

Inleiding

Ten behoeve van het opstellen van de provinciale grondwater- en waterhuishoudingsplannen is het van belang te weten hoe groot de potentiële verdamping is, onder meer om de waterbehoefte voor de landbouw te bepalen.

De potentiële verdamping van een gewas wordt met een tot nu toe vaak gebezigde methode berekend uit de open water verdamping door de laatste met een factor *f* te vermenigvuldigen. Deze methode bezit echter enkele valkuilen waardoor herhaaldelijk discussie ontstaat over de grootte van *f*.



DRS. E. ROMIJN
Dienst Waterbeheer
Gelderland

Het verdient dan ook aanbeveling om een andere methode te ontwikkelen.

Definities

Eerst dienen enkele termen nader gedefinieerd te worden.

Thorntwaite voerde in 1948 het begrip 'potential evapotranspiration' in (hier E_p genoemd, zie lijst van symbolen). Hieronder verstond hij de verdamping van (bodem en) het gewas onder optimale watervoorziening, zodat water geen beperkende factor voor het gewas is. Past men dit begrip toe op een uitgestrekt aaneengesloten en van buiten droog grasdek, waarbij de gewashoogte varieert tussen 8 en 15 cm, dan spreekt men van de gras referentie verdamping E_{grass} [Gespreksgroep Hydrologische Terminologie, 1983].

De nat-gewas verdamping E_w duidt de verdamping aan van een van buiten geheel nat gewas.

De open water verdamping E_o is de verdamping van een uitgestrekt glad wateroppervlak onder voorwaarde van verwaarloosbare energie-opslag in het water tijdens het verdampingsproces.

De open water verdamping wordt wel gemeten met de verdampingspan, maar deze voldoet niet altijd aan bovengenoemde voorwaarden. *De eerste valkuil!*

De panverdamping E_{pan} is de gemeten waarde van de verdamping uit een pan. Deze verdamping hangt overigens af van het type en de opstelling van de pan [Doorenbos & Pruitt, 1981].

De formule van Penman

De open water verdamping E_o wordt in de regel berekend met de Penman formule. Hiervan bestaan echter verschillende versies: *de tweede valkuil!*

In 1948 publiceerde Penman de resultaten van zijn in 1944 en 1945 te Rothamsted (UK) uitgevoerde onderzoek naar de verdamping van open water, kale grond en gras [Penman, 1948]. De open water verdamping werd bepaald met een ingegraven pan (diameter 2,5 voet, diepte 2 voet), de verdamping van kale grond en 'kort' gras ('turf') met behulp van lysimeters. De formule voor E_o , getoetst aan E_{pan} , luidde volgens Penman:

$$E_o = 0,35 (1 + 9,8 \times 10^{-3} u_2) (e_{so} - e_d) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

u_2 windsnelheid op 2 m hoogte (mijl per dag)
 e_{so} verzadigingsdampdruk bij temperatuur van wateroppervlak (mm Hg)
 e_d dampdruk op 2 m hoogte (mm Hg)

In SI eenheden:

$$E_o = 0,26 (1 + 0,54 u_2) (e_{so} - e_d) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \quad (1)$$

u_2 in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, e_{so} en e_d in mbar

Opmerkingen:

1. De ingevoerde waarden waren 24 h-gemiddelden c.q. het gemiddelde van dagmaximum en -minimum (voor luchttemperatuur).
2. Toetsing vond plaats met dagwaarden. Men mag de formule dus niet zonder meer op uur-basis toepassen.
3. De 'Lake Hefner' studie had tot gevolg dat Penman zijn formule wijzigde in

$$E'_o = 0,35 (0,5 + 9,8 \times 10^{-3} u_2) (e_{so} - e_d),$$

volgens Thom & Oliver [1977] ten onrechte. Het KNMI past deze formule wél toe, welke in SI luidt:

$$E'_o = 0,26 (0,5 + 0,54 u_2) (e_{so} - e_d) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \quad (2)$$

4. $E_o / (e_{so} - e_d)$ heet windfunctie.

Om de noodzaak tot meting van de temperatuur van het wateroppervlak te elimineren stelde Penman met behulp van de energiebalans de zogenaamde gecombineerde formule op, bekend als *de 'Penman formule'*

$$E_{OP} = \frac{(s/\lambda) Q^* + \gamma E_a}{s + \gamma} \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \quad (3)$$

E_a waarde van E_o van formule (1) of (2) waarbij e_{so} vervangen wordt door e_s welke gelijk is aan de verzadigingsdampdruk op 2 m hoogte bij de daar geldende temperatuur; Q^* netto straling.

Opmerkingen:

5. Het KNMI past de gecombineerde Penman formule toe en publiceert deze E_{OK} waarden in de maandelijkse overzichten weersgesteldheid (MOW).

De invoergegevens (temperatuur, luchtvochtigheid) berusten echter op 'overdag' gemiddelden in plaats van 24 h-gemiddelden. *De derde valkuil!*

Vanaf 1971 worden echter wel 24 h-gemiddelden ingevoerd (E_{OK}^{24}). Om de reeks echter niet te verbreken worden in de MOW nog steeds de 'overdag' waarden gegeven (E_{OK}^{MOW}). Het verschil tussen E_{OK}^{MOW} en E_{OK}^{24} bedraagt circa 10%.

Voor een normaal jaar (gemiddelde 1911 t/m 1975) bedraagt voor De Bilt $E_{OK}^{24} = 614 \text{ mm}$, $E_{OK}^{MOW} = 676 \text{ mm}$ [De Bruin, 1979]

6. Bij berekening van E_{OP} respectievelijk E_{OK} wordt energie-opslag in water verwaarloosd.

7. Het KNMI berekent Q^* uit R_n :

$$Q^* = R_n \times 86400$$

$$R_n = 0,94 R_A (0,2 + 0,48 n/N)$$

$$-\sigma T^4 (0,47 - 0,067 \sqrt{e_d}) (0,2 + 0,8 n/N)$$

Penman bepaalde de verdamping van kort gras zoals reeds opgemerkt met behulp van lysimeters gelegen te midden van een omgeving 'reasonably described as short vegetation'. Niettemin lag plaatselijk op 80 yd afstand bos, in de directe omgeving aan de oostzijde een voederbietenveld en aan de noord- en westzijde het ene jaar haver en het andere jaar hooiland. Alleen aan de zuidzijde lag uitsluitend weiland. Penman vond door vergelijking van lysimeter en pangegevens de volgende *f*-waarden.

maart, april, september, oktober

$$f = E_p / E_{pan} = 0,7 \text{ (0,6 tot 0,9)}$$

mei tot en met augustus

$$f = E_p / E_{pan} = 0,8 \text{ (0,7 tot 1,0)}$$

In het voorjaar worden hogere *f*-waarden gevonden dan in het najaar, wellicht verklaarbaar uit effecten van energie-opslag in water en bodem. Deze effecten zijn verschillend voor water en bodem wegens hun verschillende warmtecapaciteit en in vóór- en najaar wegens verschil in temperatuur. Hierdoor kan de gewasverdamping in het voorjaar relatief ten opzichte van panverdamping hoger liggen dan in het najaar. Het verschijnsel is ook terug te vinden in het rapport van de Werkcommissie Verdampingsonderzoek [1985].

De formule van Thom & Oliver

De verdamping van een gewas kan niet direct met de Penman formule worden berekend omdat hij om een aantal redenen van die van open water verschilt:

- de 'ruwheid' (vertaald als ruweidslengte z_o , z_o is ongeveer $0,1 \times$ gewaslengte) van een gewas is groter dan die van een glad wateroppervlak, waardoor turbulent damptransport bij gelijke meteorologische omstandigheden boven gewas groter is dan boven water;
- de reflectie van inkomende kortgolfige straling is voor gewassen groter dan voor

water, waardoor Q^* kleiner wordt dan voor water;

– de verdamping door het gewas heen wordt onder meer geregeld door huidmondjes die in de regel 's nachts sluiten. Zij kunnen ook onder invloed van een lage bodemwaterpotentiaal sluiten (bij cultuurgewassen moet men denken aan het traject van -1 tot -15 bar, bij nog lagere potentiaal treedt verwelking op). De orde van grootte van de diffusieweerstand van huidmondjes, gemiddeld over het bladoppervlak, ligt voor diverse cultuurgewassen tussen 50 en $200 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ [Monteith, 1975]. Genoemde verschillen met open water verdamping zijn door Monteith en Rijtema [1965] in de gecombineerde Penman formule als volgt verwerkt:

$$E_{\text{gewas}} = \frac{(s/\lambda) Q^* + \gamma E_a^g}{s + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (4)$$

E_a^g geeft aan dat men rekening moet houden met een andere windfunctie dan voor water wegens andere ruwheidslengte z_0 .

r_a diffusie weerstand lucht ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

r_c diffusie weerstand plantendek ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

indien $r_c = 0$ wordt $E_{\text{gewas}} = E_w$.

De relatie tussen de windfunctie en r_a is als volgt [Thom & Oliver, 1977]:

$$E_a^g / (e_{s0} - e_d) = \frac{\rho c_p}{\gamma \lambda r_a} x$$

$x \text{ } 86400 \text{ (mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mbar}^{-1}\text{)}$

Thom & Oliver hebben voor r_a de volgende relatie opgesteld:

$$r_a = 250 \left\{ \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z/z_{OP})} \right\}^2 / (1 + 0,54 u_2) \text{ s} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5)$$

z_{OP} ruwheidslengte behorend bij oorspronkelijke Penman windfunctie (verg. (1)),

$z_{OP} = 0,137 \text{ cm}$

z_0 ruwheidslengte gewas (m)

z waarnemingshoogte (2 m)

Behalve E_a dient ook Q^* ten opzichte van open water verdamping te worden aangepast: $0,94 R_A$ van open water moet worden vervangen door $0,75 R_A$ voor het gewas.

Thom & Oliver vonden voor potentiële verdamping $r_c = 65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ (behorend bij 24 h-gemiddelde invoercijfers), althans als jaargemiddelde voor een landelijk gebied met 70% grasland in Buckinghamshire.

Verwacht mag worden dat wegens het 's winters veelvuldiger optreden van E_w , r_c gemiddeld 's winters iets lager en 's zomers iets hoger dan $65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ligt.

Ter illustratie volgen hieronder enkele berekeningen met de formule van Thom & Oliver (E_{TO}) met $r_c = 65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$. De fysische constanten zijn ontleend aan Doorenbos & Pruitt [1981].

De stralingsterm is $ST = \frac{(s/\lambda) Q^*}{s + \gamma(1 + r_c/r_a)}$,

de windterm is $WT = \frac{\gamma E_a}{s + \gamma(1 + r_c/r_a)}$

(r_c eventueel gelijk nul).

In tabel I is R_A equivalent aan $14,5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (gemiddelde zomerhalfjaar voor 50° NB).

De invoercijfers voor het gemiddelde zomerhalfjaar over 1950-1980 zijn:

relatieve vochtigheid 79%, temperatuur

$13,7^\circ \text{ C}$, windsnelheid $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, n/N 0,39,

ontleend aan De Bilt (24 h-cijfers). Voor 1976

zijn zij 73%, $15,0^\circ \text{ C}$, $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en 0,50.

De zomerperiode beslaat april tot en met september.

Uit het rekenvoorbeeld blijkt in eerste instantie de grootte van de klimatologische invloed op de verdamping. In 1976 lag E_{OK}

22% hoger en lagen zowel E_{TO} ($z_0 = 1$) als E_w ($z_0 = 1$) zelfs 24% hoger dan voor 1950-1980.

De reductie van E_{TO} ten opzichte van E_w neemt toe met z_0 , en is voor 1976 nauwelijks verschillend van 1950-1980.

De f factor neemt toe met z_0 en is voor 1976 pas bij $z_0 = 10 \text{ cm}$ (gewaslengte circa 1 m) duidelijk (dat wil zeggen 0,1 punt) hoger dan voor 1950-1980.

De invloed van meteorologische factoren op de f factor voor R_A equivalent aan $16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (gemiddelde voor juli op 50° NB) en $z_0 = 1 \text{ cm}$ (gewaslengte circa 10 cm) is weergegeven in tabel II.

De ST bedraagt iets meer dan de helft van de netto straling (bij 10° C 0,55 en bij 20° C 0,69).

Dit betekent dat als $WT > ST$ de Q^* niet voldoende energie levert voor de verdamping

TABEL I – Rekenvoorbeeld $f = E_{TO}/E_{OK}^{24}$ voor $R_A = 14,5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ en meteorologische gegevens zomerhalfjaar De Bilt. ST = stralingsterm, WT = windterm (op 0,1 mm afgerond) $r_c = 65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$

		z_0 cm	ST $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	WT $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	ST + WT $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	E_{TO}/E_w	$f = E_{TO}/E_{OK}^{24}$
E_{OK}^{24}	1950-1980		2,2	0,5	2,7		
	1976		2,6	0,7	3,3		
E_w	1950-1980	0,2	1,5	0,8	2,3		
		1,0	1,5	1,4	2,9		
		2,5	1,5	2,0	3,5		
		5,0	1,5	2,8	4,3		
		10,0	1,5	4,2	5,7		
	1976	0,2	1,8	1,0	2,8		
		1,0	1,8	1,8	3,6		
		2,5	1,8	2,6	4,4		
		5,0	1,8	3,6	5,4		
		10,0	1,8	5,5	7,3		
E_{TO}	1950-1980	0,2	1,2	0,7	1,9	0,81	0,70
		1,0	1,1	1,0	2,1	0,72	0,78
		2,5	0,9	1,3	2,2	0,63	0,82
		5,0	0,8	1,6	2,4	0,55	0,87
		10,0	0,7	1,8	2,5	0,44	0,93
	1976	0,2	1,4	0,8	2,2	0,81	0,67
		1,0	1,3	1,3	2,6	0,72	0,79
		2,5	1,1	1,7	2,8	0,64	0,85
		5,0	1,0	2,0	3,0	0,56	0,91
		10,0	0,8	2,5	3,3	0,46	1,00

TABEL II – Waarden van $f = E_{TO}/E_{OK}^{24}$ voor verschillende meteorologische omstandigheden, bij $R_A = 16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, $z_0 = 1 \text{ cm}$ (gewaslengte circa 10 cm), $r_c = 65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$.

Relatieve vochtigheid		50%		70%		90%		
		u_2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$^\circ \text{C}$	u_2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$^\circ \text{C}$	u_2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$^\circ \text{C}$	
n/N		20	10	20	10	20	10	
	0	0	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7
		5	1,0	1,0	1,0	0,8	0,7	0,6
10		0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	
0,5	0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	
	5	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	
	10	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	
1	0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	
	5	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	
	10	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	

en dus warmte uit de omgeving (voornamelijk bodem) moet worden onttrokken. Hierdoor daalt de temperatuur en de verdamping neemt af.

De afb. 1, 2 en 3 geven een overzicht van de variatie van de verdamping zelf als gevolg van de meteorologische factoren.

Berekeningen als weergegeven in tabel II werden eveneens uitgevoerd voor $R_A = 12,7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (waarde voor april op 50° NB). Voor $z_0 = 0,2 \text{ cm}$ (gewaslengte circa 2 cm) en $z_0 = 2,5 \text{ cm}$ (gewaslengte circa 25 cm) zijn enkele uitkomsten weergegeven in tabel III.

Een en ander leidde tot de volgende conclusies met betrekking tot $f = E_{TO}/E_{OK}^{24}$:

a. de gras referentie verdamping voor het zomerhalfjaar (meteorologische omstandigheden De Bilt) ligt op $0,8 E_{OK}^{24}$,

zowel voor het normale jaar als voor een droog-warm jaar (tabel I);

b. de invloed van R_A is niet groot: het verschil tussen $f (R_A = 12,7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1})$ en $f (R_A = 16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1})$ voor verschillende meteorologische omstandigheden ligt op enkele % (< 0,1 punt); f ligt hoger bij lagere straling.

c. f neemt toe als (zie tabel I, II, III):

- de temperatuur toeneemt
- de relatieve luchtvochtigheid afneemt
- de windsnelheid afneemt
- de bewolgingsgraad toeneemt
- de ruwheidslengte toeneemt, behalve bij de combinatie hoge relatieve vochtigheid - lage bewolgingsgraad (een onwaarschijnlijke combinatie);

d. bij grote verdampingsvraag (grote E_{OK}), dit is bij krachtige wind, onbewolkte hemel, hoge temperatuur (20 °C), lage relatieve

vochtigheid (50%), ligt f voor gras referentie verdamping op 0,7, dus niet hoger dan 'normaal'. De veel gehoorde stelling dat f toeneemt met E_o kan met tabel II niet worden bewezen.

Bovengenoemde conclusies berusten op modelberekeningen en kunnen slechts indicatief zijn voor de werkelijkheid. Het model van Thom & Oliver zal vooral onder winterse omstandigheden niet mogen worden toegepast omdat effecten van sneeuw en vorst en van de winterrust van het gewas niet in het model zijn beschreven. Ook kan door extra energiebehoefte boven Q^* de verdamping met E_{TO} worden overschat (afb. 3).

Metingen met betrekking tot potentiële verdamping van grasland

Verdampingsformules zijn slechts modellen. Metingen zullen uitsluitend moeten geven over f -waarden. Wegens de klaarblijkelijke afhankelijkheid van f van het klimaat dienen vooral Nederlandse gegevens te worden verzameld. Achtereenvolgens komen aan de orde:

- lysimeters
- waterbalansen van stroomgebieden en polders
- meteorologisch onderzoek.

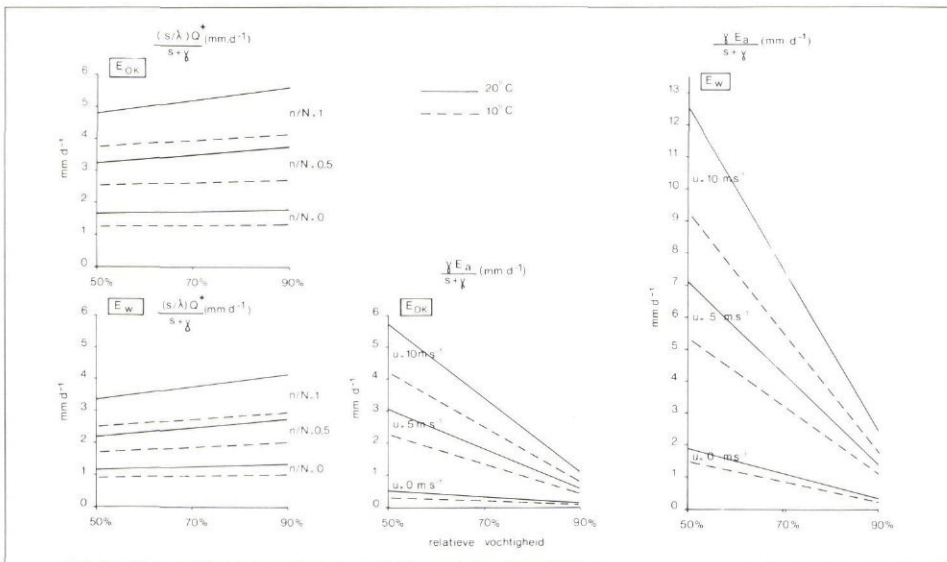
Een probleem bij de bewerking van deze gegevens is dat de verdampingscijfers behalve gewasverdamping ook verdamping van interceptiewater omvatten. Hierdoor is de gemeten verdamping hoger dan de potentiële ($E_W > E_p$). Deze interceptie is voor lage gewassen van de orde van grootte van 10% van de neerslag [Philips, 1979]. Aan de andere kant zal in de proefvelden 's zomers niet iedere dag de potentiële verdamping zijn bereikt. Aangenomen wordt dat deze effecten elkaar opheffen.

a. Lysimeteronderzoek

Het lysimeteronderzoek is onder meer gepubliceerd in Versl. en Med. CHO-TNO (nr. 1, 1952; nr. 3, 1958; nr. 4, 1959; nr. 12, 1966).

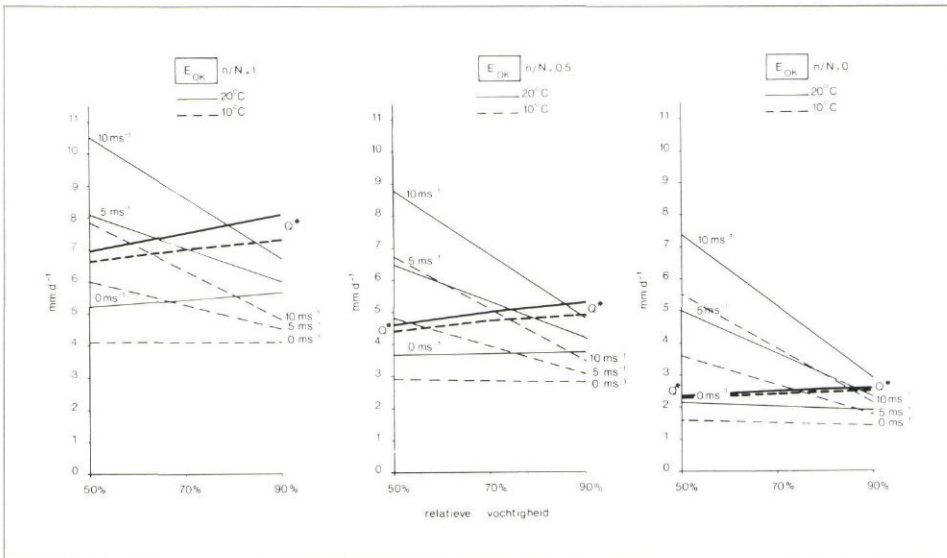
Makkink [1960] bewerkte de gegevens van de weegbare lysimeters te Wageningen. Van de met zand gevulde en met gras begroeide lysimeters (grondwaterstand 50 cm onder maaiveld) bepaalde hij door middel van de waterbalans de verdamping en herleidde deze tot die van zeer kort gras (2 cm gewaslengte, dus z_0 circa 0,2 cm). Vervolgens werd deze gerelateerd aan E_{OK}^{24} (Wageningen) en wel als maandcijfers over de periode maart tot oktober 1953, 1954 en 1955. Hieruit volgde $f = 0,73$. Dezelfde oefening, gerelateerd aan E_o^{24} verkregen uit gemeten straling te Wageningen leverde $f = 0,65$.

Herleiding tot de tijdreeks 1933-1953 gaf op jaarbasis de uitkomst



Afb. 1 - Stralingsterm en windterm van de Penmanformule bij $R_A 16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ voor water (E_{OK}) en voor een nat gewas met ruwheidslengte 1 cm (E_W) in $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ bij verschillende meteorologische omstandigheden.

Afb. 2 - Verdamping van open water E_{OK} in $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ bij $R_A 16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ en verschillende meteorologische omstandigheden.



$$E_p/E_{OK}^{MOW} \text{ (De Bilt)} = \frac{448 \text{ mm}}{693 \text{ mm}} = 0,65$$

Omgerekend naar gras referentie verdamping (zie tabel I, $z_0 = 1 \text{ cm}$) wordt f dan ongeveer 0,73.

In het eindrapport van de Werkcommissie Verdampingsonderzoek [1985] zijn voor de Wageningse lysimeters gevuld met klei de volgende gegevens te vinden. De lysimeters werden elke 4 à 5 weken gemaaid. Gemiddeld over 1952 tot en met 1962 ligt E_p/E_{OK}^{MOW} (De Bilt) op 0,75 (0,49 - 0,96) (april); 0,73 (0,54 - 0,84) (mei); 0,69 (0,54 - 0,83) (juni); 0,66 (0,55 - 0,79) (juli); 0,73 (0,58 - 0,88) (augustus) en 0,67 (0,46 - 0,87) (september); gemiddeld over het zomerhalfjaar op 0,71. Over het zomerhalfjaar varieert f tussen 0,65 (1959) en 0,76 (1962); een lage waarde in het zeer droge jaar 1959 wellicht wegens

TABEL III – Invloed van gewaslengte op E_{TO} bij $R_A = 16,4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ en $r_c = 65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$. De gewaslengte is te stellen op $10 \times z_0 \text{ cm}$.

E _{TO} mm · d ⁻¹		Relatieve vochtigheid		50%		90%			
		°C	z ₀	20°	10°	20°	10°		
n/N	u ₂ m · s ⁻¹								
0	0	0,2	2,1	2,5	0,2	2,3	0,2	2,5	
	10	0,2	5,3	2,5	7,7	0,2	4,8	2,5	1,2
1	0	0,2	4,1	2,5	3,0	3,5	4,0	3,7	2,7
	10	0,2	6,7	2,5	8,6	4,4	5,3	3,5	3,1

scheuren in de klei ondanks de ondiepe grondwaterstand en daardoor een gereduceerde capillaire waterlevering aan het gewas (zie ook afb. 4).

Rijtema [1965] bewerkte gegevens van de

lysimeters te Wageningen over een periode waarin ook het warm-droge jaar 1959 voorkwam. Evenals Penman vergeleek hij de verdampingscijfers met die van een ingegraven pan (diameter 50 cm, diepte 25 cm). Hij stelde een nieuwe formule op voor E₀:

$$E_{OR} = 0,135 u_2 (e_{s0} - e_d) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \text{ (SI eenheden)}$$

In 1959 moest bij drogende omgeving rekening worden gehouden met een 'extra' open water verdamping van 0,5 à 1 mm · d⁻¹ wegens advectie (dit is zijdelingse toevoer van warmte). Door systematische vergelijking van E_p van de lysimeter (grondwaterstand 50 cm onder maaiveld) met E_{pan} werd deze advectie geëlimineerd.

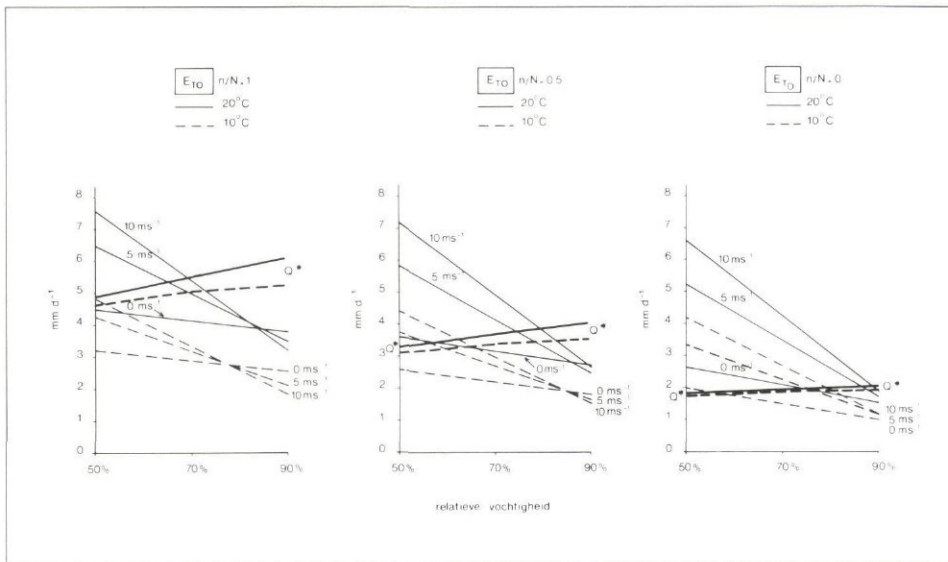
Bij lage verdampingsstroom (E_p < 2 mm · d⁻¹) vond Rijtema $f = E_p/E_{OR} = 0,8$ en bij hogere verdamping hogere f -waarden met een grote spreiding namelijk tussen 0,8 en 1,1.

Van Boheemen [1977] bepaalde dat voor een normaal jaar (De Bilt) geldt:

$$E_{OR} \cong 0,9 E_{OK}^{24} \cong 0,8 E_{OK}^{MOW}$$

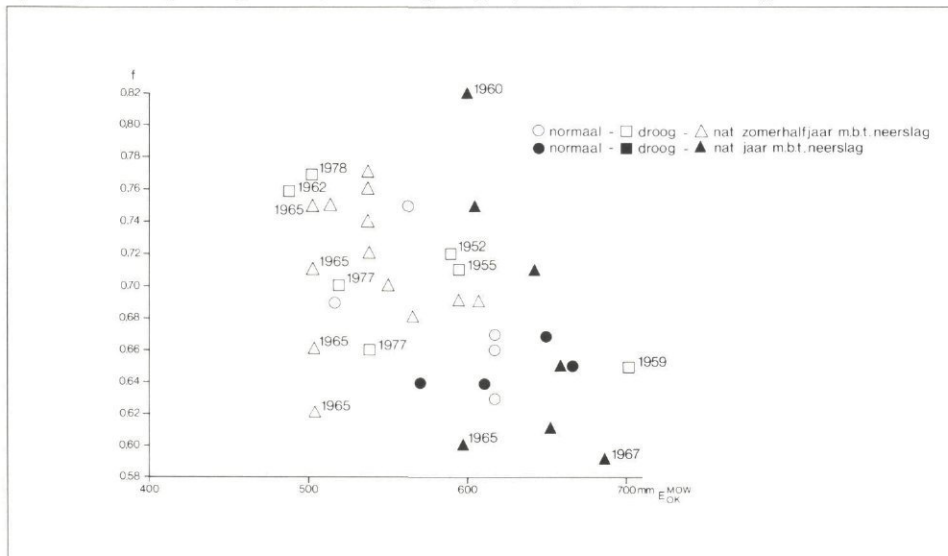
Dit betekent dat $f = E_p/E_{OK}^{MOW}$ bij Rijtema varieerde tussen 0,6 en 0,9.

In de periode 1947-1971 zijn door de Werkcommissie Verdampingsonderzoek Wageningen waterbalansen opgesteld voor de Rottegatpolder, een akkerland op klei, 83 ha groot. In het midden van de polder ligt het drainage lysimeter veld (4,6 ha), dat vanaf 1960 met gras was begroeid. Gezien de ondiepe grondwaterstand (50 à 75 cm onder maaiveld) wordt aangenomen dat de verdamping potentieel was. De verdamping van de polder als geheel (akkerland!) was over de periode 1962-1970 circa 10% hoger dan voor het drainage lysimeter veld, verklaarbaar uit hogere ruweheidsfactor en braakliggen [Keijman, 1982]. De waarde van f ten opzichte van E_{OK}^{MOW} (Eelde) voor het drainage lysimeter-veld over 1960 tot en met 1970 varieerde tussen 0,6 (1965, 1966, 1967) en 0,8 (1960) en was gemiddeld 0,65 (jaarcijfers).



Afb. 3 - Potentiële verdamping van een droog gewas met ruweheidslengte 1 cm en diffusieweerstand 65 sm⁻¹ in mm · d⁻¹ bij R_A 16,4 mm · d⁻¹ en verschillende meteorologische omstandigheden.

Afb. 4 - f-waarden grasland gemiddeld per zomerhalfjaar of per jaar, bepaald uit veldwaarnemingen in Nederland.



b. *Waterbalansen van stroomgebieden*

Het Leerinkbeek rapport [Colenbrander, 1970] bevat een aantal waterbalansen voor gedeelten van het stroomgebied van de Leerinkbeek in Oost Gelderland (meetpunten 10, 12, 13, 14) over de periode 1964-1967. De jaren 1965 en 1966 waren nat. In het Leerinkbeek rapport wordt aannemelijk gemaakt dat in de periode 1964-1967 de potentiële verdamping werd gehaald. Alhoewel het stroomgebied grotendeels uit grasland bestond, zal de terreinruwheid wel groter zijn dan voor gras referentie verdamping wegens het parklandschap en de akkerbouw. De hogere f-waarden 'swinters moeten verklaard worden uit nat-gewas verdamping. De verhouding $f = E_{balans} / E_{OK}^{MOW}$ (Winterswijk) is 0,7 voor het gemiddeld zomerhalfjaar (alle meetpunten) en tussen 0,8 (meetpunt 10,12) en 1,0 (meetpunt 13, 14) voor de winter.

c. *Meteorologisch onderzoek*

Op het drainage lysimeter veld van de Rottegatpolder werd de verdamping ook meteorologisch bepaald, dat wil zeggen uit berekening van verticaal damtransport. Een berekening van de verdamping met de formule E_{TO} bleek de met behulp van de waterbalans bepaalde maandcijfers over 1962 tot en met 1970 goed te simuleren, alleen in maart en april werden significant hogere verdamping berekend met E_{TO} , namelijk circa 20% te hoog [Keijman, 1982]. Het laatste is wellicht te verklaren uit de met de formule van E_{TO} verwaarloosde warmte-opslag (c.q. bodemopwarming) in het voorjaar.

De Bruin [1981] bepaalde op het KNMI proefveld Cabauw voor het jaar 1977 met meteorologische methoden de gewas-verdamping van grasland (klei op veen met ondiepe grondwaterstand).

Over de periode mei tot september was E_p/E_{OK}^{24} (gemeten straling) = 0,89 en wegens E_{OK}^{24} (gemeten straling)/ E_{OK}^{MOW} (De Bilt) = 0,74

was $f = E_p/E_{OK}^{MOW}$ (De Bilt) = 0,7

Stricker [1981] bepaalde eveneens meteorologisch in het proefgebied Hupsel (dit is meetpunt 10 Leerinkbeek) voor 1977 en 1978 voor grasland met ondiepe grondwaterstand een verdamping die aan E_p gelijkgesteld kan worden.

De getallen van zijn publikatie zijn gecorrigeerd wegens een gebleken ijkfout. Na correctie zijn de cijfers als in tabel IV terwijl tabel V een samenvatting geeft van de verdampingsmetingen grasland met betrekking tot de f-factor.

Voor de zomerperiode liggen de waarden

SYMBOLENLIJST

c_p	specifieke warmte lucht ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
e_d	dampdruk op 2 m hoogte (mbar)
e_s	verzadigingsdampdruk (mbar)
e_{so}	verzadigingsdampdruk bij oppervlakte temperatuur (mbar)
E_a	aerodynamische verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{grass}	gras referentie verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_o	open water verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{OK}^{MOW}	open water verdamping ($mm \cdot d^{-1}$) volgens maandelijks overzicht weersgesteldheid KNMI
E_{OK}^{24}	KNMI open water verdamping met 24 h-gemiddelde invoergegevens ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{OP}	Penman open water verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{OR}	Rijtema open water verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{pan}	panverdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_p	potentiële verdamping ($mm \cdot d^{-1}$)
E_{TO}	gewasverdamping Thom & Oliver ($mm \cdot d^{-1}$)
E_w	verdamping nat gewas ($mm \cdot d^{-1}$)
f	potentiële verdamping gedeeld door open water verdamping
n/N	relatieve zonneschijnduur
Q*	netto straling (= $R_n \times 86400$)
r_a	diffusieweerstand van lucht ($s \cdot m^{-1}$)
r_c	diffusieweerstand van plantendek ($s \cdot m^{-1}$)
R_A	extraterrestrische straling ($W \cdot m^{-2}$)
R_n	netto straling ($W \cdot m^{-2}$)
s	helling verzadigingsdampdruk curve ($mbar \cdot K^{-1}$)
T	absolute temperatuur (K)
u	windsnelheid ($m \cdot s^{-1}$)
z_o	ruwheidslengte (m)
γ	psychrometer constante ($mbar \cdot K^{-1}$)
λ	specifieke verdampingswarmte van water ($J \cdot kg^{-1}$)
ρ	dichtheid lucht ($kg \cdot m^{-3}$)
σ	Stefan-Boltzmann constante ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

$f = E_p/E_{OK}^{MOW}$ voor grasland in Nederland dus blijkbaar tussen 0,6 en 0,8 als half-jarlijks gemiddelde. De waarde 0,82 van de Rottegatpolder (1960) komt slechts één (nat) jaar voor, zodat de interceptie de f-factor kan hebben opgevoerd via E_w .

Reeds in het begin van dit hoofdstuk is opgemerkt dat de verdamping van interceptie water wordt geacht een eventuele verdampingsreductie door bodemwater tekort te compenseren in de totale zomerbalans. Bij de in tabel V opgevoerde objecten werd daarom

TABEL IV – Meteorologisch bepaalde verdamping E_p proefgebied Hupsel en $f = E_p/E_{OK}^{MOW}$ (Winterswijk), afgerond op 0,05.

	E_p Hupsel mm		E_{OK}^{MOW} (Winterswijk) mm		f	
	1977	1978	1977	1978	1977	1978
april - juni	185,3	192,4	283	270	0,65	0,7
juli - september	175,4	191,1	235	230	0,75	0,85
zomer	360,7	383,5	518	500	0,7	0,75

TABEL V – Samenvatting verdampingsmetingen grasland met betrekking tot f-factor.

Gebied	Periode	f	Gerelateerd aan
Lysimeters Wageningen (Werkcommissie Verdampingsonderzoek, 1985)	1952 t/m 1962 zomerhalfjaar	0,65–0,76	E_{OK}^{MOW} De Bilt
Lysimeters Wageningen [Rijtema, 1965]	dagwaarden	0,6–0,9	E_{OK}^{MOW} De Bilt
Drainage lysimeterveld Rottegatpolder	1960 t/m 1970 jaar	0,6–0,8	E_{OK}^{MOW} Eelde
Leerinkbeek	1964–1967 zomerhalfjaar jaar	0,7 0,7–0,8	E_{OK}^{MOW} Winterswijk
Cabauw	1977 zomerhalfjaar	0,7	E_{OK}^{MOW} De Bilt
Hupsel	1977, 1978 zomerhalfjaar	0,7–0,75	E_{OK}^{MOW} Winterswijk

steeds aangenomen dat de verdamping potentieel was. Dit uitgangspunt, uit gebrek aan waarnemingen geboren, betekent een onzekerheid in de potentiële verdamping van circa 10%.

De gewaslengte zal gemiddeld zeker niet kleiner dan 10 cm zijn geweest, zodat uit tabel V volgt dat de gras referentie verdamping voor het zomerhalfjaar circa $0,7 E_{OK}^{MOW}$ moet zijn.

Gerelateerd aan E_{OK}^{24} ligt E_{grass} dan op 0,8, in goede overeenstemming met tabel I.

In afb. 4 zijn de gevonden f-waarden uitgezet tegen de betreffende E_{OK}^{MOW} . Met betrekking tot neerslag wordt onder 'normaal' verstaan het traject tussen 40% en 60% onderschrijding.

Conclusies

Uit de voorafgaande theoretische beschouwing en de bij elkaar gezochte Nederlandse verdampingsgegevens van grasland kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De in de literatuur vermelde waarden van $f = E_p/E_0$ zijn niet eenduidig omdat E_0 op verschillende manieren wordt berekend of gemeten. Zo berust E_0 soms op overdag-gemiddelde invoercijfers en soms op 24 h-gemiddelde invoercijfers; soms op berekende en soms op gemeten straling etc.
- Bij een eenduidige methode van vaststellen van E_0 zal f variëren wegens – verschillende gewaslengte (ruwheidslengte) – verschillende meteorologische factoren – effecten van warmte-opslag in bodem en water en beperkingen in beschikbare energie voor verdamping.
- Uit theoretische overwegingen blijkt dat er voor gras geen directe relatie tussen f en E_0 is, dus dat niet à priori een hogere f-waarde bij een hogere E_0 -waarde hoort. Dit wordt veroorzaakt doordat verschillende meteorologische factoren tegen elkaar inwerken bij hun invloed op f.
- Uit de verzamelde lysimeter, waterbalans en meteorologische onderzoeken blijkt dat in Nederland als gemiddelde over het zomerhalfjaar voor $f = E_{grass}/E_{OK}^{MOW}$ (potentiële verdamping van een grasdek met gewaslengte tussen 8 en 15 cm, gerelateerd aan E_0 uit maandoeverzicht KNMI) geldt $f = 0,7 \pm 0,1$.

Referenties

Boheemen, P. J. M. van (1977). *Verschillen tussen drie berekeningswijzen van de open water verdamping*. ICW-nota 956.

Bruin, H. A. R. de (1979). *Neerslag, openwaterverdamping en potentieel neerslagoverschot in Nederland*. KNMI WR 79-4.

Bruin, H. A. R. de (1981). *The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data*. CHO-TNO Versl. Med. 28.

Colenbrander, H. J. (1970). *waterbalansstudies in kleine stroomgebieden*. Deelrapport 11 van Hydrologisch onder-

zoek in het Leerinkbeekgebied. Provincie Gelderland. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1981). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome.

Gespreksgroep Hydrologische Terminologie (1983). *Verklarende hydrologische woordenlijst, III Atmosferisch water*. CHO-TNO Rap. Nota's 8b.

Keijman, J. O. (1982). *Evaporation research in the Rottegatpolder (Netherlands)*. Proc. Symp. Hydrol. Research Basins, Sonderheft Landeshydrologie, Berne.

Makkink, G. F. (1960). *De verdamping uit vegetaties in verband met de formule van Penman*. CHO-TNO Versl. Med. 4.

Monteith, J. L. (1975). *Vegetation and the atmosphere*. Academic Press.

Penman, H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. A, vol. 193.

Philips, R. (1979). *Invloed van het plantendek op de hydrologische kringloop*. Commissie Waterhuishouding Gelderland, Arnhem.

Rijtema, P. E. (1965). *An analysis of actual evapotranspiration*. Pudoc Agric. Res. Rep. 659.

Stricker, J. N. M. (1981). *Methods of estimating evapotranspiration from meteorological data and their applicability in hydrology*. CHO-TNO Versl. Med. 28.

Thom, A. S. and Oliver, H. R. (1977). *On Penman's equation for estimating regional evaporation*. Quart. JR Met. Soc., 103.

Werkcommissie Verdampingsonderzoek (1985). *Verdampingsonderzoek in Nederland 1942-1971*. Rijkswaterstaat.



Spaarbekkens nu en in de toekomst

- Slot van pagina 264

river Rhine and its tributaries in relation to sanitation strategies. Lezing voor de Third River Basin Management Conference, York 1983 (in druk).

15. Buishand, T. A. en Velds, C. A. (1980). *Neerslag en verdamping*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut De Bilt, april 1980.

16. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. *Klimatologische gegevens van Nederlandse stations no. 10: normalen en standaardafwijkingen voor het tijdvak 1951-1980*.

17. Ronde, J. G. de (1984). *The forecasting and warning system of Rijkswaterstaat for the river Rhine*. Report 6, Bureau post academisch onderwijs Landbouwhogeschool - Wageningen.

18. Lodder, J. J. P. (1983). *Hoogwater - afvoerverspelling Borgharen, een bijdrage uit de deelstroomgebieden*. Delft, april 1983 (vervolg rapport september 1983).

19. Gerretsen, J. H. (1984). *Laagwatervoorspelling in samenhang met rivierbeheer*. Tekst van een lezing gehouden voor de RIWA-werkgroep Hydrologie: mei 1984.

20. Made, J. W. van der (1982). *Kwantitatieve analyse van rivierafvoeren*. Rijkswaterstaat-serie no. 39; Directie Waterhuishouding en Waterbeweging - 's-Gravenhage.

21. RIWA-werkgroep Hydrologie. *Weersvoorspellingen - huidige stand van zaken, vooruitzichten en praktische toepassingsmogelijkheden voor de waterleidingbedrijven: verslag van een bezoek aan het KNMI*. Januari 1985 (in voorbereiding).

22. Lorenz, E. N. (1984). *Irregularity: a fundamental property of the atmosphere*. Tellus, 36A (1984), 98-110.

23. Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin (1978). *Le Bassin du Rhin*. Monographie Hydrologique.

24. Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin (1983). *La sécheresse et les basses eaux de 1976*. Rapport no. 1 - 2 de la CHR.

25. Können, G. P./KNMI (1983). *Het weer in Nederland*. Thieme - Zutphen.



Ir. Reij: Uitstoot van fosfaten uit wasmiddelen omlaag

De totale uitstoot van fosfaten uit wasmiddelen is de afgelopen jaren verminderd van zo'n tien miljoen kilo per jaar tot circa zes miljoen kilo per jaar en er zijn goede verwachtingen dat die daling zich zal voortzetten. Dat zei directeur-generaal Milieuhygiëne ir. W. C. Reij van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu namens de afwezige minister Winsemius op 22 mei jl. in Loosdrecht bij de ingebruikneming van een defosfateringsinstallatie.

Deze installatie was nodig om het water dat uit het Amsterdam-Rijnkanaal in de Loosdrechtse Plassen komt, te zuiveren van fosfaten. Het water uit het Amsterdam-Rijnkanaal wordt gebruikt om het water in de plassen op peil te houden. De Loosdrechtse Plassen zijn van belang als waterwingebied voor Amsterdam.

Volgens de Utrechtse Milieugedeputeerde, ir. G. C. van Wijnbergen, behoort de biologische vervuiling van de plassen grotendeels tot het verleden. Bijna overal rondom de plassen is riolering aangelegd. Alleen lozingen door boten vervuilen het water nog, maar dat probleem is te regelen via de wet Verontreiniging Oppervlaktewater. Voor de drinkwatervoorziening van ongeveer 1 miljoen mensen spelen de Loosdrechtse Plassen een rol van betekenis. Sinds 1930 onttrekt de gemeente Amsterdam drinkwater uit de Bethunepolder. In het toen afgesloten 'plassencontract' is bepaald dat de gemeente als tegenprestatie het waterpeil in het plassengebied moest handhaven tussen 1,20 beneden NAP (zomerpeil) en 0,90 beneden NAP (winterpeil). In de winter leverde dat nooit problemen op, want er was water genoeg voorhanden. In de zomer is de verdamping op de Loosdrechtse Plassen het grootst en het aanbod van water uit de Bethunepolder het kleinst. Al het kwelwater uit de Bethunepolder wordt dan voor de plassenwaterleiding gebruikt. In de maanden juni, juli en augustus moet er water van elders worden ingelaten om het peil te handhaven. Tot eind 1983 was dit water afkomstig van de Vecht.

Twee ontwikkelingen hebben tot een nieuwe aanpak geleid. In de eerste plaats het feit, dat de waterbehoefte van Gemeentewaterleidingen toenam en vooral in de zomer groter was dan de aanvoer uit de Bethunepolder. Daarom werd een plan gemaakt om water uit het Amsterdam-Rijnkanaal als grondstof voor de drinkwaterbereiding van Amsterdam te gaan gebruiken. In de tweede plaats moest het sterk vervuilde Vechtwater, dat zo'n negatieve invloed had op de waterkwaliteit in de Loosdrechtse Plassen, worden vervangen door het betere