5	0.7	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pit/steenvruchten (volgroeid)	0.8	0.8	0.8	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0

### 3.3 Gewasfactoren in relatie tot de Makkinkformule

In plaats van de verdamping van een hypotetisch wateroppervlak (de volgens Penman berekende  $E_o$ ), kan men als maat voor de potentiële gewasverdamping ook de verdamping van een referentiegewas nemen. Overeenkomstig vergelijking (12) kan men dan formuleren:

$$E_p = f E_r \quad (\text{mm.d}^{-1}) \quad (13)$$

waarin  $f$  de nieuwe gewasfactor voor het betreffende gewas is en  $E_r$  de evapotranspiratie van het referentiegewas volgens Makkink berekend met verg. (8).

De nieuwe gewasfactoren  $f$  kunnen worden afgeleid uit de oude gewasfactoren  $g$  door de rechter termen van de vergelijkingen (13) en (12) aan elkaar gelijk te stellen:

$$f E_r = g E_o \quad \text{of} \quad f = \frac{E_o}{E_r} g \quad (14)$$

De vermenigvuldigingsfactoren  $E_o/E_r$  zijn berekend voor de maandwaarden van het groeiseizoen voor de meteostations De Bilt, Eelde en Beek (tabel 2). De hiervan afgeleide geïnterpoleerde waarden per decade zijn nogmaals weergegeven in tabel 4. Door de  $E_o/E_r$ -waarden uit tabel 4 te vermenigvuldigen met de gewasfactoren  $g$  van tabel 3, worden de nieuwe gewasfactoren  $f$  verkregen. Deze zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 4

De gladgestreken verhouding  $E_o/E_r$  voor decaden van het groeiseizoen als gemiddelde over de periode 1965-1985 voor De Bilt, Eelde en Beek (naar De Bruin, 1987)

april			mei			juni			juli			augustus			september		
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.31	1.31	1.31	1.29	1.27	1.24	1.21	1.19	1.18	1.17	1.17	1.17

Tabel 5

Decadewaarden voor de gewasfactoren  $f$  behorende bij de referentie-gewasverdamping  $E_r$

Maand	april			mei			juni			juli			augustus			september		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Gras	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Granen	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	0.6	-	-	-	-	-
Mais	-	-	-	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Aardappelen	-	-	-	-	0.7	0.9	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.7	-
Suikerbieten	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
Peulvruchten	-	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0.8	-	-	-	-	-	-	-
Plantui	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Zaaiui	-	0.4	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	-	-
Witlof	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Winterpeen	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Knolselderij	-	-	-	-	-	0.5	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	-
Pref	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Bol/krolegewassen	-	-	-	-	0.5	0.7	0.7	0.9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Pit/steenvruchten (volgroeid)	1.0	1.0	1.0	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2

De gewasfactoren  $f$  voor gras in tabel 5 behoren bij gras met een hoogte van 5 - 15 cm. Voor grashoogten van 15 - 25 cm moet, voor de maanden april t/m juli,  $f = 1,1$  worden genomen en voor augustus t/m september,  $f = 1,0$ . Voor grashoogten groter dan 25 cm is voor april t/m juni  $f = 1,2$  en voor juli t/m september  $f = 1,1$ .

### 3.4 Bepaling van gewasfactoren

Gewasfactoren zoals gegeven in de tabellen 3 en 5 worden meestal afgeleid uit waterbalansonderzoekingen, met name uit berekeningsexperimenten, waarbij steeds zoveel water wordt toegevoegd dat potentiële verdamping optreedt.

De waterbalans van de grond kan worden berekend met de uit een bodemcompartiment inkomende en uitgaande fluxen. Dit compartiment kan bijvoorbeeld de wortelzone, het bodemprofiel over een diepte van 150 cm, of zelfs een homogene laag van slechts 10 cm dikte zijn. Bij berekeningsproeven beschouwt men vaak alleen de waterbalans van de wortelzone. De verandering van de watervoorraad met de tijd ( $\Delta V_r / \Delta t$ ) is



gelijk aan de infiltratie (F), plus de netto opwaartse stroming door de onderrand van de wortelzone ( $Q_r$ ), minus het waterverlies uit de wortelzone door evapotranspiratie (E):

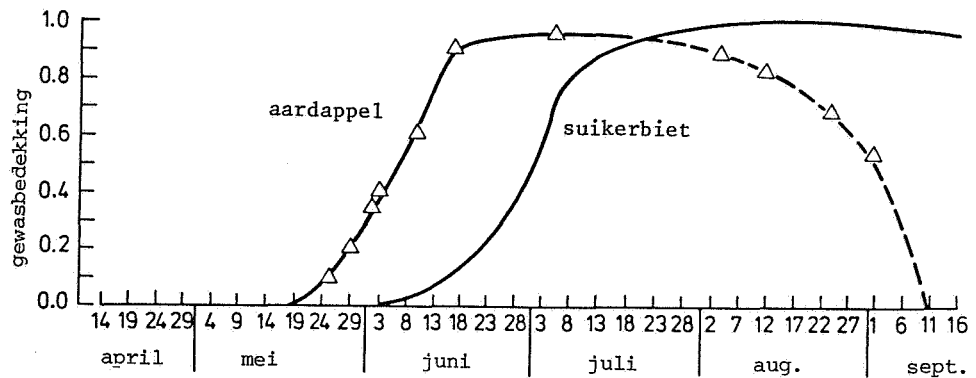
$$\frac{\Delta V_r}{\Delta t} = F + Q_r - E$$

of

$$E = F + Q_r - \frac{\Delta V_r}{\Delta t} \quad (\text{mm.d}^{-1}) \quad (15)$$

Het probleem van verg. (15) is dat het moeilijk is om  $Q_r$  te bepalen. Deze stroming is het resultaat van de capillaire opstijging minus de percolatie. Vaak laat men de capillaire opstijging buiten beschouwing; het water dat uit de wortelzone percoleert is dan eenvoudigweg een verlies. Bij de aanwezigheid van een grondwaterspiegel, die van invloed is op de bodemvochtomstandigheden in de wortelzone, kan verg. (15) niet worden gebruikt. Men moet dan in detail rekening houden met het watertransport beneden de wortelzone. Alle fouten in het bepalen van F,  $Q_r$  en  $\Delta V_r$  zullen doorwerken in de grootte van E. Mede daarom zijn de gewasfactoren, zoals die in tabel 3 en 5 zijn vermeld, gemiddelden afgeleid voor perioden van 7 tot 14 dagen en mogelijk met aanzienlijke fouten behept.

Een ander aspect waarmee rekening moet worden gehouden is het verloop van de gewasbedekking over de tijd. Voor optimaal beregende velden met aardappels en suikerbieten wordt in fig. 2 een voorbeeld gegeven. De ontwikkeling van de gewasbedekking varieert per soort gewas en zal ook van jaar tot jaar verschillen. De variatie van de gewasfactoren in de tijd is dus niet steeds gelijk en de gewasfactoren in de tabellen 3 en 5 geven dan ook een gemiddeld verloop weer.



Figuur 2 De variatie van de gewasbedekking voor aardappelen tijdens het groeiseizoen van 1981 en van suikerbieten gedurende het groeiseizoen van 1983 op optimaal beregende proefvelden op de Sinderhoeve, Renkum

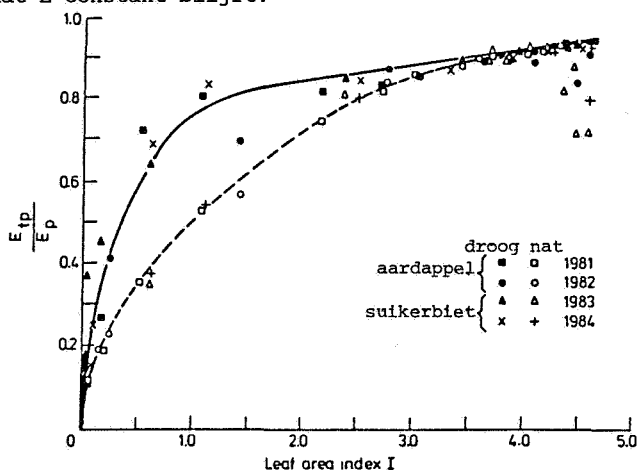
Een aspect bij beregende proefvelden waar ook rekening mee moet worden gehouden is dat gedurende de meeste tijd het grondoppervlak droog is, terwijl het gewas nog steeds goed van water is voorzien. Dan verandert verg. (10) in:

$$E_{\max} = E_i + E_s + E_{tp} \quad (16)$$

waarin  $E_s$  dus de werkelijke bodemverdamping is. Hoe droger de periode, hoe kleiner de hoeveelheid ( $E_i + E_s$ ) is. Verg.(16) beschrijft dus de praktische situatie die vaak in het veld wordt aangetroffen.

Op gronden met een gedeeltelijke bodembedekking, zoals bij grove gewassen aan het begin van hun groeiseizoen, heeft de vochttoestand van de bodem een aanzienlijke invloed op de verdeling van  $E$  over  $E_s$  en  $E_{tp}$ . Figuur 3 geeft een indruk van de relatie tussen de berekende  $E_{tp}/E_p$  waarde en de ontwikkeling van het bladoppervlak uitgedrukt als "leaf area"-index ( $I$ ). De "leaf area"-index geeft de verhouding weer van het totale bladoppervlak en het bodemoppervlak.  $I$  varieert dus per jaar, maar ook per gewas. De lijnen in fig. 3 gelden voor aardappels en bieten respectievelijk voor een droge en een natte grond. Aannemende dat  $E_p (=$

$E_{\max} - E_i$ ) onder droge en natte bodemomstandigheden gelijk is, blijkt dat voor  $I < 1$  bij toenemende droging van de grond (en dus afname van  $E_s$ ),  $E_{tp}$  zal toenemen met een factor 1,5 tot 2. Voor  $I$  groter dan 2 - 2,5 is  $E$  bijna onafhankelijk van de toestand van het grondoppervlak. Dit resultaat stemt overeen met bevindingen van Feddes (1971). Deze vond dat, voor rode kool, de grond voor ongeveer 70 tot 80% ( $I=2$ ) bedekt moet zijn voordat  $E$  constant blijft.



Figuur 3 De verhouding van  $E_{tp}/E_p$  als functie van de leaf area-index,  $I$ , voor een natte resp. een droge grond.

Figuur 3 toont aan dat het tamelijk moeilijk is om aan de hand van de gewasontwikkeling de evapotranspiratie te schatten. Daarom moeten voor  $I < 2$  de gewasfactoren van de tabellen 3 en 5 als gemiddelde waarden worden beschouwd.

Voor gras met een hoogte van 5 - 15 cm voldoet een  $g$ -waarde van 0.8. Deze waarde is gebaseerd op de gegevens van de Werkcommissie voor verdampingsonderzoek (1984). Zij rapporteren op basis van 11 jaar lysimeterproeven voor perioden met een lage evapotranspiratie (80% overschrijdingskans) een gemiddelde  $g$ -waarde van 0.73; voor perioden met een hoge evapotranspiratie (10% overschrijdingskans) wordt een gemiddelde  $g$ -waarde van 0,77 gegeven, terwijl als gemiddelde een gemiddelde  $g$  van 0,75 (afgerond 0,8) wordt genoemd. Hierbij moet men zich realiseren dat in waterbalansstudies de neerslag vaak wordt onderschat als gevolg van de invloed van de wind op de regenmeter. De hierdoor ontstane fout heeft tot gevolg dat  $g$  wordt onderschat. Ook is  $g$

afhankelijk van de invloed van meteorologische factoren (zie bijvoorbeeld Romijn, 1985).

Van Boheemen et al. (1986) voerden berekeningen uit voor gras van 5 - 15 cm lengte onder gebruikmaking van vergelijkingen zoals in par. 4.2.1; zij vonden een overall g-waarde van 0,8. Overeenkomstige berekeningen voor gras van 15 - 25 cm lengte leveren een g-waarde van 0,85 op en voor grashoogten groter dan 25 cm een g-waarde van 0,9.

De gewasfactoren voor aardappelen en suikerbieten van tabel 3 zijn afgeleid uit redelijk nauwkeurige waterbalansmetingen op de Sinderhoeve van 1981 - 1984 waarbij gebruik werd gemaakt van beregeningsinstallaties (zie Hellings et al., 1982).

De gewasfactoren voor maïs worden nog nader onderzocht op basis van nauwkeurige bodemvochtbalansen en micrometeorologische gegevens. De benodigde metingen hebben plaats gevonden op hetzelfde veld in de jaren 1985 en 1986.

Opgemerkt moet worden dat de gewasfactoren van tabel 3 en dus ook van tabel 5 afgeleid zijn voor velden onder verschillende omstandigheden en een verschillend landbouwkundig gebruik. De lokale effecten betreffen: verschillen in grootte van de velden, in advectie, in irrigatie en landbouwkundig gebruik, klimatologische variaties in de tijd, afstand en hoogte, en de beschikbaarheid van bodemvocht.

Alle opmerkingen die gelden ten aanzien van de betrouwbaarheid van de gewasfactoren g van tabel 3 gelden ook voor de gewasfactoren f van tabel 5. Men dient dus altijd voorzichtig te zijn bij het toepassen van gewasfactoren. Deze mogen niet beschouwd worden als absoluut betrouwbaar. Zodra er in de toekomst meer resultaten van onderzoeken beschikbaar komen zal de betrouwbaarheid groter worden.

## 4.1 Verdamping van oppervlaktewater

De Penmanformule verg. (1) geeft bij toepassing op diep oppervlaktewater de nodige problemen. Ten eerste is de term  $G$  moeilijk te bepalen, terwijl deze van dezelfde orde van grootte kan zijn als  $Q^*$ .

$G$  kan beschreven worden als:

$$G = \rho_w c_w h \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (17)$$

waarin:

- $\rho_w$  = dichtheid van water (kg.m<sup>-3</sup>)  
 $c_w$  = specifieke warmte per eenheid massa van water bij constante druk (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)  
 $h$  = waterdiepte (m)  
 $T_w$  = de watertemperatuur gemiddeld over de diepte (K)

Voor goed gemengd water is  $T_w$  constant over de diepte. In dat geval kan verg. (17) gecombineerd worden met de vergelijkingen die dit proces beschrijven, hetgeen leidt tot verg. (1).

Keijman (1974) toonde aan dat de watertemperatuur  $T_w$  kan worden beschreven door een eenvoudige differentiaalvergelijking

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + \frac{T_w}{\tau} = \frac{T_e}{\tau} \quad (18)$$

waarbij:

$T_e$  de evenwichtstemperatuur gelijk is aan:

$$T_e = T_n + \frac{Q_n^*}{A} \quad (\text{K}) \quad (19)$$

de **tijdconstante**  $\tau$  gelijk is aan:

$$\tau = \frac{\rho_w c_w h}{A} \quad (\text{s}) \quad (20)$$

en de **warmte-uitwisselingscoëfficiënt**  $A$  is gedefinieerd als:

$$A = [4\sigma T_n^3 + \frac{s + \gamma}{\gamma r_a} \rho c_p] \quad (21)$$

waarin:

$$\sigma = \text{de Stephan-Boltzmann constante} \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$$

$$T_n = \text{natte bol temperatuur} \quad (\text{K})$$

Opgemerkt moet worden dat  $T_e$  en  $\tau$  op grond van standaard meteorologische omstandigheden kunnen worden bepaald. Daarnaast is  $\tau$  nog afhankelijk van de waterdiepte.

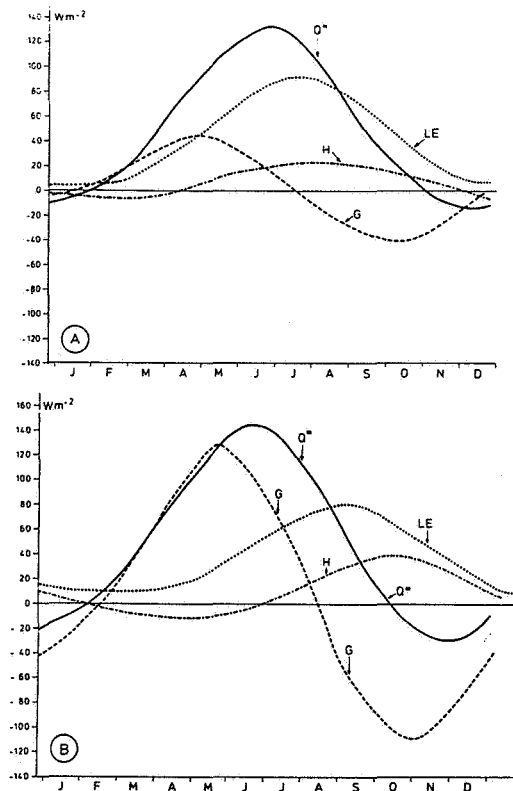
Met behulp van verg. (18) is  $T_w$  en daarmee ook  $G$  uit te rekenen. Het probleem is echter dat deze meteorologische waarnemingen boven het wateroppervlak zelf moeten worden uitgevoerd. In de praktijk zijn deze gegevens echter alleen beschikbaar van nabij gelegen landstations. Dit probleem kan worden opgelost door gebruik te maken van een aangepaste empirische uitdrukking voor  $r_a$ . Sweers (1976) stelde voor te gebruiken:

$$r_a = \frac{\rho c_p}{\gamma(4.4 + 1.82 u_{10})} \quad (\text{s.m}^{-1}) \quad (22)$$

waarin:

$$u_{10} = \text{de windsnelheid op 10 m hoogte op een nabijgelegen landstation}$$

De Bruin (1982) toont aan dat deze methode goede resultaten geeft voor twee aangrenzende Nederlandse meren met verschillende diepten (5 en 15 meter).



Figuur 4 Het gemiddeld jaarlijks verloop van de netto straling  $Q^*$ ,  
 voelbare - en latente warmtestroomdichtheid,  $H$  en  $\lambda E$  en de  
 bodemwarmte stroomdichtheid  $G$  zoals volgt uit de  
 modelberekening: A waterdiepte 5 m  
 B waterdiepte 15 m  
 (volgens De Bruin, 1982)

In fig. 4 wordt het resultaat van deze toepassing met Keijman's model weergegeven, waarbij gebruik is gemaakt van een empirische  $r_a$ . Duidelijk blijkt de aanzienlijke invloed van de waterdiepte op  $G$  en dus op  $E$ . Uit het bovenstaande volgt dat voor oppervlaktewater het verwaarlozen van  $G$  zeker niet toelaatbaar is. Daar Penman zijn  $r_a$  aanpaste aan de verdampingspan, is zijn  $r_a$  niet geschikt om toegepast te worden voor oppervlaktewater (zie o.a. De Bruin en Kohsiek, 1977). Penman hield geen rekening met het feit dat het jaarlijkse gemiddelde van de temperatuur van het wateroppervlak hoger is dan de luchttemperatuur. Dit heeft invloed op de bepaling van de netto

straling. Dientengevolge overschatte Penman  $Q^*$ . Vanwege deze verschijnselen zijn de jaarlijkse  $E_o$ -waarden 10-15% groter dan de werkelijke jaarlijkse verdamping van open water. De jaarlijkse waarden van  $E_o$  zoals gepubliceerd door De Bruin (1979) en Buishand en Velds (1980) overschatten dus de verdamping van oppervlaktewater, ondanks het feit dat het jaarlijks gemiddelde van  $G$  ongeveer gelijk aan nul is. Wessels (1973) en Schouten en De Bruin (1982) tonen aan dat Keijman's model ook kan worden toegepast op rivieren. Deze onderzoekers passen deze methode toe op de Rijn en de Maas om de thermische vervuiling van deze rivieren te bepalen.

Gezien de goede resultaten van het model Keijman ligt het in de rede om in het vervolg de verdamping voor de grote meren en de andere oppervlaktewateren (rivieren) met dit model te berekenen. Voor de betreffende oppervlaktewateren dienen de volgende gegevens beschikbaar te zijn:

- de oppervlakte van het open water;
- de diepte;
- de meteostations waarvan de gegevens ingevoerd moeten worden;
- de te gebruiken windfunctie.

De oppervlaktewaterverdamping kan dan nog op twee manieren gepresenteerd worden:

- a de verdamping wordt berekend per oppervlaktewater (meer, rivier) met de gegevens van de nabij gelegen meteostations;
- b een standaard oppervlaktewaterverdamping voor verschillende diepten, waarbij gebruik wordt gemaakt van één of enkele vaste meteostations.

De keuze is afhankelijk van het effect van de stationskeuze (en/of windfunctiekeuze) op de berekende waarde van de verdamping.

#### 4.2 Berekening van de verdamping van gewassen

##### 4.2.1 Discussie Penman-Monteith vergelijking

Monteith (1965) maakte gebruik van dezelfde fysische aannamen als Penman en leidde een formule af om de transpiratie van een **droog** (uitgestrekt en horizontaal uniform) begroeid oppervlak te bepalen.



In de internationale literatuur wordt deze formule aangeduid als de Penman-Monteith vergelijking. In Nederland wordt de naam van Rijtema er aan toegevoegd, omdat deze auteur onafhankelijk van genoemde onderzoekers een zelfde formule afleidde.

Voor een begroeid oppervlak dat **afwisselend nat en droog** is kan de maximaal mogelijke verdamping worden berekend als (Rijtema, 1965; Feddes, 1987):

$$E_{\max} = \frac{s + \gamma}{s + \gamma(1+r_s/r_a)} (E_w - E_i) + E_i \quad (\text{mm.d}^{-1}) \quad (23)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{E_p}$

waarin:

- $r_s$  = gewasweerstand (s.m<sup>-1</sup>)
- $E_w$  = verdamping van een nat gewas welke kan worden berekend met een aangepaste Penman vergelijking

Voor het geval er niet voldoende water in de bodem beschikbaar is om aan de vraag, die de atmosfeer aan het bodem-gewasoppervlak stelt, te voldoen, zal de evapotranspiratie afnemen. De fotosynthese en groei zullen dan afnemen en de gewasopbrengst zal minder zijn.

Opgemerkt moet worden dat bij verg. (23):

- $E_i$  dagelijks afgeleid kan worden uit gemeten interceptie-neerslag lijnen (Feddes, 1971; Hoyningen-Huene, 1981);
- onder omstandigheden dat het gewas gedeeltelijk nat en/of de grond niet volledig bedekt is met het gewas, de waarde van  $r_s$  aanzienlijk kan verschillen;
- onder omstandigheden dat een droog gewas het gehele grondoppervlak bedekt is,  $E_i = 0$ ,  $E_{sp} = 0$  en  $E_{\max} = E_{tp}$ ; verg. (23) reduceert dan tot de bekende uitdrukking (Monteith, 1965; Rijtema, 1965):

$$\lambda E_{tp} = \frac{s(Q^* - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{s + \gamma(1+r_s/r_a)} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (24)$$

Nadere onderzoekingen hebben aangetoond dat met verg. (24) zowel de transpiratie als het interceptieverlies van verschillende soorten **geheel natte vegetaties** zoals landbouwgewassen, heide, gras, maar ook bossen goed kunnen worden beschreven.

In het concept van Monteith verg. (24) wordt de vegetatielaag op een eenvoudige manier beschreven: deze wordt behandeld alsof het een "groot blad" is. Aan dit blad wordt een gewasweerstand toegekend waardoor wordt verdisconteerd dat waterdamp dit "grote blad" via de stomata moet verlaten. In deze stomata vindt het eigenlijke verdampingsproces plaats (water gaat daar over van de vloeibare in de gasvormige fase), zodat de lucht in de stomata verzadigd zal zijn bij de bladtemperatuur  $T_s$ . De Penman-Monteith vergelijking is afgeleid voor een droog gewas dat volledig de grond beschadwt. Als het gewas volledig met een dunne laag water is bedekt, wordt  $r_s$  nul en wordt de oorspronkelijke Penmanformule verkregen. Zolang het gewas **volledig nat** is beschrijft verg. (24) dus ook de verdamping van het interceptiewater. Het is echter nog steeds niet goed duidelijk wat de bruikbaarheid van verg. (24) voor **gedeeltelijk natte vegetaties** is. Vandaar dat Rijtema (1965) en Feddes (1971) dan liever uitgaan van verg. (23).

Vergelijking (24) is strikt genomen ook niet in staat om de evapotranspiratie te beschrijven van een droog gewas dat maar **gedeeltelijk de grond bedekt**. In dat geval kan de bodemevaporatie overheersen (zie o.a. De Bruin, 1987).

Deze laatste kan in principe niet met Penman-Monteith-achtige vergelijkingen worden berekend. Voor praktijktoepassingen wordt verg.(24) echter wel toegepast.

In het geval de watervoorraad in de wortelzone optimaal is, blijkt dat de weerstand voor waterdamptransport tussen het bodemoppervlak en de lucht,  $r_s$ , van een droog gewas dat volledig de grond bedekt een minimum waarde heeft ongelijk aan nul. Voor landbouwgewassen is de minimum  $r_s$  ongeveer  $30 \text{ s.m}^{-1}$  (zie o.a. Russell, 1980). Voor bossen is  $r_s$  ongeveer  $150 \text{ s.m}^{-1}$ .

De gewasweerstand is een complexe functie van inkomende zonnestraling, waterdampdeficiet en bodemvocht. Het verband tussen  $r_s$  en deze grootheden varieert van gewas tot gewas en hangt ook af van het bodemtype (zie ook rapport ad hoc groep verdamping, 1984). Het is niet

mogelijk om  $r_s$  direct te meten. Gewoonlijk wordt deze grootte experimenteel bepaald door de Penman-Monteith vergelijking te gebruiken, waarbij  $E$  dan onafhankelijk wordt bepaald. Het probleem is dat de aerodynamische weerstand  $r_a$  bij deze benadering bekend moet zijn. Vanwege de slechte beschrijving van de gewaslaag is deze grootte nauwelijks gedefinieerd, bovendien is deze afhankelijk van de oppervlaktetemperatuur  $T_s$ . Omdat in een gewas aanzienlijke temperatuurverschillen bestaan, is het moeilijk om  $T_s$  precies te bepalen. In vele studies wordt  $r_a$  ruwweg bepaald. Dit betekent dat vele  $r_s$  waarden die in de literatuur worden gegeven behept zijn met fouten tengevolge van de bepaling van  $r_a$ .

Voor meer gedetailleerde informatie over de Penman-Monteith vergelijking wordt de lezer verwezen naar de onlangs verschenen 'review papers' van McNaughton en Jarvis (1983) en Jarvis en McNaughton (1986).

#### 4.2.2 Zeer droge omstandigheden

Reeds in 1963 gaf Bouchet aan dat in de formule van Penman (en vergelijkbare formules) de evapo(transpi)ratie wordt uitgedrukt in van elkaar afhankelijke variabelen.

Dit kan worden geïllustreerd door een uitdrogende grond te beschouwen. De evapotranspiratie neemt af, terwijl de lucht bij de grond warmer en droger wordt. Dus het waterdampdeficiet  $e_s - e_a$  neemt toe. Vervolgens wordt de "potentiële" evapotranspiratie  $E_{tp}$  beschouwd. Deze grootte geldt voor de situatie waarbij de watervoorraad in de wortelzone voldoende is voor optimale groei. Stel  $D_d$  en  $D_p$  zijn respectievelijk het waterdampdeficiet onder droge en hypothetisch "potentiële" omstandigheden.

Het is duidelijk dat  $D_d > D_p$ . Dit betekent dat als  $E_p$  wordt bepaald met de Penman (of vergelijkbare) formules, waarbij  $D_d$  in plaats van  $D_p$  wordt gebruikt er een **overschatting** van  $E_p$  optreedt, daar in werkelijkheid  $D$  afneemt tot  $D_p$ . Opgemerkt moet worden dat dit geldt voor uitgestrekte gebieden waarbij geen advectie optreedt.

De vergelijkingen van Priestley-Taylor en Makkink bevatten  $D$  niet en daarom zijn ze niet gevoelig voor het bovenbeschreven effect. Om dit te illustreren beschouwen wij gegevens die zijn verzameld in de zeer droge zomer van 1976 bij Cabauw voor gras (De Bruin, 1981). Een aantal dagen zijn geselecteerd met een gemiddelde relatieve vochtigheid (rv) van 50%

of minder. Voor deze dagen is  $E_p$  berekend met respectievelijk de Penman-Monteith vergelijking (gebruik makend van de uitdrukking voor  $r_a$  voorgesteld door Thom en Oliver, 1977) en de Makkinkformule. De resultaten worden weergegeven in tabel 6: in deze tabel zijn ook weergegeven de waargenomen temperatuur, windsnelheid, relatieve vochtigheid en globale en netto straling.

Tabel 6

Vergelijking tussen  $\lambda E_r$ , volgens Makkink en  $\lambda E_p$  volgens Penman-Monteith, gebruik makend van de  $r_a$  voorgesteld door Thom en Oliver (1977) voor een aantal (zeer) droge dagen in 1976. Ook de waargenomen luchttemperatuur (T), de relatieve vochtigheid (rv), globale straling ( $K^\downarrow$ ) en de netto straling ( $Q^*$ ) zijn opgenomen. Gegevens van Cabauw (De Bruin, 1987).  $Q_p^*$  is een schatting van de netto straling onder potentiële omstandigheden.

Datum (1976)	T (°C)	R.V. -	$u_2$ ( $ms^{-1}$ )	$K^\downarrow$ ( $Wm^{-2}$ )	$Q^*$ ( $Wm^{-2}$ )	$\lambda E_r$ ( $Wm^{-2}$ )	$\lambda E_p$ ( $Wm^{-2}$ )	$\hat{Q}_p^*$ ( $Wm^{-2}$ )
03-07	24.1	0.50	1.9	311	151	148	165	167
04-07	23.6	0.49	2.3	307	147	145	169	165
06-07	22.6	0.39	3.0	319	153	148	199	171
22-08	17.3	0.47	3.7	262	94	112	142	124
23-08	17.6	0.46	3.1	256	93	110	139	120
24-08	19.9	0.42	2.4	246	91	110	145	115
25-08	20.4	0.50	1.7	230	81	103	115	107

Duidelijk is te zien dat de  $E_p$  volgens Penman-Monteith groter is dan volgens Makkink, waarbij de eerste (uitgedrukt in energie-eenheden) zelfs groter is dan de waargenomen netto straling. Dit geeft duidelijk aan dat met de Penman-Monteith vergelijking  $E_p$  wordt overschat. Tabel 6 laat zien dat voor de dagen in augustus ook met de Makkinkformule  $\lambda E_p$  waarden worden berekend die groter zijn dan de waargenomen netto straling,  $Q^*$ , hoewel de afwijkingen minder groot zijn dan die van Penman-Monteith. Verdere onderzoekingen hebben aangetoond dat de netto straling tevens afhangt van de "droogte van de grond". Dit komt waarschijnlijk door een verandering van de albedo en hogere oppervlaktetemperaturen. In de laatste kolom van tabel 6 wordt een

schatting van de netto straling gegeven onder "potentiële" omstandigheden, deze kan worden berekend met een door Slob ontwikkelde empirische formule (persoonlijke mededeling).

$$Q^* = (1-r)K_{\downarrow} - 110 \frac{K_{\downarrow}}{K_{O\downarrow}} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (25)$$

hier is  $r$  de albedo van het oppervlak (aangenomen is dat  $r = 0.23$ ) en  $K_{O\downarrow}$  is de globale straling bovenin de atmosfeer. Opgemerkt moet worden dat verg. (25) geldt voor gemiddelde dagwaarden en alleen is getoetst onder Nederlandse omstandigheden. Duidelijk is dat de netto straling onder potentiële omstandigheden groter is dan de waargenomen waarden. Echter de  $E_p$  volgens Makkink is nu kleiner dan de berekende netto straling, terwijl de  $E_p$  volgens Penman-Monteith nog steeds groter is. Concluderend kan worden gesteld dat onder erg droge omstandigheden de Makkinkformule een meer realistisch gedrag vertoont dan de Penman-Monteith vergelijking.

#### 4.3 Toepassing van de Makkinkformule in de winterperiode

De argumenten die hebben geleid tot de toepassing van de formule van Makkink, gelden alleen voor het "zomerseizoen" van april tot en met september; de straling is dan de grootste drijvende kracht achter de verdamping. In de winter geldt dit niet en de fysische basis voor de Makkinkformule ontbreekt dan.

De meest betrouwbare gegevens voor de evapo(transpi)ratie betreffen dus de zomerperiode. Directe verdampingsmetingen onder winteromstandigheden zijn buitengewoon moeilijk uit te voeren, voornamelijk vanwege instrumentele factoren. Daarom is niet veel bekend over de verdamping in de winter. Waterbalansstudies tonen aan dat het verdampingsverlies uit een stroomgebied bedekt met een aerodynamische ruwe vegetatie, zoals (pijn)bomen en heide, duidelijk groter is dan  $E_o$ . Dit geldt zelfs voor gras (Thom en Oliver, 1977). De hoofdoorzaak van dit verschijnsel is het feit dat in de winter de aerodynamische term in

de Penman-Monteith vergelijking vaak overheerst, terwijl de aerodynamische weerstand,  $r_a$ , sterk afhangt van de oppervlakteruwheid. Penman's  $r_a$  geldt voor een zeer glad oppervlak (Thom en Oliver, 1977; Keijman, 1981).

Bovendien kreeg Stricker (1981) goede resultaten in de winter door gebruik te maken van de Thom-Oliver versie van de Penman-Monteith vergelijking voor het Hupselse Beekgebied. Hij gebruikt tijdstappen van een dag. Uit het bovenstaande moet worden geconcludeerd dat in de winter noch de Makkink- noch de Penmanformule in principe toepasbaar is. In de winter is evenwel gemiddeld de hoeveelheid neerslag aanzienlijk groter dan de verdamping. Voor waterbalansberekeningen behoeft  $E$  daarom dan niet zo nauwkeurig bekend te zijn als in het groeiseizoen.

Vaak wordt bij waterbalansstudies in de winter  $E_o$  of  $0.8 E_o$  genomen als een eerste schatting. Uit bovenstaande discussie blijkt dat dit leidt tot een onderschatting van  $E$ .

De vraag rijst of het nieuwe cijfer  $E_r$  voor deze ruwe waterbalans berekeningen gebruikt kan worden. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de  $E_r$  en  $E_o$  cijfers ook voor de "wintermaanden" oktober tot en met maart vergeleken. De resultaten van deze vergelijkingen worden in tabel 7 getoond; deze tabel is vergelijkbaar met tabel 2. Duidelijk is dat:

- a  $E_r > E_o$  in oktober tot en met februari;
- b  $E_r$  en  $E_o$  praktisch niet zijn gecorreleerd in de maanden november tot en met januari; hiermee wordt geïllustreerd dat de straling in de winter niet de drijvende kracht is achter de verdamping;
- c Maart zich als een "zomermaand" gedraagt, zodat de Makkinkformule kan worden gebruikt vanaf 1 maart.

Daar  $E_o$  de verdamping van grasland in de winter onderschat en  $E_r$  dan enkele mm/decade groter is dan  $E_o$ , wordt geconcludeerd dat gemiddeld  $E_r$  in de winter kan worden gebruikt voor ruwe waterbalans berekeningen voor weidegebieden. Voor korte perioden (korter dan ongeveer 1 maand) klopt dit niet. Dit houdt verband met het feit dat de Makkinkformule geen fysische basis heeft in de winter.

Tabel 7

Vergelijking tussen Penman en Makkink voor oktober t/m maart; gemiddelde waarden (van drie landstations over de periode 1965 - 1981)

3 landstations	Makkink (mm decade <sup>-1</sup> )	Penman (mm decade <sup>-1</sup> )	Penman/Makkink (-)	R
oktober	9.19	9.01	0.98	0.709
november	3.77	3.06	0.81	0.471
december	2.11	0.71	0.34	-0.260
januari	2.57	1.28	0.50	0.166
februari	4.96	4.46	0.90	0.615
maart	10.31	13.90	1.35	0.881

#### 4.4 Stedelijke gebieden

De verdamping uit een stedelijk gebied is niet goed bekend. De verdamping is onder meer afhankelijk van de oppervlakte verhard/onverhard. De Penman-, Makkink- of Monteith-methode zijn zeker niet zondermeer toepasbaar. Nader onderzoek op dit gebied dient nog te worden uitgevoerd.





5 DE PRAKTIJK MET BETREKKING TOT DE BEREKENING EN  
VERSTREKKING VAN DE VERDAMPINGSGEGEVENS DOOR HET  
KNMI

5.1 Inleiding

De bezwaren die aan de verdampingsgetallen, berekend volgens Penman ( $E_o$ ) verbonden waren, traden in het begin van de jaren tachtig steeds duidelijker aan het licht. Tevens viel te verwachten dat om praktische redenen deze berekeningswijze niet lang meer zou kunnen worden voortgezet. Een van de redenen hiervoor was dat het aantal stations dat met klassieke zonneshijmeters is uitgerust in de toekomst sterk zal afnemen. Een gevolg van het gebruik van deze instrumenten was overigens ook dat de verdampingsgegevens voor vele toepassingen niet snel genoeg ter beschikking konden worden gesteld. Om dit nadeel te ondervangen zijn in het tijdvak 1981 - 1986 voor de vijf hoofdwaarnemingsstations gegevens voor de globale straling gebruikt om met een variant van de Penmanformule daggetallen voor de open waterverdamping te berekenen. Dit leverde voorlopige gegevens op die onder de naam "referentie-verdamping", in het groeiseizoen ten behoeve van de land- en tuinbouw werden verspreid. Deze getallen verloren hun betekenis op het moment dat de  $E_o$ -getallen beschikbaar kwamen. Om verwarring tussen de referentie-verdamping en de  $E_o$ -waarden te voorkomen, die door het verschil in rekenwijze kleine verschillen vertoonden, zijn de eerstgenoemde getallen niet als klimatologische gegevens gearhiveerd. De voor de berekening van de referentie-verdamping toegepaste rekenwijze is door de Bruin en Lablans (1980) beschreven.

In de voorgaande hoofdstukken is aangetoond dat voor een schatting van de verdamping die gelijkwaardig is aan de Penmanverdamping, in de toekomst om praktische redenen een door Makkink aangegeven rekenwijze kan worden gevolgd. Deze rekenwijze biedt de mogelijkheid om daggetallen voor de verdamping op snelle wijze te verstrekken voor een netwerk van stations van voldoende dichtheid. Daar de inrichting en de gegevensverwerking voor deze stations veel eenvoudiger is dan voor de berekening van Penmangetallen is vereist, kan dit netwerk waarschijnlijk gedurende een lange reeks van jaren in stand worden gehouden.

## 5.2 Makkinkverdamping en referentie-gewasverdamping

In paragraaf 2.2.2 is de referentie-gewasverdamping aangeduid als de potentiële verdamping van een referentie-gewas, een soort "standaard"-gras. Daarbij moet evenwel niet gedacht worden aan een "levend" (gras)gewas. Het is immers mogelijk dat op grond van verdere onderzoekingen de berekening van de potentiële verdamping van gras verandering zou moeten ondergaan. Voor de klimatologische praktijk is het evenwel ongewenst dat de berekeningswijze steeds aangepast zou moeten worden aan nieuwe resultaten van landbouwkundig onderzoek. Als referentie-gewas is daarom een denkbeeldig gewas gekozen dat maar één eigenschap heeft, namelijk dat het dag in dag uit precies verdampt volgens verg. (8).

Eventueel nieuwe inzichten over de verdamping van "echt" gras zullen dan ook niet leiden tot een verandering van de rekenwijze van  $E_r$ , maar zullen tot uiting komen in de gewasfactoren voor gras, op dezelfde wijze als dit voor andere gewassen het geval is. In feite is dit reeds geschied in de in paragraaf 3.3 gegeven tabel 5 voor de bij  $E_r$  toe te passen gewasfactoren, daar in deze tabel, voor enkele decaden, voor gras reeds gewasfactoren ongelijk aan 1 voorkomen.

**Door de eenduidige wijze waarop de referentie-gewasverdamping uit slechts twee meteorologische grootheden wordt berekend is te verwachten dat geen verwarring t.a.v. de precieze betekenis van deze grootheid zal ontstaan, zoals bij de Penmanverdamping het geval is geweest.**

Nochtans dienen ook bij de berekening van  $E_r$  nog enkele aanvullende werkafspraken in acht te worden genomen.

- **De etmaalwaarden van  $E_r$  dienen uitsluitend te worden berekend uit etmaaltotalen voor de globale straling en etmaalgemiddelden voor de temperatuur.**
- **Verdampingssommen voor perioden langer dan één etmaal worden uitsluitend bepaald door optelling van etmaalgetallen.**

Het voorstel van de werkgroep om met ingang van 1 april 1987 de berekeningsmethode volgens Makkink voor een twintigtal stations (zie fig. 5) in te voeren is door het KNMI overgenomen.

Figuur 5 Eerste ontwerp van het meetnet voor de globale straling en temperatuur. Het is de bedoeling om in landbouwgebieden nog enkele stations toe te voegen, namelijk in Nieuw Beerta, Marknesse, Hoogeveen, Hoorn en Wilhelminadorp.



De decade- en maandsommen zullen in de klimatologische maandoverzichten van het KNMI worden gepubliceerd. Daarnaast kunnen de gegevens, bijvoorbeeld in de vorm van daggetallen, ook rechtstreeks van de Klimatologische Dienst van het KNMI worden betrokken. Evenals voor de Penmanverdamping bestaat ook voor de referentie-gewasverdamping de mogelijkheid tot ruimtelijke interpolatie van de berekende waarden. Dit kan het geval zijn voor stations uit het waarnemingsnetwerk zelf als incidenteel invoergegevens ontbreken, maar ook als men voor andere locaties over een schatting van de verdamping wenst te beschikken. Het netwerk voor de referentie-gewasverdamping biedt overigens door de grotere dichtheid een betere mogelijkheid tot interpolatie dan het vroegere netwerk voor de Penmanverdamping.

Deze mogelijkheid om  $E_r$ -getallen te genereren door interpolatie leidt tot nog een aanvullende werkafpraak:

- Bij de publikatie van  $E_r$ -getallen dient steeds duidelijk te worden aangegeven of het uit waarnemingsgegevens berekende getallen betreft of door interpolatie verkregen waarden.



6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- 1 De verdampingsgetallen ( $E_o$ -reeksen) die door het KNMI tot 1987 routinematig werden verstrekt, dienden als basiscijfers voor de berekening van de potentiële gewasverdamping.
- 2 Door diverse oorzaken zijn in Nederland echter verschillende met behulp van "de Penmanformule" berekende  $E_o$ -reeksen ontstaan. Deze verschillende verdampingsgetallen hebben nogal verwarring veroorzaakt.
- 3 De komende jaren zal er behoefte blijven bestaan aan een praktisch, snel te berekenen, verdampingsgetal aan de hand waarvan met behulp van gewasfactoren een schatting van de potentiële gewasverdamping kan worden gemaakt. Daarom is besloten op een andere, maar wel vergelijkbare berekeningsmethode over te stappen; hiervoor is een berekeningsmethode volgens "Makkink" gekozen.
- 4 Door het KNMI is besloten om de Makkinkformule per 1 april 1987 te gaan hanteren voor de routinematige berekening van de zogenaamde referentie-gewasverdamping ( $E_r$ ), waaruit met de gewasfactoren-methode de potentiële verdamping kan worden berekend.
- 5 De nieuwe rekenwijze voldoet aan een aantal voorwaarden:
  - het levert een verdampingsgetal dat vergelijkbaar is met  $E_o$ ;
  - de berekening is eenvoudig en het aantal benodigde meteorologische invoergegevens klein;
  - de formule bevat slechts weinig empirische waarden;
  - de berekeningswijze zal op fysische gronden waarschijnlijk niet spoedig behoeven te worden vervangen.
- 6 De gewasfactoren-methode levert een redelijke schatting op van de potentiële gewasverdamping. Deze schatting zal door nader onderzoek kunnen worden verbeterd, waarna de gewasfactoren kunnen worden aangepast, zonder dat de basisrekenwijze voor  $E_r$  wordt gewijzigd.
- 7 Voor een nauwkeuriger berekening van de gewasverdamping wordt voorlopig de Penman-Monteith-Rijtema vergelijking (1965) aanbevolen. Voor deze verdampingsberekening zijn veel meer meteorologische

invoergegevens nodig dan voor de Makkinkformule. Daarom moet men naast de meteorologische gegevens die voor de Makkinkformule nodig zijn ook andere meteorologische variabelen blijven meten en beschikbaar stellen (o.a. voor on-line verstrekking).

- 8 De verdamping van oppervlaktewater kan worden bepaald met de methode Keijman (1974), waarbij wordt aanbevolen de door Sweers (1976) voorgestelde windfunctie te gebruiken.
- 9 Voor de winter levert noch de Penmanformule, noch de Makkinkformule betrouwbare gegevens omtrent de verdamping op. Aanbevolen wordt om in de winter voor de berekening van de gewasverdamping gebruik te maken van de Thom-Oliver versie van de Penman-Monteith vergelijking. Wel is besloten om als zeer ruw cijfer voor de verdamping in de winterperiode ook het referentie-gewasverdampingsgetal  $E_r$  te verstrekken.
- 10 Nader verdampingsonderzoek is o.a. nodig ten aanzien van:
  - de winterperiode (zie 4.3);
  - stedelijke gebieden (zie 4.4);
  - de kuststrook (zie 2.3).
- 11 Door de Klimatologische Dienst van het KNMI dient, ten behoeve van een juiste interpretatie van de in de loop der tijd op het KNMI berekende  $E_o$ -reeksen, nauwkeurig aan te worden gegeven hoe die gegevens werden berekend. Daarbij dient o.a. te worden vastgelegd: de methode, de rekentechniek en toegepaste correcties.

- AD HOC GROEP VERDAMPING, 1984. Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM.  
Provincie Gelderland, Arnhem, 92 pp.
- BOHEEMEN, P.J.M. VAN, H. HUMBERT en B.J. VAN DEN BROEK, 1986. Berekening van grasland. IV. Berekening van de open waterverdamping en de potentiële evapotranspiratie op het proefveld Aver-Heino.  
Nota 1752. ICW, Wageningen, 10 pp.
- BOUCHET, R.J., 1963. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique.  
Proceedings IASH 62: 134-142.
- BRUIN, H.A.R. DE, 1979. Neerslag, open waterverdamping en potentieel neerslagoverschot in Nederland.  
Frequentieverdelingen in het groeiseizoen.  
Scientific Report W.R. 79-4, KNMI, De Bilt.
- BRUIN, H.A.R. DE, 1981. The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 28: 25-37.
- BRUIN, H.A.R. DE, 1982. Temperature and energy balance of a water reservoir determined from standard weather data of a land station.  
Journal of Hydrol., 59: 261-274.
- BRUIN, H.A.R. DE, 1987. Evaporation in arid and semi-arid regions.  
Proc. Workshop on Estimation of natural recharge of groundwater, Antalya (in press).
- BRUIN, H.A.R. DE, 1987. From Penman to Makkink.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Information 39: 5-31.
- BRUIN, H.A.R. DE and A.A.M. HOLTSLAG, 1982. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during day time compared with the Penman-Monteith concept.  
J. Appl. Meteor., 21: 1610-1621.
- BRUIN, H.A.R. DE and A.A.M. HOLTSLAG, 1987. Evaporation and weather.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 39: 63-83.

- BRUIN, H.A.R. DE and W. KOHSIEK, 1977. De verdamping uit gras op klei-  
grond in de zomer van 1976 vergeleken met de Penman-formule.  
Scientific Report W.R. 77-10. KNMI, De Bilt, 11 p.
- BRUIN, H.A.R. DE and W. KOHSIEK, 1979. Toepassingen van de Penman-  
formule.  
W.R. 79-3, KNMI, De Bilt, pp. 36.
- BRUIN, H.A.R. DE en W.N. LABLANS, 1980. Een test van een nieuwe bere-  
keningswijze van de open waterverdamping volgens Penman ten behoeve  
van snelle voorlichting.  
KNMI Verslagen V 357, De Bilt, 7 pp.
- BRUTSAERT, W.H., 1982. Evaporation into the atmosphere.  
D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland.
- BUISHAND, T.A. en C.A. VELDS, 1980. Neerslag en verdamping.  
KNMI. Klimaat van Nederland 1, 206 pp.
- FEDDES, R.A., 1971. Water, heat and crop growth.  
Thesis Comm. Agric. Univ. Wageningen 71-12, 184 pp.
- FEDDES, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink's reference  
crop evapotranspiration.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 39: 33-45.
- HELLINGS, A.J., M. DE GRAAF en D.A. VAN DER SCHANS, 1982. De relatie  
tussen wateraanvoer, verdamping en produktie bij het gewas aard-  
appelen.  
Nota 1376. ICW, Wageningen, 49 pp.
- HOLTSLAG, A.A.M., 1987. Surface fluxes and boundary layer scaling.  
Models and applications.  
PhD thesis Wageningen Agricultural University.
- HOYNINGEN-HUENE, J. VON, 1981. De Interzeption des Niederschlags in  
landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen.  
Arbeitsbericht Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und  
Kulturbau, DVWK, Braunschweig, 66 pp.
- JARVIS, P.G. and K.G. MCNAUGHTON, 1986. Stomatal control of  
transpiration: scaling up from leaf to region.  
In: Advances in Ecological Research., Vol. 15: 1-49.
- KEIJMAN, J.Q., 1974. The estimation of the energy balance of a lake  
from simple weather data.  
Boundary Layer Meteor., 7: 399-407.



- KEIJMAN, J.Q., 1981. Theoretical background of some methods for the determination of evaporation.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 28: 12-23.
- KEIJMAN, J.Q., 1982. Evaporation research in the Rottegataspolder (Netherlands).  
Proc. Symp. Hydrolog. Research Basins. Sonderheft Landeshydrologie. Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- KNMI. Maandelijks Overzicht der weersgesteldheid.  
KNMI, De Bilt
- KRAMER, C., 1957. Berekening van de gemiddelde grootte van de verdamping van verschillende delen van Nederland volgens de methode van Penman.  
KNMI Meded. en Verh. 70, De Bilt. 85 pp.
- LABLANS, W.N., 1987. Climatological data on the evaporation in the Netherlands; past, present and future.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 39: 47-62.
- MAKKINK, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters.  
Journ. Int. of Water Eng., 11: 277-288.
- MAKKINK, G.F., 1961. De verdamping uit vegetaties in verband met de formule van Penman.  
Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague.  
Proceedings and Informations 4: 90-115.
- MAKKINK, G.F. and H.D.J. VAN HEEMST, 1967. De potentiële verdamping van kort gras en water.  
Jaarboek IBS: 89-96.
- MCNAUGHTON, K.G. and P.G. JARVIS, 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation.  
In: Water Deficits and Plant Growth, Vol. VII, Academic Press Inc.
- MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and environment.  
Proc. Symp. Soc. Exp. Biol. 19: 205-234.
- PENMAN, H.L., 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass.  
Proc. Roy. Soc. A., 193: 120-145.
- PENMAN, H.L., 1956. Evaporation: an introductory survey.  
Neth. J. of Agric. Sci. 4: 9-29.

- PRIESTLEY, C.H.B. and R.J. TAYLOR, 1972. On the assessment of the surfaces heat flux and evaporation using large scale parameters. Month. Weth. Rev., 100: 81-92.
- RIJTEMA, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Agric. Res. Rep. 659. Pudoc, Wageningen, 107 pp.
- ROMIJN, E., 1985. Valkuilen bij het bepalen van de potentiële verdamping van grasland door middel van f-factoren. H<sub>2</sub>O 18.12: 265-270.
- RUSSEL, G., 1980. Crop evaporation, surface resistance and soil water status. Agric. Meteorol., 21: 213-226.
- SCHOUTEN, C.J. and H.A.R. DE BRUIN, 1982. The determination of thermal pollution of the River Meuse. Proceedings of Exeter Symposium, IAHS Publ. 139: 49-62.
- STRICKER, J.N.M., 1981. Methods for determination evapotranspiration from meteorological data and the applicability in hydrology. Comm. Hydr. Research TNO, The Hague. Proceedings and Informations 28: 59-77.
- SWEERS, H.E., 1976. A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature, a critical survey of some literature. J. of Hydrol., 30: 375-401.
- THOM, A.S. and H.R. OLIVER, 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. Quart. J. Roy. Met. Soc., 103: 345-357.
- WERKCOMMISSIE VOOR VERDAMPINGSONDERZOEK, 1984. Verdampingsonderzoek in Nederland 1942-1971. Eindverslag, 167 pp.
- WERKGROEP LANDBOUWKUNDIGE ASPECTEN (LAGO), 1984. Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking. CoGroWa, Utrecht, 154 pp.
- WESSELS, H.R.A., 1973. Verandering van de Rijntemperatuur: een meteorologische analyse. De Ingenieur, 5: 88-90.

BIJLAGE A

LIJST VAN DE GEBRUIKTE SYMBOLEN

$\alpha$	= een coëfficiënt met de waarde van ongeveer 1,2 - 1,3 in de formule van Priestley en Taylor	
$\gamma$	= psychrometerconstante	(mbar.K <sup>-1</sup> )
$\lambda$	= specifieke verdampingswarmte van water	(J.kg <sup>-1</sup> )
$\rho_a$	= dichtheid van lucht	(kg.m <sup>-3</sup> )
$\rho_w$	= dichtheid van water	(kg.m <sup>-3</sup> )
$\sigma$	= Stephan-Boltzmannconstante	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )
$\tau$	= tijdconstante	
$c_p$	= specifieke warmte per eenheid massa van de lucht bij constante druk	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$c_w$	= specifieke warmte per eenheid massa van water bij constante druk	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$e_a$	= dampdruk bij temperatuur T <sub>a</sub>	(mbar)
$e_s$	= verzadigingsdampdruk	(mbar)
f	= gewasfactor behorende bij de Makkinkformule	
f(u)	= functie van de windsnelheid, gedefinieerd als f(u) = 3,7 + 4,0 u <sub>2</sub>	(W.m <sup>-2</sup> .mbar <sup>-1</sup> )
g	= gewasfactor behorende bij de Penmanformule	
h	= waterdiepte	(m)
r	= albedo van het oppervlak, hier aangenomen als 0,23	
r <sub>a</sub>	= aerodynamische weerstand voor waterdamptransport	(s.m <sup>-1</sup> )
r <sub>s</sub>	= gewasweerstand	(s.m <sup>-1</sup> )
rv	= relatieve vochtigheid	
s	= helling van de verzadigingsdampdrukcurve	(mbar.K <sup>-1</sup> )
s <sub>e</sub>	= standaardfout	
u <sub>2</sub>	= gemiddelde windsnelheid op 2 m hoogte	(m.s <sup>-1</sup> )
u <sub>10</sub>	= gemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte	(m.s <sup>-1</sup> )
A	= warmte-uitwisselingscoëfficiënt	
A', A''	= regressieconstanten	
B	= intercept	

$C, C_1, C_2$	= constanten in de Makkinkformule	
$D$	= waterdampdeficiet	(mbar)
$D_p$	= potentiëel waterdampdeficiet	(mbar)
$D_d$	= waterdampdeficiet onder droge omstandigheden	(mbar)
$E$	= de werkelijke verdamping van een begroeid oppervlak (=evapotranspiratie), kan worden beschouwd als de som $E_i, E_s$ en $E_t$ .	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_i$	= de verdamping van het interceptiewater	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_{max}$	= de grootst mogelijke verdamping van een begroeid oppervlak	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_o$	= het verdampingsgetal berekend volgens de Penmanformule	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_p$	= de potentiële evapotranspiratie	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_r$	= de referentie-gewasverdamping, berekend volgens de Makkinkformule	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_t$	= de transpiratie via de huidmondjes en cuticula van een droog bladoppervlak van een gewas	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_{tp}$	= de potentiële transpiratie	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_s$	= de verdamping van de bodem	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_{sp}$	= de potentiële bodemverdamping	(mm.d <sup>-1</sup> )
$E_w$	= de verdamping van een nat gewas	(mm.d <sup>-1</sup> )
$F$	= infiltratie	(mm.d <sup>-1</sup> )
$G$	= bodemwarmte stroomdichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$H$	= voelbare-warmte stroomdichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$I$	= de verhouding van het totale bladoppervlak t.o.v. het bodemoppervlak	
$K^{\downarrow}$	= globale stralingsstroomdichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$K_{\odot}^{\downarrow}$	= de globale straling bovenin in de atmosfeer	(W.m <sup>-2</sup> )
$Q^{\downarrow}$	= netto stralingsstroomdichtheid	(W.m <sup>-2</sup> )
$Q_p^*$	= netto stralingsstroomdichtheid onder potentiële omstandigheden	(W.m <sup>-2</sup> )
$Q_r$	= de netto opwaartse stroming door de onderrand van het profiel	(mm.d <sup>-1</sup> )
$Q_w^*$	= de netto stralingsstroomdichtheid van een hypothetisch wateroppervlak	(W.m <sup>-2</sup> )
$R$	= correlatiecoëfficiënt	
$T_a$	= heersende temperatuur	(K)
$T_e$	= evenwichtstemperatuur	(K)

$T_n$	= natte bol temperatuur	(K)
$T_o$	= temperatuur aan het aardoppervlak	(K)
$T_s$	= oppervlaktetemperatuur	(K)
$T_w$	= de watertemperatuur gemiddeld over de diepte	(K)
$V_r$	= de voorraad water in de bodem	(mm)



BIJLAGE B

SAMENSTELLING VAN DE PROJECT-(p) EN BEGELEIDINGSGROEP (b)  
VERDAMPINGSBEREKENINGEN:

Ir. G.E. Arnold (b) (opvolger van Drs. A. van der Giessen)	Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/RIZA
Dr. H.A.R. de Bruin (p)	Landbouw Universiteit Wageningen, Vakgroep Natuur- en Weerkunde (voorheen KNMI)
Dr. R.A. Feddes (b)	Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Ing. J.C. Hooghart (b) (secretaris)	Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO
Dhr. W.N. Lablans (p) (voorzitter)	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Drs. E. Romijn (b)	Dienst Water en Milieu, Provincie Gelderland
Drs. C.W. van Scherpenzeel(p)	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Ir. H.A.M. Thunnissen (b) (opvolger van Ir. H.A.J. van Lanen)	Stichting voor Bodemkartering (Beiden voorheen Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne)
Dr. C.A. Velds (b)	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut





## BIJLAGE C

### OVERZICHT VAN DE OP HET KNMI BEREKENDE TIJDREEKSEN VAN DE VERDAMPING VOLGENS PENMAN

#### 1 Inleiding

In zijn befaamde publikatie uit 1948 heeft Penman drie toepassingen behandeld van de door hem opgestelde rekenwijze voor de verdamping, namelijk de verdamping van open water,  $E_o$ , de verdamping van kort gras ("turf"),  $E_t$ , en de verdamping van kale grond ("bare soil"),  $E_p$ . De berekeningswijze voor de verdamping van open water had in deze publikatie betrekking op verdampingspannen die waren opgesteld in de omgeving van Rothamstead in Zuid Engeland.

In Nederland werd de Penmanmethode voor het eerst toegepast bij de berekening van tijdreeksen voor de open water verdamping voor twaalf stations, over de periode 1933 - 1953. Deze reeksen werden in 1957 gepubliceerd (Kramer, 1957) (De uitgave van de publikatie ondervond vertraging door het overlijden van de auteur in 1955).

Voor de periode januari 1956 tot en met maart 1987 werden gegevens over de Penman-verdamping opgenomen in de maandelijkse weersoverzichten van de Klimatologische Dienst van het KNMI.

In 1979 en 1981 werden wederom tijdreeksen gepubliceerd, respectievelijk door De Bruin (1979) over het tijdvak 1911-1975 en door Buishand en Velds (1980) over het tijdvak 1911-1979.

De rekenwijze voor de bepaling van de open water verdamping wordt door de Penmanformule niet eenduidig vastgelegd. In de genoemde publikaties is vermeld met welke varianten van de Penmanformule en met welke invoergegevens de op het KNMI berekende waarden tot stand zijn gekomen. Bij de in de klimatologische maandoverzichten vermelde verdampingsgegevens is echter niet aangegeven op welke wijze de berekeningen zijn uitgevoerd. Daar worden de verdampingsgetallen op dezelfde manier gepresenteerd als de klimatologische waarnemingsgegevens die volgens internationaal gestandaardiseerde, nauwkeurige waarnemingsmethoden worden verkregen. De gebruikers van deze verdampingsgetallen kunnen daardoor gemakkelijk de indruk krijgen dat de  $E_o$ -cijfers nauwkeurig overeenkomen met de werkelijke verdamping van open water. De publikaties waarin de werkelijke betekenis van de  $E_o$ -getallen is beschreven (Penman (1948 en 1956), Kramer (1957) en De Bruin en Kohnsiek (1979)), kwamen in het algemeen niet in handen van de abonnees

van de klimatologische bulletins, c.q. van de gebruikers van de  $E_0$ -cijfers. Zowel hierdoor als door de enigszins verschillende uitkomsten die met de diverse varianten van de Penmanformule werden verkregen, is onduidelijkheid ontstaan omtrent de betekenis van de "Penmangetallen".

Hoewel de berekening van de verdamping volgens Penman ten behoeve van de klimatologische maandoverzichten is beëindigd, lijkt het toch nuttig een beschrijving te geven van de wijze waarop deze gegevens tot stand zijn gekomen. Een dergelijke beschrijving zal bijdragen tot een vermindering van de verwarring omtrent de werkelijke betekenis van de door het KNMI in de loop der jaren verspreide verdampingsgegevens. In het kader van dit rapport zal op dit punt slechts kort worden ingegaan, maar te zijner tijd zal hierover een uitvoerig KNMI rapport verschijnen.

## 2 De door Kramer berekende tijdreeksen van de Penmanverdamping

Kramer (1957) heeft in zijn publikatie over "de gemiddelde grootte van de verdamping in verschillende delen van Nederland" zeer gedetailleerd beschreven hoe hij de door Penman, in 1948, gepubliceerde rekenwijze voor de verdamping van een nat oppervlak zonder warmteberging heeft toegepast. Op deze rekenwijze zijn ook alle later op het KNMI uitgevoerde berekeningen van de Penman-verdamping gebaseerd. Kramer is evenwel van de rekenwijze van Penman afgeweken t.a.v. de wijze waarop de invoergegevens voor de formule van Penman uit de klimatologische waarnemingen worden bepaald.

Penman gebruikte etmaalgemiddelden van de klimatologische gegevens, terwijl Kramer de voorkeur gaf aan het gemiddelde van drie waarnemingen overdag. Hij was zich er wel van bewust dat dit een systematisch verschil zou opleveren met de resultaten van de oorspronkelijke rekenwijze van Penman (1948), maar Kramer was van mening dat voor zijn onderzoek deze rekenwijze meer geschikt was. (Het betrekken van de nachtelijke uren in de berekening zou een vereffenend effect hebben op de regionale verschillen in de rekenresultaten).

Eén van de gevolgen van Kramers beslissing is dat de notatie  $E_0$  voor de "verdamping van open water volgens Penman" niet eenduidig is. Overigens heeft ook Penman de notatie  $E_0$  gebruikt voor de uitkomsten van verschillende versies van zijn formule (Lablans, 1987).

3 De in de klimatologische maandoverzichten gepubliceerde  $E_0$ -cijfers volgens Penman

In de periode januari 1956 tot en met maart 1987 zijn in de klimatologische maandoverzichten van het KNMI voor vijf hoofdstations maandsommen van de volgens Penman beschreven "verdamping van een vrij wateroppervlak" gepubliceerd. Deze maandsommen zijn berekend uit maandgemiddelden van de invoergegevens.

Een geografisch overzicht van de stations waarvoor sinds 1956  $E_0$ -getallen zijn berekend is gegeven in fig. C.1, met de tijdvakken waarvoor de gegevens van de stations in de maandoverzichten zijn opgenomen.

In 1961 is het aantal stations waarvoor maandsommen voor  $E_0$  in de maandoverzichten zijn gepubliceerd uitgebreid tot 15.



Figuur C.1 Stations en perioden waarover  $E_0$ -getallen zijn gepubliceerd in de klimatologische maandoverzichten van het KNMI

- 1) tot juli 1972
- 2) vanaf augustus 1972
- 3) niet in 1981 en 1982

In 1971 is een verandering in de rekenwijze aangebracht. De klimatologische stations werden toen uitgerust met thermografen en hygrografen, zodat etmaalgemiddelden voor de invoergegevens beschikbaar kwamen. Dit leverde de mogelijkheid om - overeenkomstig de werkwijze van Penman - voortaan de etmaalgemiddelden als invoergegevens te gaan gebruiken. Ook is toen besloten om de berekening voortaan per decade, in plaats van per maand, uit te voeren. In de maandoverzichten werden

sindsdien de decadesommen en de maandsommen gepubliceerd, waardoor overeenstemming ontstond met de gepubliceerde neerslaggegevens. Om te voorkomen dat door deze veranderingen een inhomogeniteit in de tijdreeksen van de  $E_0$ -getallen zou ontstaan zijn toen de in tabel C.1 vermelde statistische correctietermen ingevoerd. Deze bedragen ongeveer tien procent van de berekende  $E_0$ -waarden bedragen. Sinds 1971 vonden in het klimatologische stationsnet wijzigingen plaats, waardoor het aantal stations, waarvoor op deze wijze gecorrigeerde  $E_0$ -getallen konden worden bepaald, afnam tot 12 stations in 1986. Om toch voor 15 stations verdampingsgegevens in combinatie met neerslaggegevens te kunnen blijven publiceren werden voor de ontbrekende stations de verdampingsgetallen bepaald door interpolatie tussen gegevens van deze 12 stations.

Tabel C.1 Correctietermen voor  $E_0$ -waarden

\*Correcties\* Penman-verdamping ( $E_p$ ) etmaal  $\rightarrow$  overdag gemiddelden per decade (toeslagen in mm)

	januari			februari			maart			april			mei			juni			juli			augustus			september			oktober			november			december		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III			
De Kooy	0	0	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,2	2,1	1,9	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,4	0,4	0,2	0	0	0	0	0
Den Helder	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,8	1,2	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0	0	0	0	0
Leeuwarden	0	0	0	0	0,1	0,2	0,7	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,7	2,5	2,0	1,7	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0	0	0	0	0
Eelde	0	0	0	0	0,2	0,5	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4	3,5	3,6	3,5	3,4	3,4	3,0	2,6	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4	1,0	0,8	0,6	0,3	0,1	0	0	0	0
Hoorn (N.H.)	0	0	0	0	0,1	0,3	0,6	1,1	1,2	1,3	1,5	1,8	2,4	2,8	2,9	3,1	3,1	2,9	2,9	2,7	2,5	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,1	0,9	0,7	0,5	0,2	0	0	0	0	0
Lelystad	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,4	1,6	2,0	2,7	3,3	3,5	3,5	3,4	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,3	1,1	0,9	0,7	0,5	0,2	0	0	0	0	0	0
Dedensvaart	0	0	0	0	0,3	0,8	1,3	1,9	2,1	2,4	2,7	2,9	3,0	3,2	3,5	3,6	3,6	3,5	3,4	3,2	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,0	0,6	0,4	0,2	0	0	0	0	0
Maalwijk	0	0	0	0	0,2	0,4	0,7	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,8	1,6	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0	0	0	0	0
De Bilt	0	0	0	0	0,2	0,8	1,8	2,4	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5	3,5	3,4	3,0	2,6	2,4	2,3	2,0	1,7	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0	0	0	0
Winterswijk	0	0	0	0	0,2	0,9	1,8	2,3	2,5	2,7	3,1	3,5	3,6	3,7	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7	2,5	2,2	2,0	1,8	1,5	1,1	0,7	0,5	0,4	0,2	0	0	0	0	0
Andel	0	0	0	0	0,2	0,8	1,8	2,4	2,5	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,4	3,2	2,9	2,7	2,4	2,1	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0	0	0	0
Vlissingen	0	0	0	0	0	0,3	1,2	1,5	1,6	1,7	1,8	2,1	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,2	2,0	1,8	1,5	1,0	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0	0
Oudenbosch	0	0	0	0	0,2	0,9	1,8	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6	3,4	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,5	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1	0	0	0	0
Gemert	0	0	0	0	0,2	0,8	1,9	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,5	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0	0	0	0
Venlo	0	0	0	0	0,2	0,8	1,9	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,5	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0	0	0	0
Beek (L.)	0	0	0	0	0,2	0,8	1,8	2,4	2,6	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,1	2,8	2,7	2,6	2,5	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	0,7	0,4	0,1	0	0	0

#### 4 Overige in publikaties opgenomen verdampingsreeksen

In par. 2 zijn de door Kramer berekende  $E_o$ -reeksen reeds besproken. Daarnaast zijn, over het tijdvak 1911 - 1975, tijdreeksen voor de open waterverdamping gepubliceerd door De Bruin (1979) en voor de periode 1911 - 1979 door Buishand en Velds (1980). Door De Bruin zijn de tijdreeksen voor zes stations over de tijdvakken 1911 - 1932 en 1954 - 1955 berekend. Voor de tijdvakken 1933 - 1953 en 1956 - 1975 heeft hij deze ontleend aan de publikatie van Kramer (1957) en aan de klimatologische maandoverzichten. Door Buishand en Velds zijn een 12-tal tijdreeksen samengesteld uit de verschillende beschikbare gegevens. Bij de selectie van de gegevens is in deze publikaties bijzondere aandacht besteed aan de statistische homogeniteit van de reeksen. Dit leidde er toe dat stations met inhomogene reeksen niet werden opgenomen. (De inhomogeniteiten van de reeksen worden vooral veroorzaakt door inhomogeniteiten in de klimatologische basisgegevens). Bij de publikatie van Buishand en Velds valt nog op te merken dat zij een aantal reeksen van goede kwaliteit hebben kunnen construeren uit de gegevens van enkele op niet te grote afstand van elkaar gelegen stations. Van de in fig. C.2 omcirkelde stations zijn de gegevens tot één reeks samengevat.



Figuur C.2 De stations waarop de reeksen van Buishand en Velds betrekking hebben

Uit het bovenstaande blijkt dat bij het gebruik van gegevens uit de klimatologische maandoverzichten die niet in de genoemde publikaties zijn opgenomen, voorzichtigheid t.a.v. de kwaliteit van de gegevens geboden is.





BIJLAGE D

- 1 Decadewaarden van  $E_o$  (Penman) en  $E_r$  (Makkink) over de periode 1965 - 1985 voor het station De Bilt.

Inleiding

In hoofdstuk 2 is de vergelijking van 21-jarige reeksen van de Penmanverdamping ( $E_o$ ) en de referentie-gewasverdamping ( $E_r$ ) voor het groeiseizoen gepresenteerd in de vorm van gemiddelden en regressie- en correlatiecoëfficiënten. De  $E_r$ -getallen worden sinds april 1987 in de klimatologische maandoverzichten van het KNMI vermeld, in plaats van  $E_o$ -getallen. Om aan de gebruikers van deze gegevens een goed inzicht te geven, ook wat betreft de wintermaanden, zijn de volledige 21-jarige reeksen van de dekadesommen voor het station De Bilt weergegeven. Voor de andere stations zijn de gegevens verkrijgbaar bij de Klimatologische Dienst van het KNMI. Van de referentie-gewasverdamping zijn ook daggetallen beschikbaar.

JAAR	MAAND	PENMAN			MAKKINK		
		DEC. 1	DEC. 2	DEC. 3	DEC. 1	DEC. 2	DEC. 3
1965	1	-1	4	1	2	2	3
1965	2	2	6	4	5	6	4
1965	3	9	15	18	8	11	14
1965	4	18	21	21	13	15	16
1965	5	27	36	35	17	29	29
1965	6	32	34	45	24	26	35
1965	7	32	35	34	25	26	22
1965	8	33	33	25	29	30	21
1965	9	19	17	16	16	16	15
1965	10	12	7	7	14	9	10
1965	11	3	1	2	6	3	3
1965	12	2	0	-1	2	2	3
1966	1	1	0	1	3	3	2
1966	2	3	3	8	3	3	7
1966	3	8	12	15	6	8	9
1966	4	16	15	28	11	8	24
1966	5	36	41	41	27	33	31
1966	6	43	42	35	35	31	22
1966	7	34	29	37	28	20	28
1966	8	31	37	28	22	31	22
1966	9	22	20	13	18	17	11
1966	10	9	9	6	7	9	8
1966	11	3	2	1	5	3	2
1966	12	1	0	1	2	2	2

De Bilt

1967	1	-1	1	2	3	2	3
1967	2	3	7	9	4	6	6
1967	3	12	15	19	7	9	12
1967	4	17	25	30	12	20	26
1967	5	34	36	37	28	28	29
1967	6	34	42	36	28	35	27
1967	7	42	46	41	32	37	33
1967	8	34	25	31	28	19	29
1967	9	20	14	16	15	12	15
1967	10	12	11	8	8	9	8
1967	11	5	1	0	5	4	2
1967	12	0	-1	1	2	2	2
1968	1	-1	1	1	2	3	2
1968	2	3	4	4	3	5	5
1968	3	9	17	25	6	10	19
1968	4	20	31	27	15	25	21
1968	5	24	26	39	17	17	30
1968	6	34	42	34	24	31	22
1968	7	43	34	38	32	26	28
1968	8	26	26	34	21	21	28
1968	9	21	16	15	20	13	12
1968	10	8	9	6	6	9	8
1968	11	4	1	1	3	3	3
1968	12	1	-1	0	1	2	3
1969	1	1	2	3	2	2	3
1969	2	2	3	5	5	4	4
1969	3	12	10	18	10	5	12
1969	4	29	24	28	23	16	20
1969	5	28	33	39	20	22	31
1969	6	44	47	37	33	36	26
1969	7	35	40	43	26	32	33
1969	8	47	30	25	37	22	19
1969	9	24	24	19	21	20	17
1969	10	13	8	9	14	12	7
1969	11	9	7	2	4	4	3
1969	12	-1	0	2	3	2	2
1970	1	1	0	1	2	2	3
1970	2	4	4	6	5	5	5
1970	3	9	14	19	9	8	12
1970	4	15	20	24	11	15	15
1970	5	35	35	36	28	27	29
1970	6	56	53	39	42	40	28
1970	7	39	32	38	28	22	28
1970	8	35	31	35	28	25	32
1970	9	24	20	18	18	18	18
1970	10	12	8	9	9	10	6
1970	11	7	4	1	5	4	4
1970	12	0	0	-1	2	1	3
1971	1	-1	1	4	2	3	2
1971	2	3	5	6	3	5	5
1971	3	8	14	16	7	10	12
1971	4	18	22	29	15	17	22
1971	5	42	39	35	31	31	28
1971	6	40	30	40	30	19	31
1971	7	52	40	35	42	32	27
1971	8	33	29	31	26	22	25
1971	9	28	19	14	25	18	13
1971	10	12	11	8	15	9	11
1971	11	5	2	1	6	3	2
1971	12	0	1	0	2	2	3
1972	1	0	2	1	2	2	3
1972	2	3	5	4	5	4	5
1972	3	11	19	22	10	16	15
1972	4	20	21	26	11	16	18

De Bilt

1972	5	33	29	39	25	21	26
1972	6	33	40	33	25	31	24
1972	7	30	49	28	20	38	19
1972	8	30	28	29	24	25	26
1972	9	22	18	15	19	16	15
1972	10	13	8	7	15	9	7
1972	11	3	3	2	3	4	3
1972	12	3	-1	-1	3	3	2
1973	1	-1	0	1	1	2	3
1973	2	2	4	5	3	4	6
1973	3	10	14	18	9	11	16
1973	4	21	20	25	13	15	20
1973	5	27	38	38	18	31	30
1973	6	35	46	55	27	38	42
1973	7	48	30	34	40	22	26
1973	8	36	38	33	29	35	30
1973	9	23	23	13	20	20	12
1973	10	11	6	5	12	7	8
1973	11	3	3	0	4	5	3
1973	12	-1	2	0	3	2	2
1974	1	-1	3	1	2	2	4
1974	2	4	6	5	5	6	6
1974	3	8	11	20	7	8	19
1974	4	32	29	23	27	25	17
1974	5	24	39	36	17	33	29
1974	6	38	44	36	29	37	31
1974	7	33	32	38	25	24	29
1974	8	31	32	32	25	29	30
1974	9	22	19	13	16	18	9
1974	10	9	6	5	11	9	6
1974	11	2	3	2	4	3	2
1974	12	2	2	2	1	2	3
1975	1	0	2	3	2	3	3
1975	2	2	5	7	7	6	8
1975	3	10	11	16	6	5	13
1975	4	17	17	26	12	10	22
1975	5	31	31	40	22	27	31
1975	6	43	43	40	34	36	30
1975	7	46	36	43	38	27	35
1975	8	57	35	34	44	28	30
1975	9	23	20	20	20	16	17
1975	10	12	8	4	12	9	7
1975	11	2	1	1	5	3	3
1975	12	0	-3	1	2	3	1
1976	1	4	2	1	2	2	4
1976	2	1	5	5	3	5	7
1976	3	12	13	18	12	10	12
1976	4	20	29	31	16	26	24
1976	5	39	38	37	29	30	30
1976	6	44	41	62	34	33	48
1976	7	64	39	34	50	29	27
1976	8	33	41	41	28	35	34
1976	9	20	17	16	17	15	14
1976	10	11	9	6	9	9	7
1976	11	4	1	2	4	2	2
1976	12	-1	0	-1	3	2	3
1977	1	-1	0	1	2	2	4
1977	2	3	5	5	5	5	6
1977	3	13	15	17	12	12	13
1977	4	17	22	26	13	18	17
1977	5	24	34	57	17	24	44
1977	6	32	33	31	23	22	25
1977	7	47	37	32	37	30	22
1977	8	25	22	28	22	19	25
1977	9	21	19	14	19	18	11

## De Bilt

1977	10	12	7	5	11	12	6
1977	11	5	4	1	6	3	3
1977	12	-1	0	3	3	2	2
1978	1	1	1	3	2	2	3
1978	2	3	4	6	3	6	6
1978	3	11	15	17	9	8	11
1978	4	21	22	27	17	18	24
1978	5	27	30	39	21	23	30
1978	6	44	42	29	34	33	18
1978	7	27	34	45	17	29	37
1978	8	25	31	27	19	28	23
1978	9	22	21	13	19	15	9
1978	10	10	8	6	9	10	6
1978	11	2	3	1	4	5	3
1978	12	1	1	1	2	2	1
1979	1	0	0	0	2	3	2
1979	2	2	4	3	5	3	4
1979	3	12	11	19	9	7	12
1979	4	19	26	21	15	18	14
1979	5	28	36	37	23	27	27
1979	6	38	34	38	28	25	28
1979	7	36	30	37	31	22	28
1979	8	30	23	29	23	19	25
1979	9	24	20	17	22	14	16
1979	10	12	7	9	12	7	9
1979	11	3	1	2	5	3	3
1979	12	3	2	0	2	2	1
1980	1	0	-1	2	1	3	3
1980	2	4	4	5	3	6	5
1980	3	9	12	17	6	6	12
1980	4	18	30	21	13	24	15
1980	5	39	53	36	29	39	27
1980	6	40	36	32	31	25	23
1980	7	26	27	44	18	17	36
1980	8	33	26	27	26	22	21
1980	9	24	22	14	22	18	14
1980	10	11	7	7	11	8	7
1980	11	3	5	4	5	3	2
1980	12	0	2	1	3	2	2
1981	1	0	0	0	2	3	2
1981	2	4	3	5	3	5	6
1981	3	8	11	21	4	7	12
1981	4	18	29	22	13	23	14
1981	5	29	37	36	21	30	29
1981	6	39	32	28	31	22	18
1981	7	36	32	34	29	26	28
1981	8	32	29	25	27	26	24
1981	9	26	17	17	26	14	15
1981	10	13	6	5	11	5	7
1981	11	3	2	4	5	4	2
1981	12	-1	-2	0	2	2	2
1982	1	0	-2	1	2	4	3
1982	2	3	5	5	5	6	5
1982	3	11	15	17	9	11	15
1982	4	22	27	25	18	25	21
1982	5	29	40	44	22	34	36
1982	6	49	30	37	40	21	28
1982	7	41	51	41	34	41	33
1982	8	37	32	26	32	26	22
1982	9	23	21	18	21	21	15
1982	10	9	9	6	10	8	8
1982	11	6	3	2	4	4	2
1982	12	0	1	0	2	2	2

De Bilt

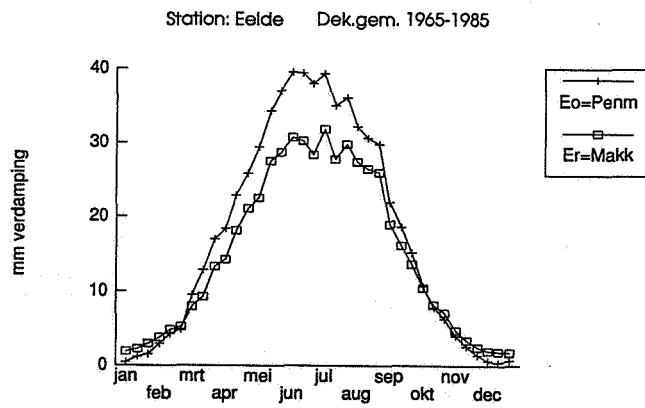
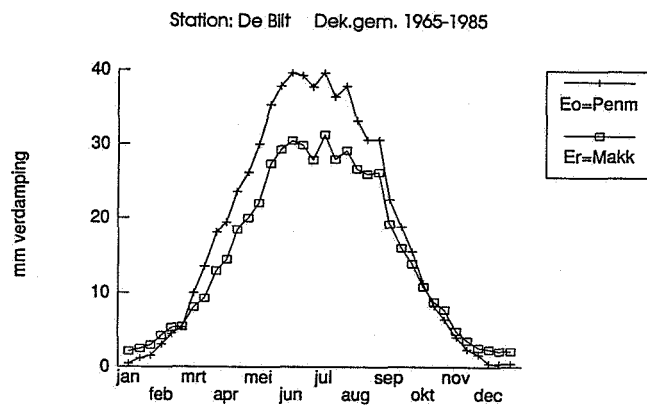
1983	1	2	4	3	2	2	3
1983	2	3	4	7	4	7	6
1983	3	10	13	16	9	9	11
1983	4	16	23	24	12	18	19
1983	5	26	26	26	19	20	17
1983	6	45	44	41	36	36	32
1983	7	45	46	44	39	38	36
1983	8	31	32	37	24	28	32
1983	9	23	18	17	16	12	16
1983	10	13	11	4	10	9	9
1983	11	2	0	1	7	4	3
1983	12	-2	-1	2	3	3	2
1984	1	2	3	1	3	2	3
1984	2	5	4	4	4	7	3
1984	3	9	15	17	8	12	11
1984	4	13	23	41	8	21	33
1984	5	24	32	26	17	23	17
1984	6	29	39	36	21	31	26
1984	7	37	28	38	30	19	31
1984	8	30	34	35	25	31	28
1984	9	21	14	12	15	10	11
1984	10	9	9	8	8	8	9
1984	11	4	2	3	6	4	3
1984	12	-1	0	-1	3	2	2
1985	1	-1	0	1	2	2	4
1985	2	4	5	4	6	7	4
1985	3	7	11	17	7	10	10
1985	4	22	20	26	15	15	20
1985	5	24	33	42	16	26	36
1985	6	42	32	29	31	21	21
1985	7	42	38	38	36	30	26
1985	8	29	28	30	23	25	25
1985	9	21	18	15	18	14	15
1985	10	13	7	5	12	8	8
1985	11	5	1	0	5	4	2
1985	12	3	2	0	2	1	2

## Decadegemiddelden per maand van De Bilt 1965 - 1985

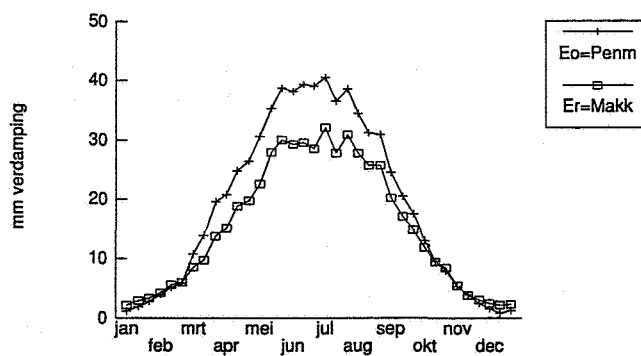
	Penman			Makkink		
	I	II	III	I	II	III
jan	0	1	2	2	2	3
feb	3	5	5	4	5	5
mrt	10	13	18	8	9	13
apr	19	24	26	14	18	20
mei	30	35	38	22	27	29
jun	40	39	38	30	30	28
jul	40	36	38	31	28	29
aug	33	31	31	27	26	26
sep	23	19	15	19	16	14
okt	11	8	6	11	9	8
nov	4	2	2	5	4	3
dec	0	0	0	2	2	2

- 2 De gemiddelde decadewaarden van  $E_o$  en  $E_r$  voor de periode 1965 - 1985 voor de stations De Bilt, Eelde, Beek, Den Helder/De Kooy en Vlissingen

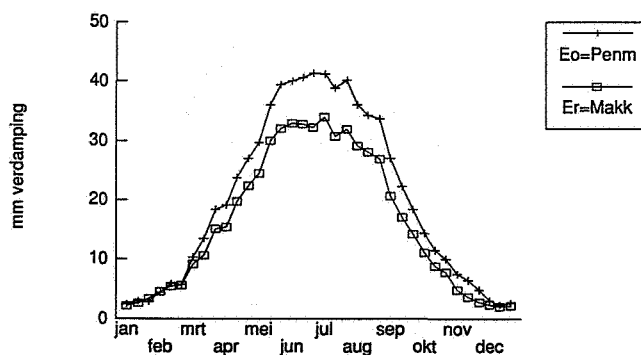
Opmerking: Alleen de stations De Bilt, Eelde en Beek (landstations) zijn gebruikt voor de bepaling van de gewasfactoren  $f$ .



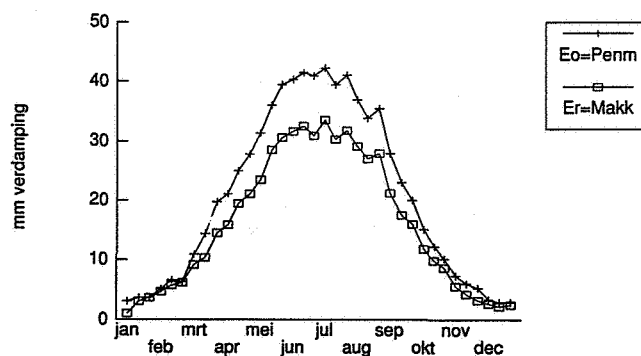
Station: Beek (I) Dek.gem. 1965-1985



Station: De Kooy Dek.gem. 1965-1985



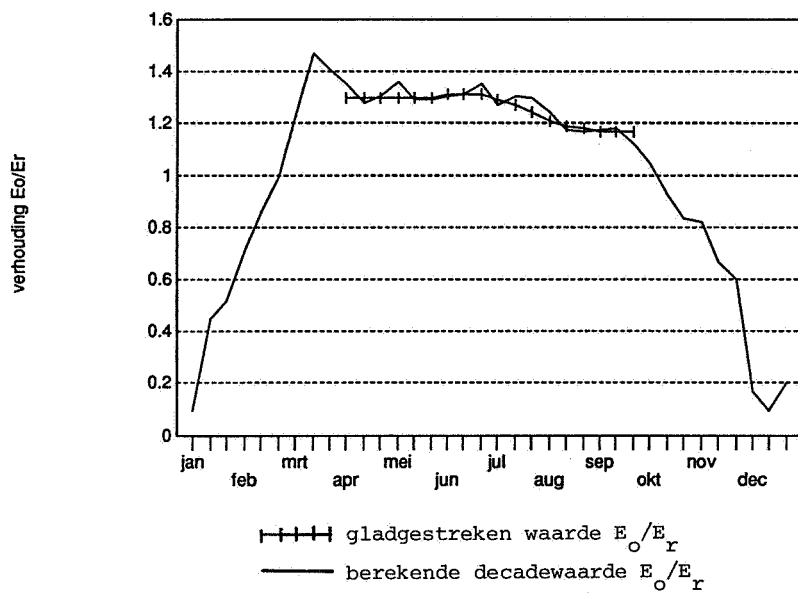
Station: Vlissingen Dek.gem. 1965-1985





- 3 De gemiddelde decadewaarden van  $E_o/E_r$  over de periode 1965-1985  
 Voor het station De Bilt en de "gladgestreken" waarden van  $E_o/E_r$ .  
 Opmerking: De gladgestreken waarden zijn afgeleid uit de gegevens  
 van De Bilt, Eelde en Beek (zie 2.3)

Station: De Bilt; Dekadegem. 1965-1985





## Aantekeningen

Aantekeningen

RAPPORTEN EN NOTA'S  
COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

- No. 1. Tweede rapport en aanbevelingen van de Contactgroep  
Archivering en Automatische Verwerking van hydrologische  
gegevens TNO.  
Januari 1977
- No. 2. Verslag en aanbevelingen van de ad hoc Groep  
Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur TNO.  
Juli 1978
- No. 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
- No. 4. Nederlandse activiteiten in internationaal hydrologisch  
verband.  
Lezingenserie, gehouden op 25 april 1978 te Delft, aangevuld  
met (schematische) overzichten van internationale organisaties  
en een overzicht van hun vertegenwoordigers in Nederland.  
Augustus 1978
- No. 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 onderzoek in Nederland.  
Augustus 1980
- No. 6. Derde rapport en aanbevelingen van de Contactgroep Archivering  
en Automatische verwerking van hydrologische gegevens TNO.  
Februari 1981
- No. 7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten  
aanzien van het operationele regenwaarnemingennet van het KNMI  
- J.C. Hooghart.  
Oktober 1981

- No. 8. \*) Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep  
Hydrologische Terminologie.  
8a. I Water in de onverzadigde zone  
    II Water in de verzadigde zone  
        Januari 1982  
8b. III Atmosferisch water  
        Juni 1983  
8c. IV Oppervlaktewater  
        Maart 1985
- No. 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.
- No. 10. Rapport en aanbevelingen van de Contactgroep  
Grondwatermodellen, CHO-TNO  
April 1982.
- No. 11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen.  
L.J.M. Boumans  
Oktober 1982
- No. 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
- No. 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/april 1985

\*) Verouderd, zie de nieuwe uitgave no. 16.

- No. 14. Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het waterbeheer.  
Een verslag van:  
- Voorjaarsbijeenkomst van de KIVI Sectie Waterbeheer:  
"Meten voor waterbeheer", mei 1984.  
- Colloquium van de Studiegroep Statistiek in de hydrologie  
CHO-TNO: "Meetnetontwerp en optimalisatie", november 1984  
Februari 1986
- No. 15. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht.  
Le système hydrologique dans la région frontalière  
Liège-Maasbracht.  
Een verslag van de 5e CHO-studiebijeenkomst op 13 december  
1985 in samenwerking met de Nationale IHP-comité's van België  
en Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal  
Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België - (J.C.  
Hooghart).  
April 1986
- No. 16. Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep  
Hydrologische Terminologie, waarin opgenomen de hoofdstukken:  
I Algemene termen  
II Atmosferisch Water  
III Water in de onverzadigde zone  
IV Water in de verzadigde zone  
V Oppervlaktewater  
Oktober 1986, hernieuwde uitgave
- No. 17. Duurzaamheid rioolleidingen; een literatuurstudie naar  
aantastingsmechanismen.  
R.B. Polder  
Februari 1987
- No. 18. Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water.  
Een verslag van de 6e CHO-studiebijeenkomst op 22 oktober 1986  
- (J.C. Hooghart)  
Februari 1987

- No. 19. Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen.  
Eindrapport van de project- en begeleidingsgroep  
Verdampingsberekeningen - (J.C. Hooghart en W.N. Lablans)  
December 1988
- No. 20. Tijdreeksen in bodem en water.  
Bijdragen aan de lezingendag op 26 januari 1989 van de NRLO werkgroep "Ruimtelijke variabiliteit in Bodem en Water" en de Studiegroep Statistiek in de Hydrologie van de CHO-TNO.  
December 1988

Voor bestellingen en informatie:

CHO-TNO  
Postbus 297  
2501 BD 's-Gravenhage