

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW nota 1703

april 1986



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

DE POTENTIELE VERDAMPING VAN (HALF-)NATUURLIJKE VEGETATIES

ing. P.C. Jansen

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

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

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

I N H O U D

	blz.
VOORWOORD	1
1. SAMENVATTING	2
2. INLEIDING	4
3. BEGRIPPEN	5
4. METHODEN	6
5. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN PENMAN	9
6. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN PRIESTLEY EN TAYLOR	19
7. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN RIJTEMA/MONTEITH	21
8. DE BEREKENING VAN DE POTENTIELE VERDAMPING VAN BLAUWGRAS- LAND EN LOOFBOS MET DE METHODE VAN PENMAN, PRIESTLEY EN TAYLOR EN VAN RIJTEMA/MONTEITH	27
LITERATUUR	33



VOORWOORD

De aanleiding voor deze nota vormt het project waarbij een onderzoek wordt gedaan naar de relatie tussen de vochthuishouding, de waterhuishouding en de vegetatie in natuurgebieden. Hiertoe wordt in eerste instantie het model SWATRE gebruikt dat de stroming in de onverzadigde zone simuleert. Voor dit model is de potentiële verdamping van de vegetatie een belangrijke randvoorwaarde.

Het onderzoek naar de verschillende methoden waarmee de potentiële verdamping van (half-)natuurlijke vegetaties kan worden bepaald, vormt min of meer een afgerond geheel. De belangrijkste resultaten in deze nota zijn opgenomen

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. SAMENVATTING

De verdamping van (half)-natuurlijke vegetaties vormt in meerdere opzichten een belangrijk onderdeel in landschaps-ecologische studies.

De methoden om de verdamping van een vegetatie te bepalen zijn meestal ontwikkeld ten behoeve van de landbouw. Deze methoden zijn in principe ook geschikt voor toepassing voor gebieden met min of meer natuurlijke begroeiingen. De vaak complexe vegetatiestructuur maakt dat een aantal methoden minder geschikt zijn, of dat in het geval van formules de benodigde vegetatie-specifieke factoren niet of nauwelijks bekend zijn, of dat deze moeilijk te bepalen zijn. Voor drie van dergelijke formules zijn parameters en vegetatiefactoren verzameld. Dit betreft de formules van Penman, Priestley en Taylor en die van Rijtema/Monteith. Naast een bespreking van de voor- en nadelen van deze formules zijn in een rekenvoorbeeld van elk van de drie formules voor zowel een blauwgrasland als ook voor een loofbos verdampingsberekeningen uitgevoerd. Het bleek, dat de verzamelde vegetatiefactoren vrij goed voldoen. Voor de uiteindelijke uitkomsten is de wijze waarop de verdamping van interceptiewater wordt berekend van groot belang. Indien bij de berekening van de potentiële verdamping de verdamping van interceptiewater direct wordt meebepaald, zoals bij de formule van Penman en voor korte vegetaties ook bij de formule van Priestley en Taylor gebruikelijk is, leidt dit voor heldere perioden tot een overschatting van de verdamping. Tijdens perioden met veel bewolking is het tegenovergestelde het geval. Op die wijze zijn deze methoden ongeschikt om voor een korte periode de verdamping van een vegetatie te berekenen. In dat geval dient de interceptie apart berekend te worden.

Van de afzonderlijke interceptiemodellen zijn die, waarbij de interceptie als percentage van de neerslag wordt berekend, niet geschikt voor

perioden met veel kleine of enkele grote buien. Voor veel andere methoden zijn parameters nodig, die vaak moeilijk te bepalen zijn. Die methoden zijn over het algemeen wel nauwkeuriger. Bij het rekenvoorbeeld is ook de 'Gelgam'-methode toegepast, waarbij de neerslaggegevens per dag zijn ingevoerd. Hiermee zijn goede resultaten verkregen.

Afgezien van bovengenoemde bezwaren is de methode van Penman aantrekkelijk vanwege de mogelijkheid om de open water verdamping van het KNMI te betrekken. Daardoor is het mogelijk om snel een inzicht in de grootte van de verdamping te krijgen.

Met een goed interceptiemodel kan met de formule van Priestley en Taylor ook voor korte perioden de verdamping worden berekend. Het voordeel van deze formule is, dat met een beperkte hoeveelheid meteorologische data kan worden volstaan. Meer gegevens zijn nodig voor de methode van Rijtema/Monteith. Deze methode is in principe nauwkeuriger. Het bezwaar is echter, dat er onvoldoende vegetatiekenmerken bekend zijn, waardoor met deze methode vaak (nog) niet de gewenste nauwkeurigheid wordt verkregen.

Het streven naar een optimale watervoorziening c.q. opbrengst heeft er in de landbouw toe geleid dat er de nodige aandacht aan de verdamping van de verschillende gewassen is besteed. Daarentegen is de verdamping van (half-)natuurlijke vegetatietypen slechts op beperkte schaal onderzocht. In het verleden bestond daartoe minder noodzaak. Bovendien betekende de vaak heterogene samenstelling van een vegetatie een complicerende factor.

Tegenwoordig blijkt het in meerdere opzichten van belang om de verdamping van min of meer natuurlijke begroeiingen te kennen. Zo vormt een waterbalans een goed uitgangspunt om een waterbeheersingsplan voor een natuurgebied op te stellen. In een dergelijke balans is de verdamping een belangrijke post. Ook bij meer fundamenteel onderzoek naar aspecten van de relatie vegetatie-waterhuishouding is kennis van de verdamping noodzakelijk.

In principe kan er bij de bepaling van de verdamping van (half-)natuurlijke begroeiingen van de bestaande methoden die ten behoeve van de verdamping van landbouwgewassen zijn ontwikkeld, gebruik worden gemaakt. In de praktijk blijkt echter dat een aantal methoden praktische bezwaren opleveren, terwijl andere methoden als gevolg van de afwijkende structuur van veel vegetatie-typen niet goed toepasbaar zijn. Dit laatste betreft vooral verdampingsformules.

In een overzicht zal de toepasbaarheid van de meest gangbare methoden om de potentiële verdamping van (half-)natuurlijke begroeiingen te bepalen in het kort worden aangegeven. Daarna zal er op drie formules nader worden ingegaan. Getracht is deze formules en de bijbehorende parameters en coëfficiënten in een zodanige vorm te presenteren, dat ze voor direct gebruik geschikt zijn. De voor deze formules benodigde meteorologische gegevens kunnen in eigen beheer bepaald worden, maar voor een aantal parameters zal het efficiënter/noodzakelijk zijn deze van derden te betrekken. Hierop zal vrij uitgebreid worden ingegaan. Tot slot worden met de drie berekeningsmethoden de potentiële verdamping van een lage en van een hoge vegetatie bepaald, waarbij de resultaten onderling vergeleken zullen worden.

3. BEGRIPPEN

Verdamping is de overgang van water in vloeibare (of vaste) vorm in waterdamp. In natuurgebieden is de verdamping de som van drie processen. De verdamping van de oppervlakte van een plant die nat is geworden door regen, dauw of mist wordt de verdamping van interceptiewater genoemd. Synoniem hieraan is de term evaporatie van interceptiewater.

De verdamping die via de huidmondjes en de cuticula van planten plaatsvindt, heet transpiratie of plantverdamping.

Het derde proces is de verdamping van het bodemoppervlak c.q. vanuit de bodem en wordt bodemevaporatie of bodemverdamping genoemd.

De evaporatie is de som van de bodemevaporatie en de evaporatie van interceptiewater, terwijl onder de evapotranspiratie of werkelijke verdamping de som van de evaporatie en de transpiratie wordt verstaan. De vochtvoorziening voor plant en bodem hoeft in dit geval niet optimaal te zijn. Daardoor kan er een reductie in de evapotranspiratie optreden. Soms wordt de evaporatie dan actueel genoemd om duidelijk het onderscheid aan te geven met de potentiële evapotranspiratie of kortweg potentiële verdamping, waarvan sprake is als de bodem en de planten voldoende van water zijn voorzien.

Verder wordt de open-water-verdamping veel als referentie verdamping gebruikt. Dit is de theoretische verdamping die optreedt van een oneindig uitgestrekt ondiep glad wateroppervlak.

4. METHODEN

De verdamping van een vegetatie is de resultante van de heersende meteorologische omstandigheden, de gewasfactoren en de vochthuishouding in relatie tot het bodemtype. Aan de hand van deze gegevens kan de potentiële en de werkelijk verdamping worden berekend. Er bestaan echter ook methoden waarmee de verdamping kan worden afgeleid of direct kan worden gemeten.

Van meest gangbare methoden wordt hier in het kort aangegeven in hoeverre deze toepasbaar zijn voor (half-)natuurlijke vegetaties.

- Waterbalans.

Een waterbalans kan in feite voor ieder gebied, ongeacht grootte en samenstelling, worden opgesteld. Er wordt echter vaak een topografische eenheid als balansgebied gekozen. Dit kan bijvoorbeeld een stroomgebied, een meer, een polder of een enkel perceel zijn.

Welke posten in een waterbalans voorkomen, hangt af van de gebieds-keuze. In de meest eenvoudige vorm ziet de waterbalans er als volgt uit:

$$\text{Neerslag} + \text{Aanvoer} = \text{Verdamping} + \text{Afvoer} + \text{of -} \\ \text{Vocht-/Peilverandering} \quad (1)$$

De verdamping vormt in dit geval de sluitpost van de balans. Onder de posten aan- en afvoer valt het in- en uitstromende oppervlakte- en grondwater en het kunstmatig aan- en afgevoerde water. Het hangt van het type gebied af welke onderdelen hiervan in de waterbalans voorkomen.

Het grootste probleem vormt meestal de bepaling van de vochtverandering in de bodem. Indien de waterbalans voor een hydrologisch jaar (1 april - 1 april) wordt berekend, is de vochtverandering nagenoeg nul. Over het algemeen geldt ook van de andere posten, dat de betrouwbaarheid toeneemt met de duur waarover de waterbalans wordt berekend.

- Lysimeters.

Een lysimeter is in feite een gedeelte van de bodem. De vegetatie van een lysimeter behoort niet af te wijken van de omgeving en de omvang van een lysimeter dient afgestemd te zijn op het type vegetatie. Door een aantal voorzieningen zijn de afzonderlijke posten van een waterbalans bij lysimeterproeven goed te bepalen. Vaak is het

bij kleinere lysimeters mogelijk de vochtverandering door weging vast te stellen. Vervolgens is de restpost uit de waterbalans, de verdamping, nauwkeurig te berekenen.

Wanneer een gedeelte van de betreffende vegetatie in de lysimeter aangebracht moet worden, kan dit problemen opleveren. Verder kan bijvoorbeeld de soortensamenstelling en de vitaliteit van kwetsbare vegetatietypen door de verplaatsing worden verstoord, waardoor de berekende verdamping niet representatief is.

- Verdampingsbakken.

Een verdampingsbak is in feite een lysimeter, die gevuld is met water en die te midden van het betreffende vegetatietype is opgesteld. Vervolgens wordt er een correlatie gezocht tussen de verdamping van het water uit de verdampingsbak en de vegetatie. De verdamping van de vegetatie zal daartoe (tijdelijk) via een andere methode moeten worden bepaald. Bij deze methode hangt veel af van de opstelling van de bak. Ingegraven bakken voldoen het beste.

- Empirische formules.

Aan de hand van reeds bekende verdampingsgegevens is het soms mogelijk om aan de hand van één of enkele verdampingsbepalende factoren een verband te vinden met de verdamping van de vegetatie. Dit kan bijvoorbeeld de straling of de windsnelheid in combinatie met de temperatuur zijn. Een bezwaar is echter dat de resultaten in principe alleen voor het gebied gelden waarvoor ze zijn afgeleid. Daarnaast is de betrouwbaarheid van veel van dergelijke methoden niet erg groot. Eén van de formules die in het verleden vrij veel is toegepast, staat tegenwoordig ook weer in de belangstelling. Dit betreft de formule van Makkink (MAKKINK, 1962).

- Formules op fysische grondslagen.

Er zijn een aantal formules ontwikkeld waarbij wordt uitgegaan van een combinatie van straling, warmte, waterdamp en wind. In uitgebreidere formules komen gewasfactoren en soms de zuigspanning van de bodem voor, waarmee de potentiële, respectievelijk de werkelijke verdamping kan worden berekend. Het verzamelen van de benodigde meteorologische gegevens vormt een probleem wanneer de benodigde apparatuur ontbreekt. In veel gevallen kunnen deze gegevens echter van derden worden betrokken. Zo heeft het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

(KNMI) te De Bilt een landelijk waarnemingsnet waarvan de waarnemingen maandelijks worden gepubliceerd.

In een aantal formules dienen ook vegetatie-specifieke waarden te worden ingevoerd. Deze waarden zijn van (half-)natuurlijke vegetatietypen echter niet bekend. Het afleiden of berekenen van dergelijke waarden, met name voor heterogene vegetaties, levert soms problemen op.

In de rest van deze nota wordt ingegaan op drie formules. De formule van Penman, die op fysische grondslag is gebaseerd; de empirische formule van Priestley en Taylor en de fysische/fysiologische benaderingswijze van Rijtema/Monteith.

5. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN PENMAN

Penman heeft, uitgaande van de energiebalans en de empirische formule van Dalton, een formule ontwikkeld waarmee de open-water-verdamping E_o kan worden berekend (PENMAN, 1948). Met deze formule wordt de theoretische verdamping van een oneindig uitgestrekt ondiep glas wateroppervlak onder de heersende hydrologische omstandigheden berekend. Hierbij wordt er van uitgegaan, dat er geen energieopslag in het water optreedt.

Door de open-water-verdamping te vermenigvuldigen met een factor f kan vervolgens de potentiële verdamping E_p van een vegetatie worden bepaald.

ROMIJN (1985) geeft in een artikel aan welke problemen zich bij zowel de bepaling en het gebruik van de open-water-verdamping als bij het gebruik van f -factoren voor kunnen doen. Enkele conclusies hieruit komen ook verderop in deze nota ter sprake.

De formule van Penman luidt:

$$E_o = \frac{\frac{\Delta R_n}{\rho_w L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm.etm}^{-1}) \quad (2)$$

waarin:

Δ = helling van de verzadigde dampspanningscurve bij T_2 , de temperatuur op 2 m hoogte (mbar.K^{-1})

R_n = netto straling (W.m^{-2})

ρ_w = dichtheid van water ($\rho_w = 999,8 \text{ kg.m}^{-3}$ bij 228,15K)

L = verdampingswarmte van water (J.kg^{-1})

γ = psychrometerconstante ($\gamma = 0,67 \text{ mbar}$ bij 1000 mbar en 288,15K)

E_a = isotherme verdamping (mm.etm^{-1})

Voor de omrekening naar mm.etm^{-1} dient de stralingsterm nog met 0.00352 vermenigvuldigd te worden.

Globaal geldt dat:

$$\Delta = \frac{de_s}{dT_2} \quad (3)$$

met:

e_s = verzadigde dampspanning bij T_2 (mbar)

T_2 = temperatuur op 2 m hoogte (K)

In tabel 1 zijn voor verschillende temperaturen de waarden van Δ , de verdampingswarmte en van de verzadigde dampspanning gegeven. De verzadigde dampspanning kan worden gebruikt om met formule 3 de helling van de verzadigde dampspanningscurve te berekenen. Voor L wordt in de praktijk vaak een constante waarde aangehouden. Hiervoor kan bijvoorbeeld $2462 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$ worden gebruikt. L kan eventueel ook berekend worden (zie onder andere Begeleidingsgroep GELGAM, 1984).

Tabel 1. Δ , de verdampingswarmte en de verzadigde dampspanning bij verschillende temperaturen

T (°C)	T (K)	Δ (mbar)	$L \times 10^3$ (J.kg ⁻¹)	e_s (mbar)	T (°C)	T (K)	Δ (mbar)	$L \times 10^3$ (J.kg ⁻¹)	e_s (mbar)
-10	263,15	0,227	2849	2,87	8	281,15	0,729	2475	10,72
- 9	264,15	0,243	2847	3,09	9	282,15	0,775	2473	11,48
- 8	265,15	0,260	2845	3,35	10	283,15	0,823	2470	12,28
- 7	266,15	0,279	2843	3,61	11	284,15	0,872	2468	13,12
- 6	267,15	0,299	2842	3,91	12	285,15	0,924	2466	14,03
- 5	268,15	0,320	28,40	4,21	13	286,15	0,980	2464	14,97
- 4	269,15	0,341	2839	4,55	14	287,15	1,037	2462	15,99
- 3	270,15	0,365	2837	4,89	15	288,15	1,099	2460	17,05
- 2	271,15	0,389	2834	5,28	16	289,15	1,161	2458	18,17
- 1	272,15	0,416	2833	5,68	17	290,15	1,228	2456	19,37
0	273,15	0,444	2495	6,11	18	291,15	1,299	2453	20,64
1	274,15	0,473	2493	6,57	19	292,15	1,371	2451	21,97
2	275,15	0,504	2491	7,05	20	293,15	1,448	2449	23,37
3	276,15	0,537	2489	7,57	21	294,14	1,528	2447	24,86
4	277,15	0,572	2487	8,13	22	295,15	1,612	2445	26,44
5	278,15	0,608	2484	8,72	23	296,15	1,700	2442	28,09
6	279,15	0,647	2481	9,35	24	297,15	1,792	2440	29,84
7	280,15	0,687	2479	10,01	25	298,15	1,888	2437	31,68

De netto straling wordt als volgt berekend:

$$R_n = (1-r)R_s + R_l \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (4)$$

met:

r = reflectiecoëfficiënt (voor open water is $r = 0,06$)

R_s = globale straling (W.m^{-2})

R_l = netto langgolvlige straling (W.m^{-2})

De langgolvlige straling is in de praktijk niet rechtstreeks te meten. De netto straling kan desalniettemin vrij goed bepaald worden door de globale straling wel direct te meten en de netto langgolvlige straling te berekenen. De berekening van de netto langgolvlige straling kan met de volgende formule:

$$R_l = -\sigma T^4 (0,47 - 0,67 \sqrt{e_2}) (0,2 + 0,8 n/N) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (5)$$

hierin is:

n/N = relatieve zonneschijnduur (-)

σ = constante van Stefan Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

e_2 = dampspanning op 2 m hoogte (mbar)

Eventueel kan ook de globale straling berekend worden:

$$R_s = R_a (0,20 + 0,48 n/N) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (6)$$

met:

R_a = inkomende zonnestraling aan de rand van de atmosfeer (W.m^{-2})

Uit recent onderzoek (FRANTZEN en RAAFF, 1982) kwam naar voren dat in vergelijking 6 in plaats van 0,48 een factor 0,60 beter voldoet.

De inkomende straling aan de rand van de atmosfeer is afhankelijk van de breedtegraad en het jaargetijde en kan worden afgeleid uit de tabellen van Angot. Door Kroonen (1985) is een methode van DE BRUIN (1977) uitgewerkt, waarmee R_a berekend kan worden. Voor Nederland zijn enkele R_a -waarden in tabel 2 gegeven.

Tabel 2. Inkomende zonnestraling aan de rand van de atmosfeer boven
Nederland

Datum	$Ra (W.m^{-2}.etm^{-1})$	Datum	$Ra (W.m^{-2}.etm^{-1})$
1 januari	75	1 juli	470
15 januari	90	15 juli	460
1 februari	120	1 augustus	430
15 februari	160	15 augustus	390
1 maart	205	1 september	345
15 maart	260	15 september	290
1 april	320	1 oktober	235
15 april	370	15 oktober	185
1 mei	410	1 november	145
15 mei	440	15 november	105
1 juni	460	1 december	85
15 juni	470	15 december	75

De isotherme verdamping is afgeleid uit de Dalton-vergelijking:

$$E_a = f(u) \cdot (e_s - e_2) \quad (mm.etm^{-1}) \quad (7)$$

waarin:

$$f(u) = \text{windfunctie } (mm.etm^{-1}.mbar^{-1})$$

Voor de windfunctie is door Penman empirisch bepaald dat:

$$f(u) = 0,26(0,50 + 0,54u_2) \quad (mm.etm^{-1}.mbar^{-1}) \quad (8)$$

met:

$$u_2 = \text{gemiddelde windsnelheid op 2 m hoogte } (m.s^{-1})$$

Andere onderzoekers komen tot andere waarden. Zo heeft RIJTEMA (1965) uit een logaritmisch windprofiel afgeleid dat:

$$E_a = 0,137u_2(e_s - e_2) \quad (mm.etm^{-1}) \quad (9)$$

Het KNMI berekent de open-water-verdamping volgens de hier aangegeven Penmanformule en publiceert verdampingscijfers van 15 meetstations in het Maandelijks Overzicht Weersgesteldheid.

Sinds het begin van de jaren zeventig worden etmaalgemiddelden gebruikt voor de berekening van de open-water-verdamping. Dit levert $\pm 10\%$ lagere waarden op dan de overdaggemiddelden die voor die tijd gebruikt werden (RIJTEMA en RYHINER, 1968 en VAN BOHEEMEN, 1977). Door middel van een decade afhankelijke toeslag wordt dit verschil gecompenseerd. In tabel 3 zijn per maand deze toeslagen voor De Bilt aangegeven. Tevens is in deze tabel de open-water-verdamping van dit meetstation voor een normaal jaar opgenomen. VAN BOHEEMEN (1977) geeft in een bijlage de toeslagen voor andere meetstations.

Tabel 3. Toeslagen en open-water-verdamping in een normaal jaar (inclusief toeslag) te De Bilt

Maand	Toeslag (mm)	Eo (mm)	Maand	Toeslag (mm)	Eo (mm)
januari	0	4	juli	10	118
februari	0	17	augustus	8	96
maart	5	42	september	6	61
april	8	78	oktober	4	28
mei	10	109	november	1	9
juni	10	126	december	0	3
			totaal	62	691

De verdampingscijfers van het KNMI komen via de Maandelijkse Overzichten Weersgesteldheid pas meerdere weken na het verstrijken van de maand van rapportage beschikbaar. Voor de meetstations De Kooy, Eelde, De Bilt, Vlissingen en Beek zijn de verdampingscijfers wel snel beschikbaar, omdat de gemeten globale straling rechtstreeks wordt ingevoerd, terwijl de relatieve zonneschijnduur is vervangen door een schatting van de bewolgingsgraad (m). Hierdoor wordt vergelijking (4):

$$R_n = (1-r)R_s - \sigma T^4 (0,47 - 0,067\sqrt{e_2}) (1 - 0,8 m) \quad (W.m^{-2}) \quad (10)$$

De op deze wijze berekende verdamping wordt referentieverdamping genoemd. Er worden geen toeslagen op gegeven.

De resultaten van de verschillende berekeningsmethoden zijn onderling niet in alle gevallen goed met elkaar vergelijkbaar. Eerder is al aangegeven dat er meerdere versies van de formule van Penman bestaan. Ook het KNMI gebruikt enkele coëfficiënten die afwijken van die welke Penman in zijn oorspronkelijke formule gebruikte. VAN BOHEEMEN (1977) heeft de berekeningswijzen van Penman, van Rijtema en van het KNMI volgens de Penmanformule met elkaar vergeleken en kwam tot de conclusie, dat de KNMI-berekeningen, exclusief de toeslagen, vergelijkbare resultaten opleveren met de methode volgens Penman. De toeslagen die het KNMI ten behoeve van de Maandelijkse Overzichten geeft, bedragen op jaarbasis zo'n 10%. De rekenmethode van Rijtema levert waarden op die gemiddeld 9% lager zijn dan de methode van Penman.

Door DE GRAAF (1983) is het verschil onderzocht tussen de open-water-verdamping volgens het KNMI (inclusief toeslagen) en de referentieverdamping. Hij berekende dat de referentieverdamping voor de periode april tot en met september in de jaren 1981 en 1982 5, respectievelijk 12% hoger was dan de E_o volgens het KNMI. Volgens hem werd dit verschil voornamelijk veroorzaakt door een onderschatting van de globale straling indien deze hoger is dan $195 \text{ J.cm}^{-2}.\text{etm}^{-1}$. DE BRUIN en LABLANS (1980) daarentegen vonden voor de maanden april tot en met september van de jaren 1971-1977 dat de open-water-verdamping van het KNMI, inclusief toeslagen, ongeveer gelijk was aan de referentieverdamping.

Uit het bovenstaande blijkt dat de verschillen tussen de diverse berekeningsmethoden kunnen oplopen tot ongeveer 20%. Bij het gebruik van verdampingscijfers van open water dient derhalve eerst te worden nagegaan op welke wijze die waarden zijn bepaald om eventueel omwille van de eenduidigheid te worden gecorrigeerd.

Daar waar in de rest van deze nota sprake is van open-water-verdamping is uitgegaan van de KNMI gegevens (+ toeslagen), zoals die in de Maandelijkse Overzichten Weersgesteldheid zijn vermeld. De referentieverdamping komt hier, zonder correctie, ook voor in aanmerking.

Er bestaat een relatie tussen de potentiële verdamping van een homogene vegetatie die de bodem geheel bedekt en de open-water-verdamping:

$$E_p = f \cdot E_o \quad (\text{mm} \cdot \text{etm}^{-1}) \quad (11)$$

De factor f in deze formule, die ten onrechte ook wel reductie-factor wordt genoemd, hangt af van het jaargetijde, de oppervlakte en de albedo van de vegetatie. Uit lysimeteronderzoek bleek dat ook gedurende een zomerhalfjaar de f -factor voor kort gras varieerde en wel tussen 0,65 en 0,76 (WERKCOMMISSIE VERDAMPINGSONDERZOEK, 1985). Volgens Rijtema (persoonlijke mededeling) bleef de groei van het gras achter bij gras dat op andere, met zand gevulde lysimeters groeide.

De verdamping van een vegetatie met een geringe oppervlakte zal door een afwijkende vegetatie in de omgeving beïnvloed worden, door dat bijvoorbeeld de windsnelheid zal wijzigen. Verder kan de straling door schaduwwerking verminderen. Ook de vorm van de oppervlakte is van belang. Zo zullen lintvormige oppervlakten veel meer te maken hebben met randinvloeden dan meer ronde oppervlakten.

De f -factoren zijn in de meeste gevallen berekend. Aan de hand van lysimeterproeven kunnen de meest nauwkeurige factoren worden bepaald. Voor (half-)natuurlijke vegetaties is dit slechts op beperkte schaal gebeurd (o.a. TOLLENAAR, 1972). Ook BAKKER (1984) geeft aan de hand van literatuurgegevens een overzicht van f -factoren van een aantal begroeiingstypen. Hij maakt daarbij onderscheid tussen natte varianten met een potentiële verdamping en droge varianten met een werkelijke verdamping. Het aantal in de literatuur bekende f -factoren is echter gering. Door een andere methode toe te passen kon het aantal vegetatietypen met een f -factor worden uitgebreid. Deze methode (OOSTEROM en VAN SCHIJNDEL, 1979) berust erop dat het grondwater als het ware indikt als gevolg van de onttrekking van water dat voor verdamping nodig is. De opname van chloride door de vegetatie kan hierbij worden verwaarloosd, waardoor de toename van het chloridegehalte in het bovenste grondwater het gevolg is van het indikkingsproces. De verhouding tussen het gemiddelde chloride-gehalte in het bovenste grondwater en dat van het regenwater over een periode van bijvoorbeeld een jaar geeft de mate van indikking aan. Verder hoeft alleen de hoeveelheid neerslag berekend te zijn om de verdamping te kunnen berekenen. De verhouding tussen de potentiële verdamping en de open-water-verdamping over de beschouwde periode levert vervolgens de waarde f op.

In formule:

$$E_p = P - \frac{Cl(\text{neerslag}) \cdot P}{Cl(\text{grondwater})} \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

hierin is:

P = neerslag (mm)

$Cl(\text{neerslag})$ = chloridegehalte van de neerslag (mg.l^{-1})

$Cl(\text{grondwater})$ = chloridegehalte van het bovenste grondwater (mg.l^{-1})

Wanneer op deze wijze de potentiële verdamping wordt berekend, zal de vegetatie van voldoende vocht moeten zijn voorzien. De grondwaterstand mag in dat geval niet te diep dalen. Verder is deze methode alleen daar toepasbaar waar het bovenste grondwater uitsluitend gevoed wordt door infiltrerend neerslagwater.

Vooraf bij hogere vegetaties doet zich echter het probleem voor, dat een aanzienlijk gedeelte van de neerslag, het interceptiewater, de bodem niet bereikt, terwijl aan de andere kant een extra hoeveelheid chloride als gevolg van droge depositie het grondwater bereikt. Dit leidt tot een overschatting die tot meer dan 10% kan oplopen (HOEKS, 1985). In gebieden met veel (bio-)industrie is de depositie van ondermeer chloride vaak nog veel groter en is deze methode ongeschikt.

Tot slot dient er rekening mee te worden gehouden, dat het chloridegehalte van de neerslag niet overal gelijk is. In tabel 4 is een overzicht gegeven van de gemiddelde chloridegehalten van de neerslag van een aantal plaatsen in Nederland.

Tabel 4. Het gemiddelde chloridegehalte over der periode 1978 tot en met 1980 voor een aantal plaatsen (KNMI en RID, 1980)

De Kooy (Den Helder)	11,5 mg.l^{-1}
Leeuwarden	5,7
Witteveen (Dr.)	2,8
Twenthe	2,2
Rotterdam	5,8
De Bilt	3,7
Vlissingen	18,3
Eindhoven	2,5
Beek (L)	2,0

Voor het samenstellen van een overzicht van f-factoren voor de berekening van de potentiële verdamping is gebruik gemaakt van bestaande f-factoren uit de literatuur (BAKKER, 1984; CULTUURTECHNISCHE VERENIGING, 1974; OOSTEROM en VAN SCHIJNDEL, 1979; JANSSEN en KEMMERS, 1980). Daarnaast is volgens de hierboven beschreven methode van een aantal vegetatietypen van een tiental natuurgebieden de f-factor bepaald. De benodigde gegevens hiervoor zijn ontleend aan een terreinbeschrijving van deze gebieden (DIJKEMA e.a., 1985).

De f-factoren van een aantal overeenkomstige vegetatietypen verschilden in een paar gevallen tot circa 25%. Hierbij dient bedacht te worden, dat de bepaling van de factor volgens verschillende methoden heeft plaatsgevonden, dat een vegetatietype vrijwel nooit homogeen van samenstelling is en dat er verschillen in ondermeer leeftijd, vitaliteit en dichtheid optreden.

In tabel 5 is een overzicht gegeven van de f-factoren. In het geval er meer dan één factor voor een bepaald vegetatie-type bekend was, is de gemiddelde waarde gegeven. Bij grote verschillen is rekening gehouden met de wijze waarop de factor bepaald is.

Tabel 5. F-factoren van een aantal vegetatietypen

		f-factor
Naaldbos	- jong	0,80
	- oud	0,95
Loofbos	- jong	0,70
	- oud	0,85
Broekbos		0,75
Struweel		0,80
Heide	- Calluna (+ opslag)	0,60 (tot 0,75)
	- Erica (+ opslag)	0,60 (tot 0,75)
Grasland	- Molinia (+ opslag)	0,50*) (tot 0,75)
	- schraal (idem, kort)	0,75 (0,65)
	- rijk (idem, kort)	0,80 (0,70)
Oevervegetatie	- ruig	1,00
Hoogveen	- heide	0,65
	- veenmos	0,95
Duinvegetatie		0,75
Kale zandgrond		0,30

*) Tijdens de bloei 0,15 hoger.

De factoren uit tabel 5 gelden als gemiddelden voor een heel jaar. Voor sommige, bijvoorbeeld bladverliezende, vegetaties is er een (klein) verschil tussen de f-factor in het winter- en in het zomerhalfjaar. Door gebrek aan gegevens is dit onderscheid niet in tabel 5 aangegeven. De open-water-verdamping bedraagt in het winterhalfjaar echter circa 15% van de jaarlijkse open-water-verdamping, zodat een eventuele fout op jaarbasis hooguit enkele procenten bedraagt. De fout die het gevolg is van een mogelijke afwijking van de factor f is groter. Er moet rekening mee worden gehouden dat afwijkingen tot 0,1 met de in tabel 6 vermelde waarden op kunnen treden.

Conclusie

De berekening van de potentiële verdamping van een vegetatie uit de open-water-verdamping heeft als voordeel dat dit op een snelle en betrekkelijk eenvoudige wijze kan gebeuren. Dit is vooral het geval als er gebruik wordt gemaakt van bestaande f-factoren en verdampingsgegevens van open water, die regelmatig door het KNMI gepubliceerd worden.

Een nadeel is, dat het aantal vegetatietypen met een bekende f-factor gering is en deze typen 'grof' omschreven zijn. Daarnaast is er geen onderscheid naar het jaargetijde gemaakt, waardoor er met een zekere afwijking van de f-factor rekening moet worden gehouden. Verder gelden de f-factoren niet voor vegetaties met een geringe bedekking of met een geringe oppervlakte.

6. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN PRIESTLEY EN TAYLOR

Een eenvoudige methode waarmee de potentiële verdamping van een begroeid oppervlak kan worden bepaalde en waarvoor eventueel alleen de netto straling en de temperatuur bekend hoeven te zijn, is de berekeningswijze volgens PRIESTLEY en TAYLOR (1972). Deze methode luidt:

$$E_p = \alpha \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)L} \cdot R_n \quad (\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}) \quad (13)$$

Hierin is:

α = empirische factor (-)

De grootte van α is onafhankelijk van de structuur van de vegetatie en bedraagt voor landbouwgewassen 1,35 + of - 0,10. Ook voor gras zijn waarden in deze orde van grootte gevonden. Behalve voor hogere vegetatietypen, zoals struwelen en bossen, kan de hier genoemde waarde voor alle andere begroeiingstypen gebruikt worden. De waarde van α omvat de verdamping en voor lage gewassen/vegetaties de interceptie. Voor bossen zouden de waarden voor α als gevolg van de interceptie sterk kunnen variëren. Daarom wordt de interceptie door bossen apart berekend. Voor de transpiratie van bossen zijn waarden voor α gevonden van 0,6 tot hoger dan 1,1. De laagste waarden gelden hierbij voor naaldbossen. De interceptie komt bij de bespreking van de berekeningsmethode van Rijtema/Monteith ter sprake.

De waarden voor γ en L en de berekening van Δ zijn bij de formule van Penman ter sprake gekomen.

Voor de berekening van de netto straling kan worden uitgegaan van formule (4): $R_n = (1 - r)R_s + R_l$. De reflectiecoëfficiënt (r) bedraagt voor water circa 0,06. Voor begroeide oppervlakken is deze coëfficiënt onder andere afhankelijk van de bodembedekking, de structuur en de hoogte van de vegetatie. Voor de meeste gewassen bedraagt de reflectiecoëfficiënt 0,19 - 0,26. Meestal wordt een gemiddelde van 0,23 aangehouden. Ook (groene) grasachtige vegetaties met een hoogte tot 30 cm hebben de vergelijkbare reflectiecoëfficiënten, namelijk 0,16 - 0,27. Voor loofbossen in blad varieert r van 0,16 (groen) tot 0,36 (geel). Naaldbossen reflecteren over het algemeen minder. Hiervoor gelden waarden van 0,10 - 0,12. Bij een onvolledige bodembedekking neemt de reflectiecoëfficiënt, behalve bij naaldbos af. Voor een kale kleigrond bedraagt r 0,14 en voor zandig leem 0,18.

Voor eenvoudige verdampingsberekeningen wordt de netto straling vaak aan de hand van de globale straling berekend. Daarvoor kan dan gebruik worden gemaakt van de volgende formule:

$$R_n = aR_s - b \quad (14)$$

Van de constanten a en b in deze formule is a afhankelijk van de reflectiecoëfficiënt en is b een waarde voor de netto langgolvlige straling. Voor heldere dagen bedraagt b 80 W.m^{-2} en voor geheel bewolkte dagen is b niet hoger dan 20 W.m^{-2} . Voor a gelden dan waarden van respectievelijk 0,86 en 0,80 (SCHOLTE UBING, 1959).

Tijdens het groeiseizoen zal het weer echter vaak wisselend bewolkt zijn. Er wordt dan ook meestal van gemiddelde waarden voor de betreffende periode uitgegaan. FEDDES e.a. (1978) vonden voor verschillende gewassen op diverse bodemtype dat:

$$R_n = 0,649R_s - 23 \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \quad (15)$$

Voor natuurlijke begroeiingen zijn de waarde a en b niet bepaald, maar verondersteld mag worden dat bij een vergelijkbare hoogte als de landbouwgewassen bovenstaande relatie ook toegepast mag worden. Voor hogere vegetaties of voor vegetaties met een sterk afwijkende structuur zal de netto straling met formule 5 of 9 berekend moeten worden.

Conclusie

De berekening van de potentiële verdamping van een vegetatie volgens de methode van Priestley en Taylor heeft als voordeel dat met een beperkt aantal meetgegevens kan worden volstaan. Indien voor L , a , b en γ een constante waarde wordt aangehouden is de potentiële verdamping rechtstreeks gecorreleerd aan de netto straling en de temperatuur.

De veronderstelling dat min of meer (groene) natuurlijke begroeiingen een overeenkomstige verdamping vertonen met landbouwgewassen van ongeveer eenzelfde hoogte is discutabel. Gezien de vrij grove berekeningswijze is deze aanname echter acceptabel.

Voor hogere vegetaties is deze methode alleen geschikt als de interceptie via een afzonderlijk model wordt berekend.

7. POTENTIELE VERDAMPING VOLGENS DE METHODE VAN RIJTEMA/MONTEITH

Rijtema en Monteith hebben vrijwel tegelijkertijd een methode ontwikkeld waarbij de berekening van de verdamping van een gewas niet alleen op fysische aspecten, maar ook op fysiologische kenmerken is gebaseerd (RIJTEMA, 1965; Monteith, 1965). Door FEDDES e.a. (1978) wordt deze vergelijking als volgt weergegeven:

$$E = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma (1 + r_s/r_a)} (E^* - E_i) + E_i \quad (\text{mm.etm}^{-1}) \quad (16)$$

met:

$$E^* = \text{verdamping van een nat gewas} \quad (\text{mm.etm}^{-1})$$

$$E_i = \text{verdamping van interceptiewater} \quad (\text{mm.etm}^{-1})$$

$$r_s = \text{gewasweerstand} \quad (\text{s.m}^{-1})$$

$$r_a = \text{aerodynamische weerstand} \quad (\text{s.m}^{-1})$$

$$E^* = \frac{\Delta R_n + C_p \rho_a (e_s - e_2)/r_a}{(\Delta + \gamma)L} \cdot 86400 \quad (\text{mm.etm}^{-1}) \quad (17)$$

hierin is:

$$C_p = \text{soortgelijke warmte van lucht} \quad (1010 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$$

$$\rho_a = \text{dichtheid van lucht} \quad (1,2047 \text{ kg.m}^{-3})$$

Verder is:

$$r_s = r_l + r_c \quad (\text{s.m}^{-1}) \quad (18)$$

met:

$$r_l = \text{bladweerstand} \quad (\text{s.m}^{-1})$$

$$r_c = \text{weerstand afhankelijk van de bodembedekking} \quad (\text{s.m}^{-1})$$

De waarde van r_a is onder andere afhankelijk van de gewashoogte en de windsnelheid. FEDDES (1971) heeft waarden voor r_a berekend. Hiervan wordt in tabel 6 een beknopt overzicht gegeven. De waarden in deze tabel gelden voor gewassen en vegetaties tot een hoogte van 90 cm. Uit een logaritmisch windprofiel boven een hogere vegetatie kan het nulvlak worden berekend. Tot die hoogte wordt de windsnelheid gelijk aan nul verondersteld. Deze zogenaamde nulvlaksverplaatsing wordt in de

praktijk gesteld op de hoogte waar de begroeiing homogeen is, of op een vaste afstand van bijvoorbeeld 1 meter onder de bovengrens van het bladerdek. Daarboven gelden waarden uit tabel 6. VAN ROESTEL (1984) geeft aan wie hier onderzoek naar gedaan hebben en komt tot de conclusie dat het moeilijk is om de ruweheidslengte van een vegetatie te relateren aan de oppervlakteruwheid en geometrie van de vegetatie.

Tabel 6. Waarden voor r_a ($s.m^{-1}$) voor verschillende gewashoogten (l) en windsnelheden (u_2). (Uit FEDDES (1971), tabel 6)

l (m)	$u_2 (m.s^{-1})$									
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
0,0	1020	693	412	304	245	181	146	123	108	96
0,05	389	265	158	116	94	69	56	47	41	37
0,10	247	168	100	74	60	44	35	30	26	23
0,15	205	129	83	61	59	36	29	25	22	19
0,20	183	125	74	55	44	33	26	22	19	17
0,30	163	111	66	49	39	29	23	20	17	15
0,50	138	94	56	41	33	25	20	17	15	13
0,70	129	88	52	39	31	23	18	16	14	12
0,90	122	83	49	36	29	22	17	15	13	11

Voor bossen kan de aerodynamische weerstand laag worden. Waarden tot $10 s.m^{-1}$ behoren hierbij tot de mogelijkheid (zie o.a. Begeleidingsgroep GELGAM, 1984). Voor een bos waar geen gegevens betreffende de windsnelheid van bekend zijn, voldoet volgens CALDER (1977) een waarde van r_a van $5 s.m^{-1}$ goed. Een zekere fout van r_a is acceptabel, omdat r_a zowel in de teller als in de noemer van vergelijking (16) voorkomt en normaliter kleiner is dan r_s .

Door FEDDES e.a. (1978) zijn aan de hand van literatuurgegevens (RIJTEMA en RYHINER, 1966; FEDDES, 1971; RIJTEMA, 1965) de volgende relaties in tabelvorm samengebracht:

- de bladweerstand (r_l) en de gemiddelde kortgolvlige straling (R_s)
- de weerstand die afhankelijk is van de bodembedekking (r_c) en de bodembedekking (Sc).

In de tabellen 7 en 8 is van deze relaties een overzicht opgenomen.

Tabel 7. Waarden voor de bladweerstand (r_1) in afhankelijkheid van de gemiddelde kortgolvlige straling (R_s). (Uit FEDDES e.a., 1978, tabel 2)

R_s ($W.m^{-2}$)	100	150	200	250	275
r_1 ($s.m^{-1}$)	237	141	69	10	0

Tabel 8. Waarden voor de weerstand die afhankelijk is van de bodembedekking (r_c) in relatie tot de bodembedekking (Sc). (Uit FEDDES e.a., 1978, tabel 3).

Sc (fractie)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
r_c ($s.m^{-1}$)	250	158	120	82	48	25	14	10	0	0

Bij een volledige bodembedekking en een kortgolvlige straling die groter of gelijk is aan $275 W.m^{-2}$ wordt de gewasweerstand (r_s) uit vergelijking (18) gelijk aan 0. Dat betekent, dat de potentiële verdamping uit vergelijking (16) dan even groot is als de verdamping van een nat gewas. Nader onderzoek (WERKGROEP GELGAM, 1984) toonde echter aan, dat er bij ieder gewas en vegetatietype een zogenaamde basis-gewasweerstand (r_b) heeft en dat deze bij een vochttekort op kan lopen tot een maximale weerstand (r_m). Voor de bepaling van de potentiële verdamping is alleen de basisweerstand van belang. Hiervan wordt in tabel 9 een overzicht gegeven. Het gebruik van een constante gewasweerstand betekent een vereenvoudiging van de berekening van de potentiële verdamping.

Tabel 9. Basisgewasweerstand (r_b) voor enkele vegetatietypen

vegetatietype	basisweerstand ($s.m^{-1}$)
gras	65
loofbos	80
naaldbos	80

In het eerdergenoemde onderzoek van de werkgroep GELGAM wordt verder voorgesteld om, naast de interceptie, ook de evaporatie middels een aparte vergelijking te bepalen. In dat geval zou de difussieweerstand als gevolg van een onvolledige bodembedekking vervallen en bestaat de potentiële verdamping uit de fractie begroeide bodem x de transpiratie plus de fractie kale grond x de evaporatie. Omdat (half-) natuurlijke begroeiingen vaak de gehele bodem bedekken, wordt er voorts nog vanuit gegaan dat de weerstand in het geval de bodem niet geheel bedekt is, direkt bij de berekening van de potentiële verdamping wordt betrokken.

De berekening van de interceptie kan in feite met iedere geschikte methode gebeuren, omdat deze los van de berekening van de verdamping kan plaatsvinden.

Voor de relatie tussen de interceptie en de neerslag geeft FEDDES e.a. (1978) enkele waarden, die hier in tabel 10 zijn opgenomen. De waarden in tabel 10 gelden voor vegetatie tot een hoogte van circa 1 meter.

Tabel 10. De relatie tussen de neerslag (P) en de interceptie (E_i) voor vegetaties tot circa 1 meter.
(Uit FEDDES e.a., 1978, tabel 4).

P (mm.etm ⁻¹)	0	0,50	1,00	2,00	3,00	4,50	7,00	10,00	15,00	20
E_i (mm.etm ⁻¹)	0	0,34	0,55	0,77	1,17	1,28	1,44	1,61	1,79	1,85

FEDDES (1971) vond over het algemeen, dat grote fouten in de schatting van E_i resulteren in kleinere fouten in de potentiële verdamping doordat een deel van de energie tijdens de neerslag gebruikt wordt door verdamping van interceptiewater.

De interceptie door hogere vegetaties en vooral door bossen is over het algemeen aanzienlijk groter. Het meest eenvoudig is het om de interceptie als percentage van de gevallen neerslag te veronderstellen. In tabel 11 wordt een overzicht gegeven van de interceptie door een paar soorten bós en afzonderlijke bomen. Hierbij moet wel bedacht worden dat, naast het soort bos/boom, eveneens de dichtheid en de leeftijd ervan de interceptie mede bepalen.

Tabel 11. Interceptie door bos en bomen als percentage van de hoeveelheid neerslag

		Naar Volmuller, 1972		Naar Molchanov, 1960; Ver. voor Groenvoorziening, 1984				
		naaldbos	loofbos	fijnspar	den eik	berk	populier	
zomer (%)	24-34		14-24					
winter (%)	26-43		17-20					
jaar (%)				37	21	18	12	11

Voor korte perioden geeft de berekening van de interceptie volgens de hier aangegeven methode onbevredigde resultaten omdat de verdeling en de intensiteit van de neerslag, die van groot belang zijn voor de interceptie, dan sterk af kunnen wijken van een gemiddelde verdeling waarop de waarden uit tabel 11 gebaseerd zijn.

De berekening van de interceptie kan ook plaatsvinden aan de hand van modellen. Hierbij zijn er die beter geschikt zijn om de interceptie over kortere perioden te bepalen. De beschikbare gegevens zullen echter vaak de beperkende factoren zijn bij de keuze van een interceptiemodel. De invoer van gegevens per bui is vaak niet haalbaar, terwijl aan de andere kant een uitvoer per jaar niet gedetailleerd genoeg is. Door VAN ROESTEL (1984) is een literatuurstudie verricht naar onder andere interceptiemodellen. Hieruit komt naar voren dat het analytische model van GASH (1979) goed voldoet. Dit model berekent aan de hand van afzonderlijke buiten en met behulp van coëfficiënten voor doorval (through-fall) en stamstroming (stemflow) de interceptie.

Voor een eenvoudig model waarbij enkele gewassen en vegetatietypen onderscheiden zijn en waar neerslaggegevens over een periode tot maximaal 10 dagen beschikbaar moeten zijn, lijkt het model van de BEGELEIDINGSGROEP GELGAM (1984) geschikt te zijn. Deze methode komt erop neer, dat een interceptiereservoir, waarvan de grootte afhankelijk is van de gekozen tijdstap, gevuld wordt met neerslag. Als het reservoir vol is, wordt de rest verondersteld effectieve neerslag te zijn.

Deze methode luidt:

$$I_a = S_c I_m(a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2) \quad (\text{mm}) \quad (19)$$

met:

Ia	= grootte van het interceptiereservoir	(mm)
Im	= interceptiecapaciteit van de vegetatie	(mm)
a0, a1, a2	= regressiecoëfficiënten	(-)
t	= tijdsinterval (t < 11 dagen)	(-)

De regressiecoëfficiënten zijn gebaseerd op bekende hoeveelheden interceptie en neerslag. De waarden van Im, a0, a1 en van a2 van enkele vegetatietypen zijn tabel 12 opgenomen.

Tabel 12. Waarden van Im (volgens RUTTER en MORTON, 1977) en van a0, a1 en a2 (volgens BEGELEIDINGSGROEP GELGAM, 1984) voor enkele vegetatietypen

	Im(mm)	a0	a1	a2
korte vegetaties (gras)	0,5	0,5711	0,4668	-0,0013
vegetaties tot 1 m	1,0	0,5888	0,4558	-0,0022
loofbos	1,5	0,6032	0,4355	-0,0022
('swinters)	0,5			
naaldbos	2,0	0,6292	0,4114	-0,0019

Conclusie

De methode van Rijtema/Monteith betreft, naast fysische ook fysiologische kenmerken bij de berekening van de potentiële verdamping. Enkele fysiologische parameters zijn ten opzichte van de oorspronkelijk vergelijking aangepast. De betrouwbaarheid van deze methode is afhankelijk van de juistheid van gewas-/vegetatiespecifieke parameters. Hiervan zijn er wel een aantal van bekend, maar er bestaat behoefte aan aanvullende gegevens.

De interceptie kan met een apart model worden berekend, waarbij de keuze van het model af zal hangen van de beschikbare gegevens en de gewenste nauwkeurigheid.

8. DE BEREKENING VAN DE POTENTIELE VERDAMPING VAN BLAUWGRASLAND EN LOOFBOS MET DE METHODEN VAN PENMAN, PRIESTLEY EN TAYLOR EN VAN RIJTEMA/MONTEITH

De methoden van Penman, Priestley en Taylor en van Rijtema/Monteith zijn in de eerste plaats ontwikkeld om de potentiële verdamping van landbouwgewassen mee te kunnen berekenen. Hierboven is aangegeven met welke getalswaarden deze methoden voor een aantal (half-)natuurlijke vegetatietypen gebruikt zou kunnen worden. De betrouwbaarheid van de berekende verdampingscijfers zal gedeeltelijk hiervan afhangen.

Door van twee verschillende vegetatietypen met elk van de hier besproken methoden de potentiële verdamping te berekenen kunnen deze onderling vergeleken worden.

Voor de berekeningen zijn de meteorologische gegevens van het KNMI uit de Maandelijkse Overzichten Weersgesteldheid over de maand juni 1982 van het weerstation De Bilt gebruikt. In deze maand komen zowel natte (sombere) als zonnige perioden voor. Een overzicht van de meteorologische gegevens is opgenomen in tabel 13.

Tabel 13. Overzicht van de meteorologische gegevens van de maand juni 1982. Ontleend aan het KNMI (1982).

datum juni	P (mm)	Rn (W.m ⁻²)	T ₂ (°C)	n/N (-)	u ₂ (m.s ⁻¹)	e ₂ (mbar) ²
1	3.2	1579	13.3	24	2.5	13.4
2	0.0	2021	14.6	44	3.0	12.3
3	6.2	848	14.2	1	3.0	14.2
4	21.8	477	10.5	0	2.5	12.2
5	0.7	1395	11.9	28	2.0	11.4
6	1.2	1332	12.2	15	3.5	11.9
7	3.5	273	11.8	0	2.0	13.6
8	0.0	803	11.7	4	3.0	12.0
9	0.0	2495	12.3	60	3.5	10.9
10	0.0	2105	13.9	44	2.5	11.7
11	0.0	1977	12.8	46	2.5	10.3
12	0.0	2246	14.3	65	2.5	11.9
13	0.0	691	15.1	0	4.5	14.2

14	4.6	1108	13.6	19	3.5	13.7
15	0.0	1714	12.8	42	3.0	11.8
16	0.0	2144	12.9	40	2.0	11.7
17	0.0	1882	15.0	40	1.5	12.9
18	0.0	2275	16.9	57	2.0	14.3
19	0.0	2092	18.8	56	1.5	15.7
20	0.0	2349	21.1	56	1.5	16.9
21	0.0	2403	16.4	69	3.0	13.9
22	5.8	747	14.1	0	4.5	13.5
23	1.0	2024	12.4	49	4.0	9.9
24	0.8	1438	11.8	31	3.5	10.2
25	4.6	793	13.3	7	4.0	13.1
26	0.0	2353	15.1	68	3.0	12.3
27	0.0	1629	15.3	45	3.0	14.2
28	0.0	1783	12.1	32	3.0	11.0
29	3.5	1685	11.7	23	3.0	9.6
30	0.7	16.22	10.9	30	2.5	10.1

Bij de formule van Penman zijn als f-factoren waarden van 0,75 en 0,85 aangehouden voor respectievelijk het blauwgrasland en het loofbos. De open-water-verdamping is per dag berekend. De cijfers van de open-water-verdamping van het KNMI waren per decade beschikbaar wat voor dit vergelijkend onderzoek minder geschikt is.

Voor de berekeningswijze van Priestley en Taylor is voor het blauwgrasland een waarde voor α van 1,25 aangehouden en voor de reflectiecoëfficiënt een waarde 0,23. Voor het loofbos zijn waarden van respectievelijk 0,95 en 0,16 gebruikt. De interceptie van het loofbos is apart uitgerekend volgens de gegevens uit tabel 11 en volgens de methode die door de Werkgroep GELGAM is gebruikt.

Voor de netto straling voor de methode van Rijtema/Monteith zijn dezelfde waarden gebruikt als voor de Priestley en Taylor vergelijking. Voor het blauwgrasland is de hoogte van de vegetatie op 25 cm gesteld en zijn de waarden voor r_a aan tabel 6 ontleend. Voor het loofbos is een constante waarde van 10 s.m^{-1} voor r_a gebruikt. De bodembedekking is op 100% gesteld, zodat $r_c = 0 \text{ s.m}^{-1}$. Als de waarden voor r_l die aan tabel 7 zijn ontleend kleiner zijn dan de basisgewasweerstanden (65 voor blauwgrasland en 80 voor loofbos) zijn de basisweerstanden ge-

bruikt. De interceptie van het blauwgrasland is op twee manieren berekend, enerzijds aan de hand van de gegevens uit tabel 10 en anderzijds volgens de methode 'GELGAM'. De interceptie van het loofbos is volgens de beide methoden berekend die ook bij de Priestley en Taylor methode gebruikt zijn.

De resultaten van de berekeningen zijn in tabel 14 opgenomen. De methoden waarbij de interceptie volgens tabel 11 is bepaald, zijn in de tabel met Ei-2 aangegeven en bij die waar de methode GELGAM is gebruikt, is dit met Ei-G gedaan.

Tabel 14. Overzicht van de berekeningsresultaten van verschillende methoden voor de berekening van de potentiële verdamping van een blauwgrasland en een loofbos voor de maand juni 1982 in mm.etm^{-1} .

Voor de verschillende parameters: zie tekst.

juni	BLAUWGRASLAND				4 PENMA	LOOFBOS			
	1	2	3a	3b		5a	5b	6a	6b
	PENMA	PR/TA	RIJT/MONTH Ei-G	Ei-2		PRIES/TAYL Ei-G	Ei-2	RIJT/MONTH Ei-G	Ei-2
1	2.42	2.81	2.14	2.45	2.75	3.99	2.99	2.74	1.96
2	3.38	3.53	3.34	3.34	3.83	3.02	3.02	3.12	3.12
3	1.51	1.56	1.11	1.77	1.71	2.93	2.53	2.04	1.68
4	0.58	0.60	0.60	1.62	0.66	2.13	4.63	1.63	3.91
5	2.01	2.16	1.96	1.92	2.28	2.56	1.96	1.93	1.43
6	2.18	2.29	1.75	1.81	2.48	3.15	2.15	2.17	1.32
7	0.23	0.19	0.45	0.92	0.26	1.78	0.88	1.55	0.73
8	1.32	1.28	0.65	0.65	1.50	1.09	1.09	0.54	0.54
9	4.07	4.49	3.66	3.66	4.62	3.85	3.85	3.00	3.00
10	3.38	3.56	4.13	4.13	3.84	3.04	3.04	3.25	3.25
11	3.14	3.14	4.04	4.04	3.56	2.70	2.70	3.35	3.35
12	3.47	3.61	4.16	4.16	3.93	3.12	3.12	3.33	3.33
13	1.59	1.23	0.84	0.84	1.80	1.05	1.05	0.81	0.81
14	1.77	1.78	1.28	1.78	2.01	3.13	2.43	2.21	1.59
15	2.65	2.69	2.57	2.57	3.00	2.32	2.32	2.40	2.40
16	3.26	3.73	3.39	3.39	3.69	3.18	3.18	2.55	2.55
17	2.98	3.33	3.25	3.25	3.38	2.85	2.85	3.08	3.08
18	3.78	4.21	4.27	4.27	4.28	3.60	3.60	3.64	3.64
19	3.56	3.99	3.98	3.98	4.04	3.41	3.41	3.99	3.99
20	4.36	4.93	5.08	5.08	4.94	4.19	4.19	5.35	5.35

21	4.07	4.24	4.08	4.08	4.61	3.64	3.64	3.88	3.88
22	1.66	1.32	1.23	1.95	1.88	2.73	2.23	2.24	1.79
23	3.40	3.13	4.02	4.07	3.85	3.70	2.90	4.00	3.38
24	2.38	2.14	2.17	2.17	2.70	2.65	2.05	2.56	2.06
25	1.44	1.24	1.07	1.63	1.63	2.67	1.97	2.07	1.43
26	3.85	3.91	3.90	3.90	4.37	3.37	3.37	3.75	3.75
27	2.60	2.71	2.52	2.52	2.95	2.33	2.33	2.35	2.35
28	2.85	2.95	2.74	2.74	3.23	2.53	2.53	2.51	2.51
29	2.84	2.82	3.20	3.52	3.22	4.01	3.11	4.09	3.39
30	2.41	2.51	2.42	2.37	2.73	2.86	2.26	2.72	2.26
	<u>79.15</u>	<u>82.09</u>	<u>80.02</u>	<u>84.58</u>	<u>89.70</u>	<u>87.56</u>	<u>81.36</u>	<u>82.88</u>	<u>77.87</u>

Tijdens langdurig droge of natte perioden moet er rekening mee worden gehouden dat de methoden 1, 2 en 4, waar de interceptie in respectievelijk de factor f en α verdisconteerd is, tot een overschatting c. q. onderschatting van de verdamping leidt. De neerslag was in juni 1982 echter slechts zo'n 5 mm lager dan in een normaal jaar, zodat dit probleem zich hier niet voordoet.

Opvallend in tabel 14 is, dat de op de verschillende manieren berekende maandtotalen van de verdamping van het blauwgrasland goed met elkaar overeenkomen. Ook de verschillen op dagbasis zijn over het algemeen gering. Er zijn geen afwijkende relaties aan te geven tussen één van de berekeningsmethoden en de neerslag (interceptie) of de grootte van de straling. De grootste verdamping op maandbasis is voor het blauwgrasland met methode 3b gevonden. Hierbij is de interceptie volgens tabel 10 berekend. Ten opzichte van methode 3a, waarbij van een interceptiereservoir met een maximum capaciteit van 0,5 mm per etmaal wordt uitgegaan, is er van een overschatting sprake bij buien die groter zijn dan 1 mm. De interceptie speelt bij lage vegetaties een relatief geringe rol, zodat dit onder vrij normale weersomstandigheden niet tot erg grote afwijkingen zal leiden. In vergelijking met de beide andere berekeningsmethoden levert methode 3a de meest 'gemiddelde' resultaten.

Voor het loofbos zijn de verschillen op dagbasis en op maandbasis vrij groot. Voor de methode van Penman blijkt dat er een te grote verdamping gedurende een heldere dag en een te kleine verdamping gedurende een sombere dag wordt berekend. Met deze methode dient derhalve op dagbasis met de eerder genoemde over- en onderschrijding rekening te worden gehouden.

De interceptie die bij de methoden 5b en 6b aan de hand van een percentage van de neerslag berekend wordt, levert lagere waarden op dan de methode volgens GELGAM, die bij 5a en 6a is toegepast. Deze laatste methode lijkt de meest betrouwbare resultaten op te leveren. Bij de berekening van de interceptie als percentage van de neerslag wordt een te lage hoeveelheid berekend voor perioden met veel kleine buien, terwijl aan de andere kant gedurende een droge periode met enkele forse buien een te grote interceptie wordt berekend.

Afgezien van de interceptie levert methode 5 een maandtotaal op dat, gezien literatuurgegevens, redelijk te noemen is terwijl het maandtotaal bepaald volgens methode 6 aan de lage kant is. De straling is voor de methoden 5 en 6 met dezelfde parameters bepaald, zodat deze gelijk zijn. Dit betekent dat met deze parameters voor de methode van Priestley en Taylor de waarde voor α vrij goed geschat is. Voor de methode van Rijtema/Monteith betekent dat, dat wanneer de verdamping te laag is berekend, de waarden voor r_a en r_s onjuist zijn. Eerder is al aangegeven dat r_a weinig invloed heeft op de grootte van de verdamping. R_s is van veel factoren, die in de praktijk moeilijk te bepalen zijn, afhankelijk. Deze zijn hier blijkbaar te hoog ingeschat. Ook is het mogelijk dat de basiswaarde van 80 s.m^{-1} te hoog is. Hiervoor zijn echter geen duidelijk aanwijzingen.

Conclusie

De hier berekende verdampingsgegevens kunnen niet getoetst worden aan bijvoorbeeld tegelijkertijd uitgevoerde lysimeterproeven. Dit maakt dat de gegevens alleen onderling en met literatuurgegevens vergeleken kunnen worden.

Over het algemeen wijken de resultaten onderling niet sterk af, wat erop duidt, dat de gekozen gewasfactoren en parameters redelijk tot goed voldoen. Alleen de verdamping van het loofbos volgens de methode Rijtema/Monteith is aan de lage kant. Een te hoge gewasweerstand is hier naar alle waarschijnlijkheid de oorzaak van. Deze weerstand is in de praktijk echter moeilijk te bepalen.

Tussen de drie berekeningsmethoden worden de grootste verschillen in de verdamping veroorzaakt door de interceptie. Bij de methode van Penman en voor korte vegetaties eveneens de methode van Priestley en Taylor is de interceptie in een factor verdisconteerd. Hierbij vindt

bij een heldere periode echter een overschatting en bij een sombere periode een onderschatting van de verdamping plaats. Voor een vegetatie met een grote interceptiecapaciteit geldt dit in sterkere mate dan voor een vegetatie met een geringe interceptiecapaciteit. Hierdoor zijn deze methoden ongeschikt om voor korte perioden, bijvoorbeeld voor een dag, de verdamping te berekenen. Onder vrij normale meteorologische omstandigheden zullen deze methoden voor korte vegetaties over een periode van een maand en voor hogere vegetaties over een periode van een seizoen wel acceptabele verdampingswaarden opleveren. Indien de interceptie met een geschikt model apart berekend wordt, kunnen deze methoden wel voor kortere perioden gebruikt worden. De factoren f en α in respectievelijk de formule van Penman en de formule van Priestley en Taylor dienen dan echter wel met een percentage verminderd te worden dat gelijk is aan het aandeel van de interceptie in de verdamping.

De methode waarbij de interceptie als percentage van de neerslag wordt berekend, levert tijdens een droge periode met enkele forse buien een te hoge interceptie en tijdens een periode met veel kleine buien een te lage interceptie op. Deze methode is voor dergelijke perioden minder geschikt om de interceptie te bepalen. Met de methode GELGAM wordt dit probleem ondervangen. Hierbij wordt van een interceptiereservoir met een maximale dagcapaciteit gebruik gemaakt. Nog geschikter zijn de modellen waarbij de interceptie per bui wordt berekend. De nadelen van dergelijke modellen zijn eerder reeds besproken.

LITERATUUR

- Bakker, T.W.M., 1984. Het Dwingelderveld. Deelrapport geohydrologie. 175 p. Staatsbosbeheer, Utrecht.
- Begeleidingsgroep GELGAM, 1984. Herziening van de berekening van gewas-verdamping in het hydrologische model GELGAM. Rapport van de ad hoc groep verdamping. Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer. 92 p.
- Bruin, H.A.R. de, 1977. Een computerprogramma voor het berekenen van de inkomende straling aan de rand van de atmosfeer per dag door een horizontaal oppervlak. KNMI-verslagen V294, De Bilt. 7 p.
- Bruin, H.A.R. de en W.N. Lablans, 1980. Een test van een nieuwe berekeningswijze van de open-water-verdamping volgens Penman ten behoeve van een snelle voorlichting. KNMI-verslagen V357, De Bilt.
- Boheemen, P.J.M. van, 1977. Verschillen tussen drie berekeningswijzen van de open waterverdamping. I.C.W., nota 956, Wageningen.
- Calder, I.R., 1977. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, central Wales. Journal of hydrology 33: 247-275.
- Cultuurtechnische Vereniging, 1974. Cultuurtechnisch Vademecum, Utrecht.
- Dijkema, M.R., D.W. Hijdra, L. v.d. Meulen en J.Ph. Witte, 1985. Ecohydrologische beschrijvingen en vergelijking van een tiental natuurgebieden. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Leersum.
- Feddes, R.A., 1971. Water heat and crop growth. Veenman, Wageningen. 184 p.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudoc, Wageningen. 189 p.
- Frantzen, A.J. en W.R. Raaff, 1982. De relatie tussen globale straling en de zonneschijnduur in Nederland. KNMI, wet.rapport 82-5.
- Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. Quart.J.R.Meteorol.Soc. 105: 43-55.
- Graaf, M. de, 1983. Beschouwing over de berekeningswijzen die door het KNMI worden gehanteerd ter berekening van de open water verdamping. ICW, nota 1410, Wageningen.
- Hoeks, J., 1985. Verzuring van bodem en grondwater als gevolg van atmosferische depositie. ICW, nota 1480. Wageningen. 27 p.

- Jansen, P.C. en R.H. Kemmers, 1980. Relaties tussen hydrologische parameters en enkele vegetatietypen van het C.R.M. reservaat 'Groot-Zandbrink'. ICW, nota 1180, Wageningen.
- Kroonen, W.A.J.M., 1985. CROWAR. A computer program to calculate crop water requirements. ICW, nota 1583, Wageningen. 35 p.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), Maandelijks Overzicht van de Weersgesteldheid. KNMI, De Bilt.
- Makkink, G.F., 1962. Vijf jaren lysimeteronderzoek: Een hydrologische studie. Verslagen Landbouwk. Onderzoekingen: 68-1, 241 p.
- Molchanov, A.A., 1960. The hydrological role of forests. Academy of Science, USSR. Institute of Forestry. (Translation from Russian by Israel program of Scientific Translation, 1983).
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. Proc. Symp. Soc. Exp. Biol. 19: 205-234.
- Oostrom, H.P. en J.H.W.M. van Schijndel, 1979. De chemische samenstelling van het bovenste grondwater bij natuurlijke begroeiingen op kalkarme zandgrond. ICW, nota 1075, Wageningen.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London A193.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972. On the assesment of surface flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review. 100, 81-92.
- Roestel, J. van, 1984. Transpiratie en interceptie van bos: een literatuurstudie. Studiecommissie Waterbeheer, Bos, Natuur en Landschap. Rapport 7b, bos en landschap. Utrecht. 186 p.
- Romijn, E., 1985 Valkuilen bij het bepalen van de potentiële verdamping van grasland door middel van 'f'-factoren. H2O, jaargang 18, nr. 12, pag. 265-270.
- Rutter, A.J. and A.J. Morton, 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. Journ. of Appl. Ecol. 14: 567-588.
- Rijtema, P.E., 1965. An analyses of actual evapotranspiration, Pudoc, Wageningen.
- Rijtema, P.E. en A.H. Ryhiner, 1966. De lysimeters in Nederland. ICW, Wageningen.
- Scholte Ubing, D.W., 1959. Over stralingsmetingen, de warmtebalansen en de verdamping van gras. Meded. Landbouwhogeschool 59. 10, Wageningen. 93 p.

- Slabbers, P.J., 1977. Surface roughness of crops and potential evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 34: 181-191.
- Slaytor, R.O., 1967. Plant-water relationships. Academic Press, London/New York. 366 p.
- Tollenaar, P., 1972. Inspoeling en uitspoeling van enkele chemische elementen in 2 lysimeters te Castricum. Verslag van een doctoraal onderzoek. Instituut voor Aardwetenschappen der Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Vereniging voor Groenvoorziening, 1984. Water voor groen: Vierde Vlaams Wetenschappelijk Congres over Groenvoorziening te Brussel. Ver. voor Groenvoorziening. Brussel. 780 p.
- Volmuller, I.L., 1972. Een concept van de ontwateringseisen van bos aan de hand van de evaporatie van bos en de invloed van bos op het grondwater en omgekeerd. Doctoraalstudie Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Werkcommissie verdampingsonderzoek, 1985. Verdampingsonderzoek in Nederland. 1942-1971. Eindverslag. 167 p.
- Wijk, W.R. van, e.a., 1963. Physics of plant environment. North Holland Publishing Company, Amsterdam. 382 p.