

van Penman naar Makkink:
een nieuwe berekeningswijze
voor de klimatologische
verdampingsgetallen

red. J.C. Hooghart en W.N.Lablans

Technische rapporten; TR-111

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 Verdampingsberekeningen	49
C - Overzicht van de op het KNMI berekende tijdreeksen van de verdamping volgens Penman	51
D - 1 Decadewaarden 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 ⁻¹)
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:

λ = specifieke verdampingswarmte van water	(J.kg ⁻¹)
E = evapotranspiratie	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
Q^* = netto stralingsstroomdichtheid	(W.m ⁻²)
G = bodemwarmte stroomdichtheid	(W.m ⁻²)
ρ_a = dichtheid van lucht op waarnemingshoogte	(kg.m ⁻³)
c_p = specifieke warmte per eenheid massa van de lucht bij constante druk	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
r_a = aerodynamische weerstand voor waterdamptransport	(s.m ⁻¹)
γ = psychrometerconstante	(mbar.K ⁻¹)
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 (Rothemsted). 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 verdampingspannen, 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:

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

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_w^* 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 α 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 stralingsstroombichtheid (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 , γ en λ . 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:

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

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 decade¹⁾ 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^e t/m 10^e, de 11^e t/m 20^e en de 21^e 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 (mm/dec)	Penman (mm/dec)	Mak/Pen -	Pen/Mak -	A'' -	A' -	B (mm/dec)	R -	s_e (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 Kooy (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.

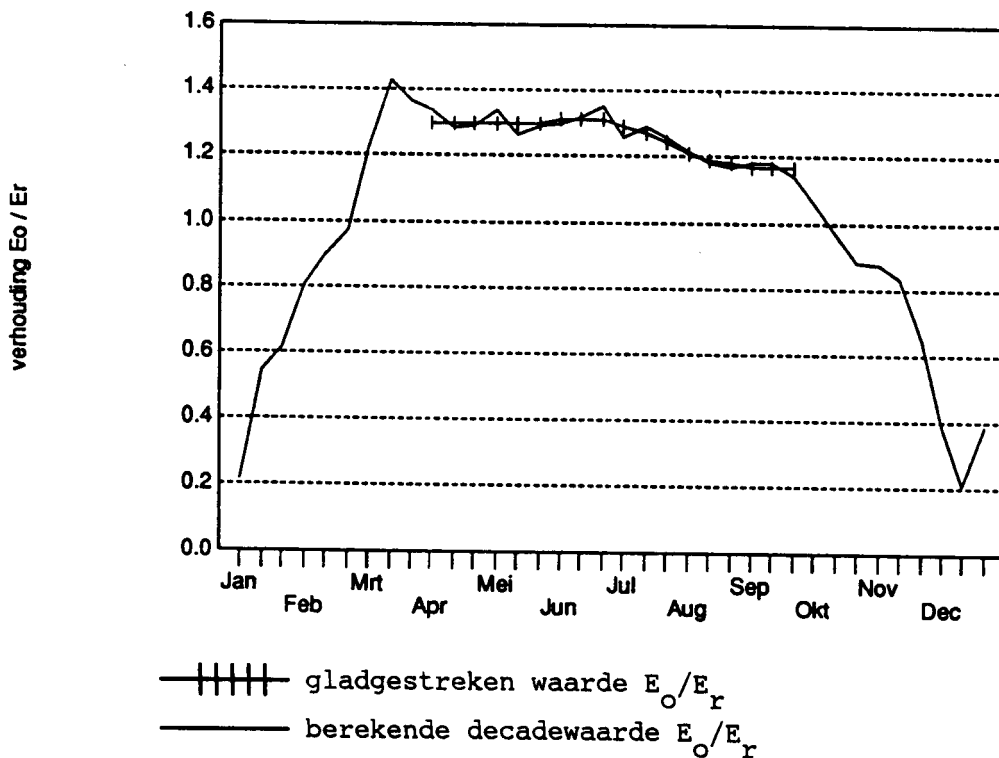
Tabel 2

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 ⁻¹)	E_o (mm decade ⁻¹)	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.

3.1 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 grootte 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	-	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-
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
Knolselderij	-	-	-	-	-	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	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	1.1	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	-	-	-	-	-
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	1.1
Prei	-	-	-	-	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/knolgewassen	-	-	-	-	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 beregeningsproeven 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):

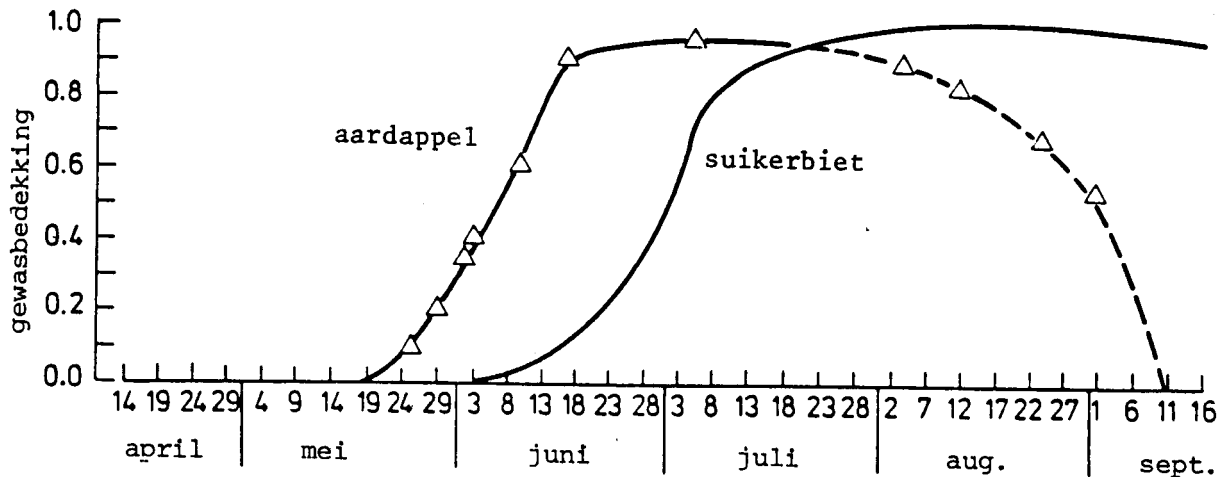
$$\frac{\Delta V_r}{\Delta t} = F + Q_r - E$$

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 ΔV_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

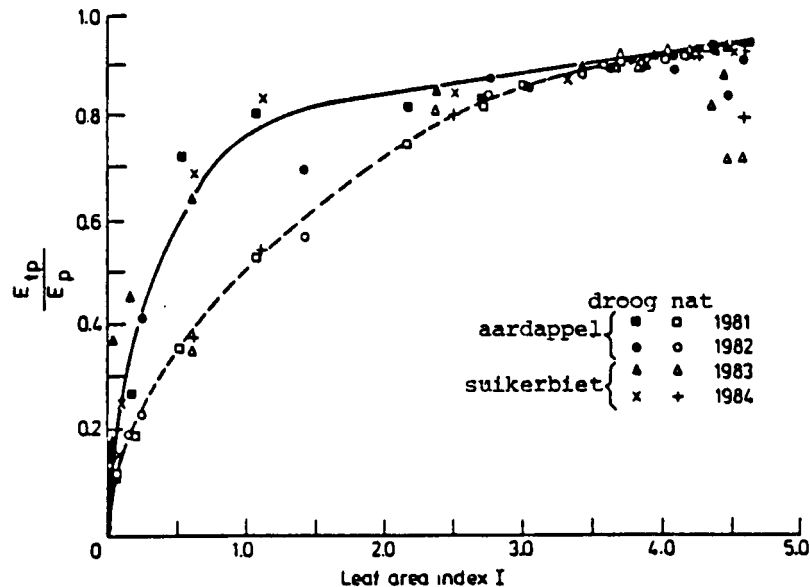
Een aspect bij beregende proefvelden waar ook rekening mee moet worden gehouden is dat gedurende de meeste tijd het grondoppervlak droog is, terwijl het gewas nog steeds goed van water is voorzien. Dan verandert verg. (10) in:

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

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 advection, 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:

$$\begin{aligned} \rho_w &= \text{dichtheid van water} && (\text{kg.m}^{-3}) \\ c_w &= \text{specifieke warmte per eenheid massa van} \\ &\quad \text{water bij constante druk} && (\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}) \\ h &= \text{waterdiepte} && (\text{m}) \\ T_w &= \text{de watertemperatuur gemiddeld over de} \\ &\quad \text{diepte} && (\text{K}) \end{aligned}$$

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** τ 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:

σ = de Stephan-Boltzmann constante (W.m⁻².K⁻⁴)

T_n = natte bol temperatuur (K)

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

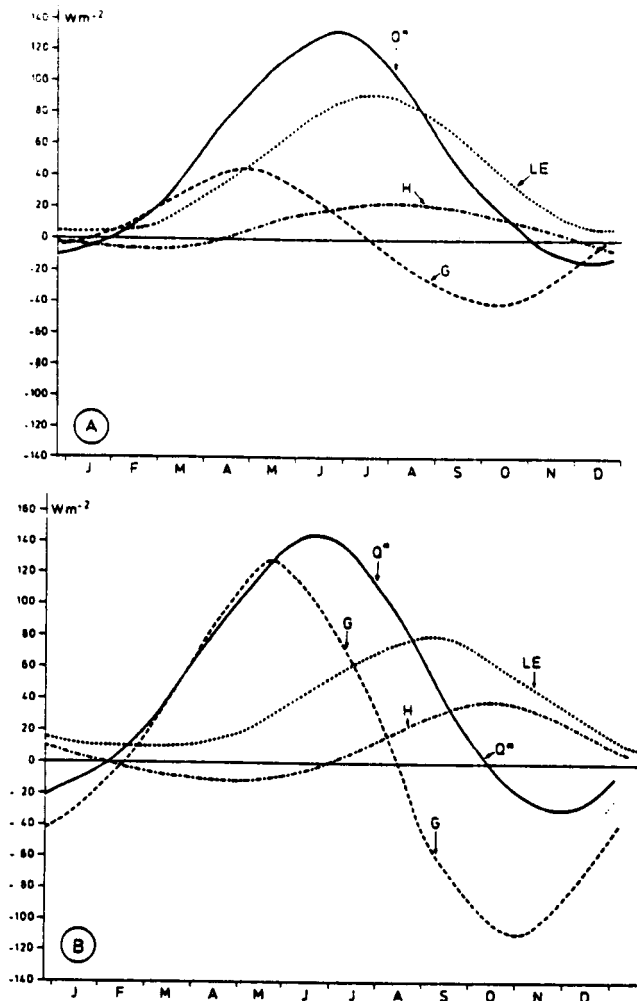
Met behulp van verg. (18) is T_w en daarmee ook G uit te rekenen. Het probleem is echter dat deze meteorologische waarnemingen boven het wateroppervlak zelf moeten worden uitgevoerd. In de praktijk zijn deze gegevens echter alleen beschikbaar van nabij gelegen landstations. Dit probleem kan worden opgelost 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} = 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 λE 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_0 -waarden 10-15% groter dan de werkelijke jaarlijkse verdamping van open water. De jaarlijkse waarden van E_0 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):

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

E_p

waarin:

r_s = gewasweerstand (s.m⁻¹)

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 onderzoeken 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 s.m^{-1} (zie o.a. Russell, 1980). Voor bossen is r_s ongeveer 150 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 grootheid 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 grootheid 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 grootheid 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 λE_r , volgens Makkink en λE_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^\dagger) 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^\dagger (Wm^{-2})	Q^* (Wm^{-2})	λE_r (Wm^{-2})	λE_p (Wm^{-2})	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 λE_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 ⁻¹)	Penman (mm decade ⁻¹)	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_0) 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 zonneshijnmeters 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_0 -getallen beschikbaar kwamen. Om verwarring tussen de referentie-verdamping en de E_0 -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 werkspraak:

- 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.

- 1 De verdampingsgetallen (E_0 -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_0 -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_0 ;
 - 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.
Wetenschappelijk Rapport 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, 1988. Evaporation in arid and semi-arid regions.
Proc. NATO Advanced Res. Workshop on Estimation of natural recharge of groundwater, Antalya (Side), Turkey, 8-15 March 1987.
Ed.J. Simmers; 73-89.
- 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.
Wetenschappelijk Rapport W.R. 77-10. KNMI, De Bilt, 11 p.
- BRUIN, H.A.R. DE and W. KOHSIEK, 1979. Toepassingen van de Penman-
formule.
Wetenschappelijk Rapport 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.
- BUISSHAND, 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.
Scientific Report KNMI 87-02.
- 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
tranpiration: scaling up from leaf to region.
Advances in Ecological Research, 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. Inst. 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.
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. London 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. Weath. 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. H₂O ,18: 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. Verdampingsonderzoek in Nederland 1942-1971. 's-Gravenhage, RWS, Dienst Getijdewateren, 1985. 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, 85: 88-90.

BIJLAGE A

LIJST VAN DE GEBRUIKTE SYMBOLEN

α	= een coëfficiënt met de waarde van ongeveer 1,2 - 1,3 in de formule van Priestley en Taylor	
γ	= psychrometerconstante	(mbar.K ⁻¹)
λ	= specifieke verdampingswarmte van water	(J.kg ⁻¹)
ρ_a	= dichtheid van lucht	(kg.m ⁻³)
ρ_w	= dichtheid van water	(kg.m ⁻³)
σ	= Stephan-Boltzmannconstante	(W.m ⁻² .K ⁻⁴)
τ	= tijdconstante	
c_p	= specifieke warmte per eenheid massa van de lucht bij constante druk	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
c_w	= specifieke warmte per eenheid massa van water bij constante druk	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
e_a	= dampdruk bij temperatuur T_a	(mbar)
e_s	= verzadigingsdampdruk	(mbar)
f	= gewasfactor behorende bij de Makkinkformule	
$f(u)$	= functie van de windsnelheid, gedefinieerd als $f(u) = 3,7 + 4,0 u_2$	(W.m ⁻² .mbar ⁻¹)
g	= gewasfactor behorende bij de Penmanformule	
h	= waterdiepte	(m)
r	= albedo van het oppervlak, hier aangenomen als 0,23	
r_a	= aerodynamische weerstand voor waterdamptransport	(s.m ⁻¹)
r_s	= gewasweerstand	(s.m ⁻¹)
rv	= relatieve vochtigheid	
s	= helling van de verzadigingsdampdrukcurve	(mbar.K ⁻¹)
s_e	= standaardfout	
u_2	= gemiddelde windsnelheid op 2 m hoogte	(m.s ⁻¹)
u_{10}	= gemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte	(m.s ⁻¹)
A	= warmte-uitwisselingscoëfficiënt	
A, A''	= regressieconstanten	
B	= intercept	

C, C_1	= constanten in de Makkinkformule	
C_2		
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 ⁻¹)
E_i	= de verdamping van het interceptiewater	(mm.d ⁻¹)
E_{max}	= de grootst mogelijke verdamping van een begroeid oppervlak	(mm.d ⁻¹)
E_o	= het verdampingsgetal berekend volgens de Penmanformule	(mm.d ⁻¹)
E_p	= de potentiële evapotranspiratie	(mm.d ⁻¹)
E_r	= de referentie-gewasverdamping, berekend volgens de Makkinkformule	(mm.d ⁻¹)
E_t	= de transpiratie via de huidmondjes en cuticula van een droog bladoppervlak van een gewas	(mm.d ⁻¹)
E_{tp}	= de potentiële transpiratie	(mm.d ⁻¹)
E_s	= de verdamping van de bodem	(mm.d ⁻¹)
E_{sp}	= de potentiële bodemverdamping	(mm.d ⁻¹)
E_w	= de verdamping van een nat gewas	(mm.d ⁻¹)
F	= infiltratie	(mm.d ⁻¹)
G	= bodemwarmte stroomdichtheid	(W.m ⁻²)
H	= voelbare-warmte stroomdichtheid	(W.m ⁻²)
I	= de verhouding van het totale bladoppervlak t.o.v. het bodemoppervlak	
K^{\downarrow}	= globale stralingsstroomdichtheid	(W.m ⁻²)
K_o^{\downarrow}	= de globale straling bovenin in de atmosfeer	(W.m ⁻²)
Q^*	= netto stralingsstroomdichtheid	(W.m ⁻²)
Q_p^*	= netto stralingsstroomdichtheid onder potentiële omstandigheden	(W.m ⁻²)
Q_r	= de netto opwaartse stroming door de onderrand van het profiel	(mm.d ⁻¹)
Q_w^*	= de netto stralingsstroomdichtheid van een hypothetisch wateroppervlak	(W.m ⁻²)
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_b .

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 weeroverzichten 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 Kohsiek (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 tezijnertijd 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).

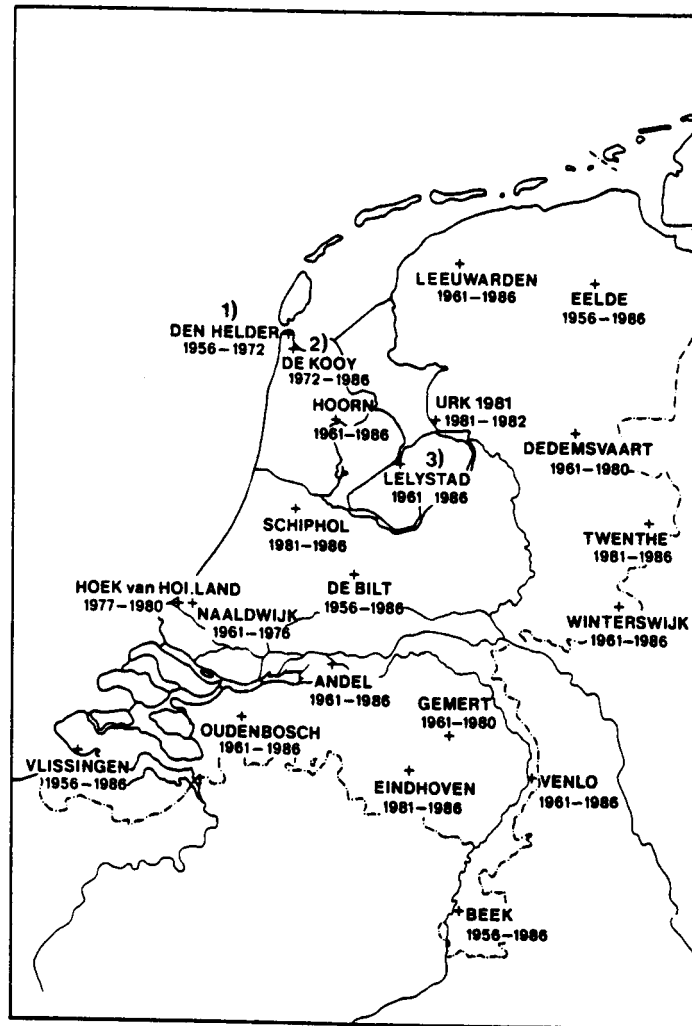
Eén van de gevolgen van Kramers beslissing is dat de notatie E_0 voor de "verdamping van open water volgens Penman" niet eenduidig is. Overigens heeft ook Penman de notatie E_0 gebruikt voor de uitkomsten van verschillende versies van zijn formule (Lablans, 1987).

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_o -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" Perman-verdamping (E.) etmaal = overdaggemiddelden 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	I	II	III
De Kooy	0	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	2.4	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	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	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	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	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	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	3.0	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	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	2.7	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	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
Dedemsvaart	0	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
Haarlem	0	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	2.4	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	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
Winterswijk	0	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
Andel	0	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
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	2.3	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	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
Gemert	0	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
Venlo	0	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
Beek (L.)	0	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

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

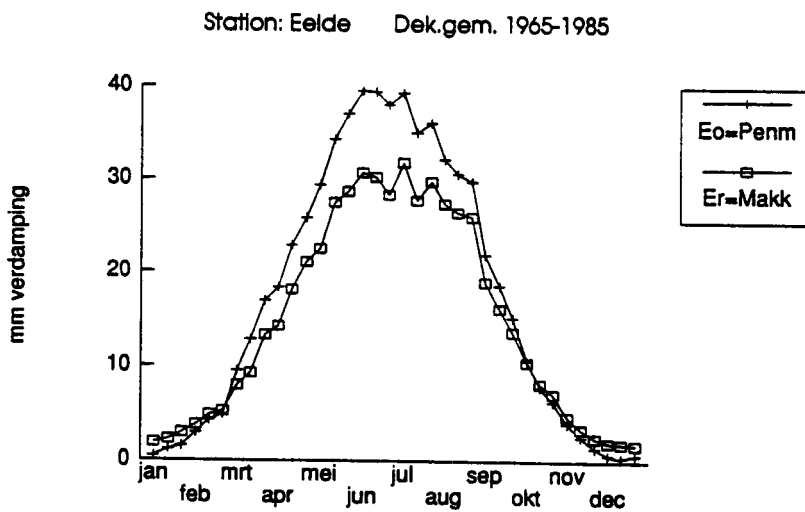
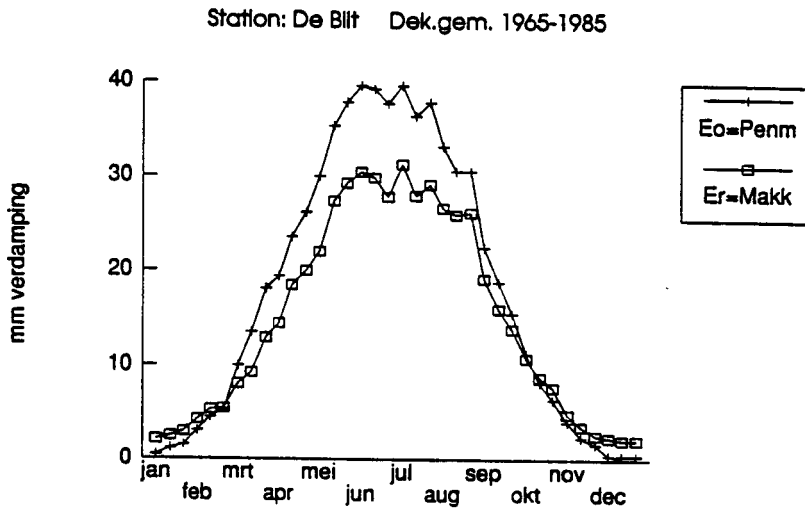
1983	1	2	4	3	2	2	3
1983	2	3	4	7	4	7	6
1983	3	10	13	16	9	9	11
1983	4	16	23	24	12	18	19
1983	5	26	26	26	19	20	17
1983	6	45	44	41	36	36	32
1983	7	45	46	44	39	38	36
1983	8	31	32	37	24	28	32
1983	9	23	18	17	16	12	16
1983	10	13	11	4	10	9	9
1983	11	2	0	1	7	4	3
1983	12	-2	-1	2	3	3	2
1984	1	2	3	1	3	2	3
1984	2	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

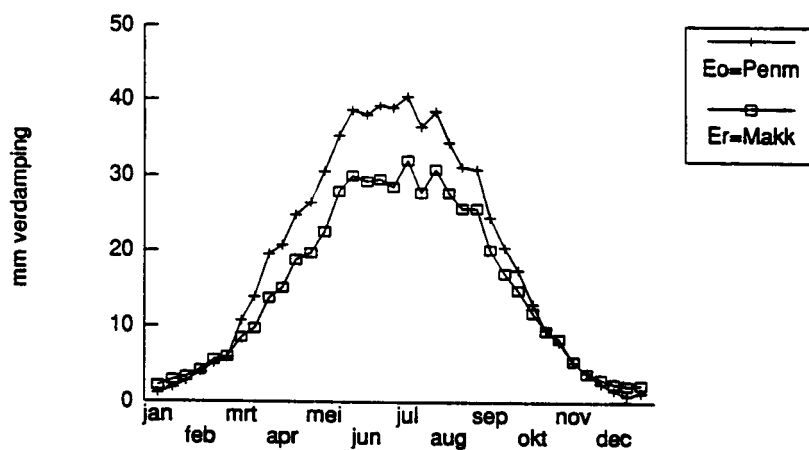
	Penman			Makkink		
	I	II	III	I	II	III
jan	0	1	2	2	2	3
feb	3	5	5	4	5	5
mrt	10	13	18	8	9	13
apr	19	24	26	14	18	20
mei	30	35	38	22	27	29
jun	40	39	38	30	30	28
jul	40	36	38	31	28	29
aug	33	31	31	27	26	26
sep	23	19	15	19	16	14
okt	11	8	6	11	9	8
nov	4	2	2	5	4	3
dec	0	0	0	2	2	2

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

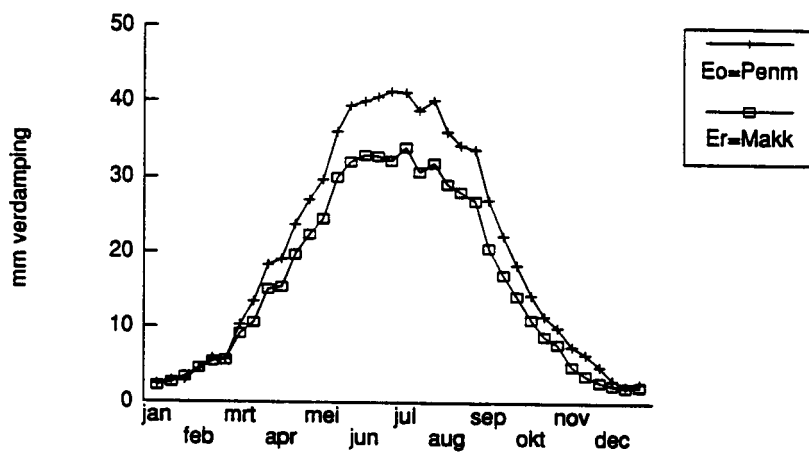
Opmerking: Alleen de stations De Bilt, Eelde en Beek (landstations) zijn gebruikt voor de bepaling van de gewasfactoren f .



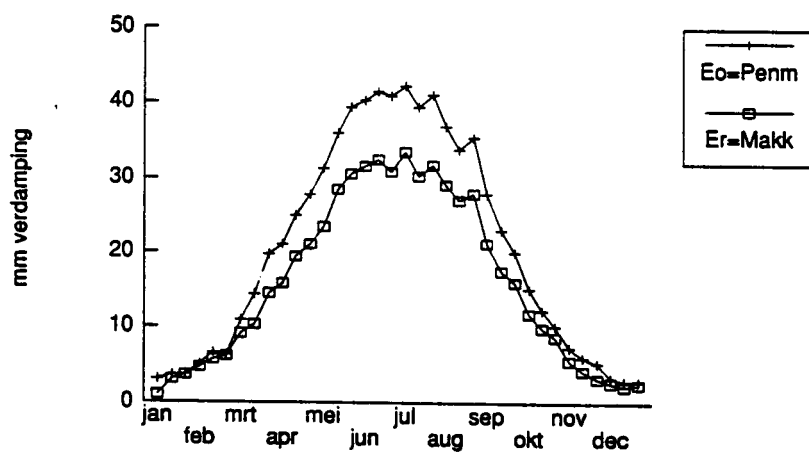
Station: Beek (I) Dek.gem. 1965-1985



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, Eeide en Beek (zie 2.3)

Station: De Bilt; Dekadegem. 1965-1985

