

EKZAMENO DE LA FORMULO DE PENMAN ¹⁾ ²⁾

G. F. MAKKINK

Instituto por Biologia kaj Kemia Esploro de Agrikulturaj
Kreskaĵoj, Wageningen, Nederlando

SUMMARY

The revised formula of PENMAN (1956) was checked with observations of weighable lysimeters with a grass cover and a high watertable (at -50 cm). A correction for grass length was applied. The observations from March till October 1953, 1954 and 1955 were used.

The part of the new Penman-formula concerning income radiation does not quite agree with the latest results of DE VRIES (1955). The new version of the formula concerning back radiation was found to deviate at most 5 % from the old version. The revised part of the formula concerning E_a agreed better with the formula for a pan at Wageningen than the old formula. Considerably different results of the complete revised formula can be obtained owing to whether the income radiation is calculated with relative sunshine duration (n/N) or with measured radiation (R_m). This could be expected according to the poor correlation between sunshine duration and income radiation.

The relation between the observed potential evapotranspiration (E_p) and the calculated E_o based on n/N was found linear:

$E_p = 0.73 E_o$. If the measured income radiation is used instead of the calculated, the relation becomes curved and the agreement better. E_p/E_o was found to decrease with increasing daylength.

Still better agreement is obtained if E_p observed is compared with $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$. This relation is linear again:

$$E_p = 0.61 R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0.12. \quad (19)$$

A positive regression was found between the calculated E_o and $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$, being $E_o = 1.01 R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0.50$. (23)

Combination of (19) and (23), and substitution of observed data for $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ proved that E_p/E_o increases with decreasing daylength.

For E_o the results of the Penman-formula of 1956 (with R_m and the local E_a -formula) and those of two empirical formulae (namely (19) in combination with f from table of § 7, and (23)) were compared with measurements of a pan. The first gave results closest to the observed values, with the highest correlation coefficient.

1 ENKONDUKO

PENMAN (1948) disvolvis formulon taŭgan por la kalkulado de vaporigo el akvosupraĵo (E_o) kaj de la potenciala vaporigo el malalta vegetacio ("potential evapotranspiration", E_p). MAKKINK (1955) kontrolis tiujn formulojn per vaporigujo kaj peseblaj lizimetroj en 1953. Li trovis ke meznombre la kalkulita E_p estas 13 % malpli ol la observita. Kalkuloj instruis ke tiu diferenco parte aŭ tute povas esti atribuita al la longo de la greso sur la lizimetroj. La longo kaŭzis kroman surradiadon pro la interrompo inter la greso sur kaj ĉirkaŭ la lizimetroj. La longo eble ankaŭ kaŭzis kroman kirliĝan vaporinterŝanĝon kun la aero, konforme al la parametro de malglateco (MAKKINK 1957).

¹⁾ Ricevita por publikigo la 18-an de aŭgusto, 1957.

²⁾ Note of the editorial board: The aim of the Netherlands Journal of Agricultural Science is to bring the results of Dutch agricultural research to the attention of a readers' circle, as wide as possible, by publishing articles in an international language. Esperanto is international, so the editorial board did not object to place an article in this language.

Post 1948 PENMAN plibonigis sian formulon (PENMAN 1956). Tial la demando sin prezentas ĉu la observoj, reduktitaj je normigita greslongo, konformas al la nova formo de la Penman-formulo.

2 METODO

La metodo estas priskribita pli frue (MAKKINK 1955). Por la ekzameno estas uzitaj nur la observoj de kelkaj (5 ĝis 6) lizimetroj kun sablo (pri unu jaro ankaŭ de kelkaj kun torfgrundo) en kiuj la akvonivelo estis tenata je -50 cm. La pesado okazis kutime du fojojn semajne. La vaporigo estis kalkulata el la akvobalanca ekvacio kies ceteraj grandoj estis mezuritaj.

Paralele la vetergrandoj necesaj por la aplikado de la formulo de Penman, estis mezurataj sur la sama loko. La tutĉiela radiado estis mezurata per la solarimetro laŭ Moll en la Fizika kaj Meteorologia Laboratorio de la Agrikultura Universitato en Wageningen, situanta je 2500 m.

3 LA KOREKTADO PRO LA GRESLONGO

Por trovi la rilaton inter E_p kaj la greslongo mi elmetis E_p kiel ordinatoron kontraŭ la greslongo aparte por diversaj klasoj de vaporigintenso en periodoj de 3 aŭ 4 tagoj. Kiel indiko de la vaporigintenso mi uzis la observojn de du mezuriloj laŭ PICHE, kies diskoj estis 15 cm super malalte tondita gresejo. Figuro 1 bildigas la rilatojn por la vaporigklaso de 10,6–11,5 ml/24 h. 30 cm². Pro la granda ekarto estas malfacile desegni fidindan linion tra la punktaro. Tio ankaŭ estas ne ebla ĉe la aliaj klasoj de vaporigintenso. Tial E_p estis elmetata kontraŭ la vaporigo el la Pichemezuriloj aparte por diversaj klasoj de greslongo. Figuro 2 montras ekzemplon, nome por la klaso de 6,5–7,5 cm. Ankaŭ ĉi tie la ekarto estas granda. Tamen estas bone eble streki akcepteblan linion, ĉar tiu iras tra la origino. La liniojn mi strekis okuljuĝe. Pri la jaro 1955 estas akiritaj 7 linioj, unu por ĉiu klaso de greslongo.

La tangentoj de tiuj linioj estis desegne elmetataj kontraŭ la meza greslongo de la koncernaj klasoj. El tio rezultis 7 punktoj (fig. 3). Por akiri pli da punktoj mi desegnis liniojn similajn al tiu de figuro 2, pri la observoj en 1954.

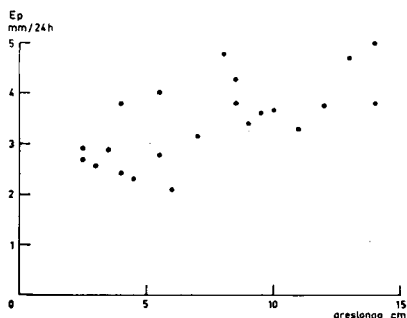


FIG. 1. POTENCIALA VAPORIGINTENSO (E_p) EL GRESKOVRITAJ LIZIMETROJ KUN AKVONIVELO JE -50 CM EN PERIODOJ DE 3–4 TAGOJ EN 1955 KOMPARE KUN LA LONGO DE LA GRESO, CE VAPORIGINTENSO DE 10,6–11,5 ML/24H. 30 CM² EL PICHE-MEZURILOJ.

Fig. 1. Potential evapotranspiration rate (E_p) of grass covered lysimeters in periods of 3–4 days in 1955, plotted against grass length, for an evaporation rate of 10.6–11.5 ml/24 h. 30 cm² of Piche-evaporimeters.

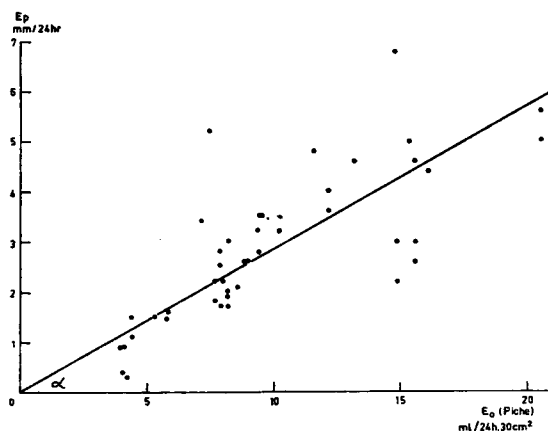


FIG. 2. POTENCIALA VAPORIGITENSO (E_p) EN 1955 EL GRESKOVIRITAJ LIZIMETROJ KUN AKVONIVELLO JE -50 CM KOMPARE KUN LA VAPORIGITENSO EL PICHE-MEZURILOJ, CE GRESLONGO DE 6.5–7.5 CM.

Fig. 2. Potential evapotranspiration rate (E_p) in 1955 of grass covered lysimeters with a watertable at -50 cm, plotted against evaporation rate of Piche-evaporimeters, for a grass length of 6.5–7.5 cm.

En ĉi tiu jaro la kreskperiodoj estis 5 semajnoj anstataŭ 4 kiel en 1955, kaj pro tio pli grandaj greslongoj estis observitaj. Ĉar en tiu jaro la mezurado de la vaporigado okazis per blankaj diskoj anstataŭ verdaj kiel en 1955, la observoj estas faritaj kompareblaj per empiria reduktfaktoro por la verdaj diskoj. La tangentoj de la du jaroj montras rektlinian rilaton kun la greslongo (fig. 3). Surbaze de tiu rilato la observita E_{px} ĉe greslongo x povas esti reduktata al E_{pn} por norma longo n . Kiel norma longo estas prenita longo de 2 cm. Tiu ĉi longo bone konformas al tiu de la provkampo de PENMAN. La faktoroj por redukti al tiu norma longo varias de 1,03 ĝis 0,48. La reduktitaj kaj la nerduktitaj valoroj de E_p en la tri studitaj jaroj estas en tabelo 1.

En 1953 la greslongo ne estis mezurata. Tial ĝi estis kalkulata el la rilato

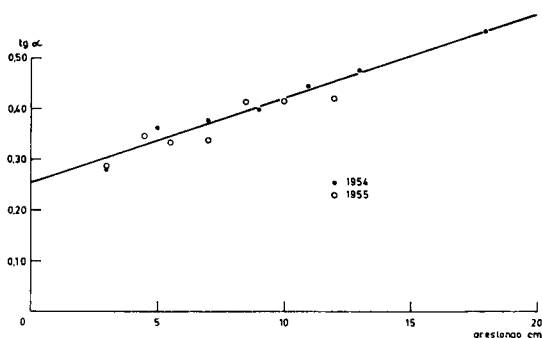


FIG. 3. TANGENTOJ EL 7 FIGUOROJ KIAJ FIG. 2 PRI 1955 KAJ EL 7 PRI 1954 KOMPARITE KUN LA GRESLONGO. LA RIGRESEKVAĈIO ESTAS. $\text{tg } \alpha = 0,25 + 0,017 l$.

Fig. 3. Tangenses of 7 diagrams like fig. 2 of 1955 and of 7 of 1954 plotted against the grass length. The regression equation is $\text{tg } \alpha = 0,25 + 0,017 l$.

Tabelo 1. La meznombra elvaporigo en mm po 24 horoj de greskovritaj lizimetroj kun akvoni-velo de -50 cm (E_p). Maldekstre la nekorektitaj valoroj, dekstre la valoroj post normigo je greslongo de 2 cm. La nombroj kun + ricevis kroman korekton (detaligo en 4.4).

Table 1. Average evapotranspiration in mm per 24 hours of grass covered lysimeters with the watertable at -50 cm (E_p). On the left uncorrected values, on the right values reduced to a grass length of 2 cm. The figures with + received an additional correction (explanation in 4.4).

	1953		1954		1955	
	ne korektita	korektita	ne korektita	korektita	ne korektita	korektita
marto	1,23	1,13	0,84	0,84	0,84	0,84
aprilo	2,33	1,83	2,36	1,86	1,94	1,57
majo	3,35	2,26	4,04	2,87	2,29	2,00+
junio	2,90	2,46	3,20	2,13	3,26	2,60+
julio	3,32	2,51	2,68	1,84	3,65	2,84
aŭgusto	2,84	2,39	2,42	1,74	3,22	2,38
septembro	2,13	1,76	1,36	1,00	1,76	1,33
oktobro	0,64	0,58	0,58	0,42	0,23	0,45+

inter la seka rikoltajo kaj la greslongo, trovita en alia jaro. La vaporigo en 1953 estis mezurata per Piche-mezuriloj kun disketoj el verda sorbpapero.

4 LA PLIBONIGOJ DE LA FORMULO DE PENMAN

La Reĝa Nederlanda Meteorologia Instituto (KNMI) faris en 1954 nomogramon de la formulo de PENMAN multe faciligantan la kalkuladon. La plibonigoj de la formulo faritaj de PENMAN mem, estis aplikataj en ĝi.

4.1 La formulo pri la alradiado

En mia antaŭa studaĵo mi anstataŭigis la parton el la Penman-formulo

$$R_c = R_A (0,18 + 0,55 n/N) \quad (1)$$

$$\text{per } R_c = Q (0,30 + 0,70 n/N) \quad (2)$$

kiu validas por Wageningen laŭ REESINCK kaj DE VRIES (1942). R_c reprezentas la alradiaĵon sur la tero, R_A la alradiaĵon je la supro de la atmosfero laŭ ANGOT. n/N la relativan daŭron de la sunbrilado kaj Q nombron da kalorioj po cm^2 en unu tago deduktitan por sennuba ĉielo en Wageningen per observoj de la solarimetro laŭ MOLL. Por ĉiu tago de la jaro oni trovas Q en tabelo.

Mi trovis ke la Q -valoroj de la supra formulo rilatis kun la Angot-valoroj laŭ

$$Q = 0,68 R_A. \quad (3)$$

Substituante (3) en (2) ni trovas

$$R_c = R_A (0,20 + 0,48 n/N). \quad (4)$$

Tiu ĉi rezulto estas ekzakte la formo de la plibonigita formulo. Evidente PENMAN uzis ĉi tiun saman publikigaĵon de REESINCK kaj DE VRIES.

Por la 24 studitaj monatoj la rezultoj el (1) malmulte devias de tiuj el (2): la korelacia koeficiento estas 0,997.

En pli nova artikolo DE VRIES (1955) iomete ŝanĝis la formulon, nome al

$$R_C = Q' (0,29 + 0,71 n/N), \quad (5)$$

ĉe kiu apartenas apartaj valoroj de Q' . Se oni komparas tiujn kun la Angot-valoroj la rezulto estas:

$$Q' = 0,74 R_A - 24,8. \quad (6)$$

Ĉi tiu rezulto estas pli akceptebla ol tiu de (3), ĉar ĝi rekonas la fakton ke radiaĵo sur la supro de la atmosfero ankoraŭ ekzistas, se sur la tero ĝi estas nulo. El la malnova formulo en tiu kazo rezultas 0 ankaŭ por la supro de la atmosfero.

Substituante (6) en (5) ni ekhavas

$$R_C = R_A (0,21 + 0,53 n/N) - 17,6 n/N - 7,2. \quad (7)$$

Tiu formulo montras la diferencon kun (1) kaj (4).

4.2 La formulo pri la deradiaĵo

La malnova formulo

$$R_D = \sigma T^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_d}) (0,10 + 0,90 n/N)$$

kaj la nova

$$R_D = \sigma T^4 (0,47 - 0,077 \sqrt{e_d}) (0,20 + 0,80 n/N) \quad (9)$$

ne multe diferencas. R_D staras por deradiaĵo, σ por la konstanto de STEFAN-BOLZMANN. T por la temperaturo en $^{\circ}K$, e_d por la maksimuma vaporpremo ĉe rosado en mm Hg. Figuro 4 montras la komparon pri la studitaj jaroj. Por mezaj valoroj la rezultoj estas proksimume egalaj, la altaj nombroj malpliĝis, la malaltaj pliĝis. La ekarto estas malgranda kaj la diferenco estas maksimume 5 %.

Ĉi tiu konkludo ne eldiras kiu el la du formuloj estas preferinda. Pri tio nur mezurado de la deradiaĵo povas decidi.

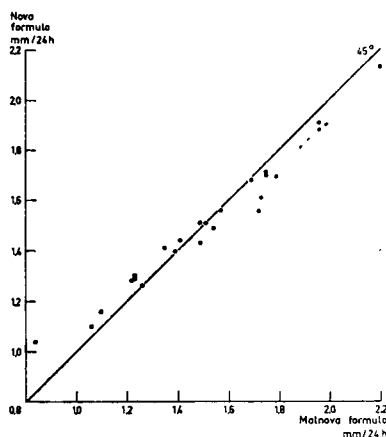


FIG. 4. LA DERADIAĴO (EN MM/24H) LAŬ LA NOVA FORMULO (9) KOMPARE KUN TIU LAŬ LA MALNOVA FORMULO (8) EN LA MONATOJ MARTO ĜIS OKTOBRO 1953—1955.

Fig. 4. Back radiation (in mm/24 h) according to the new formula (9) plotted against values according to the old formula (8) in the months March till October 1953—1955.

4.3 La E_a -formulo

$$\text{La formulon } E_a = 0,35 (e_a - e_d) (1 + 9,8 \times 10^{-3} u_2) \quad (10)$$

PENMAN ŝanĝis al

$$E_a = 0,35 (e_a - e_d) (0,5 + 9,8 \times 10^{-3} u_2). \quad (11)$$

($e_a - e_d$) prezentas la diferencon de la maksimuma vaporpremo en mm Hg ĉe la aertemperaturo kaj ĉe rosado je alteco de 2 m; u_2 prezentas la ventrapidon je 2 m en mejloj po tagnokto.

En la artikolo de 1948 PENMAN donis diagramon pri siaj propraj observoj ĉe la cilindro 0 (rigardu lian figuron 4 (1948) p. 131). Tra la punktaro de tiu diagramo oni povas streki kurbon al kiu konformas la formulo

$$E_a = 0,27 (e_a - e_d) (1 + 18 \times 10^{-3} u_2). \quad (12)$$

La nova formulo donita en 1956 (11) povas esti skribata ankaŭ

$$E_a = 0,175 (e_a - e_d) (1 + 20 \times 10^{-3} u_2). \quad (13)$$

El observoj pri la vaporigujo de la lizimetra stacio apud Wageningen (diametro 50 cm, profundeco 23 cm, entera kun la aperturo je ternivelo kaj kun malalta greso ĉirkaŭe) mi deduktis

$$E_a = 0,10 (e_a - e_d) (1 + 36 \times 10^{-3} u_2). \quad (14)$$

La konstantoj el la formuloj konsiderinde diferencas. Komparo inter (10), (11 aŭ 13) kaj (14) por la studitaj monatoj instruis ke

$$E_a (11, 13) = 0,81 E_a (10) \quad (15)$$

$$E_a (14) = 0,78 E_a (10) \quad (16)$$

$$E_a (11, 13) = 1,05 E_a (14) \quad (17)$$

Plue la ekarto ĉe la tri formuloj evidentiĝis tre malgranda. La korelacia koeficiento inter (11, 13) kaj (14) estas 0,99937. La observoj de Wageningen do pli konformas al la formulo de PENMAN de 1956 ol al la malnova de 1948.

4.4 Komparo de la nova formulo kun la observoj

La komparo de la lizimetraj observoj normigitaj je greslongo de 2 cm, kun la rezultoj kalkulitaj per la formulo de 1956 estas farita en figuro 5.

Tri el la valoroj (vidu tabelon 1) ricevis apartan korekton. Ili kuŝis evidente tro malalte en la figuro (majo, junio kaj oktobro 1955). Tio ankaŭ okazis ĉe la komparo kiu aplikas valorojn kalkulitajn per la mezurita alradiaĵo. Pro tio estas verŝajne ke la devion ne kaŭzis la kalkulita nombro, sed la observita. Detala trarigardo de la originalaj ciferoj montris ke en la koncernaj tri monatoj el la lizimetroj kiuj liveris la valoron de E_p , malpli elvaporigis ol el la lizimetroj kun malpli alta akvonivelo, kvankam ili devus doni egalan aŭ pli altan E_p -valoron. En tiuj monatoj falis multa pluvo, kaj oni povas konjekti (legu LOUSTALOT 1945, STALFELT 1956) ke tio kaŭzis ĉe la lizimetroj kun akvonivelo de -50 cm superoptimuman akvostaton en la greso. Sekve de tio estas verŝajne ke la stomoj fermiĝis pli ol sur la lizimetroj kun pli profunda akvonivelo. Surbaze de la vaporigo el ĉiuj lizimetroj la plej verŝajna valoro de E_p estis taksata.

En la figuroj 5 kaj 7 la punkto de majo 1954 tre devias. Oni inklinas serĉi la kaŭzon ĉe la lizimetraj, konkludante ke ili havas tro altan valoran. La

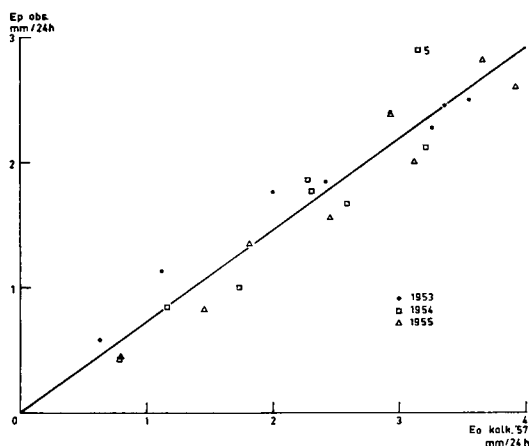


FIG. 5. E_p OBSERVITA PER LA LIZIMETROJ NORMIGITA JE GRESLONGO DE 2 CM. KOM-PARE KUN E_p KALKULITA LAU LA FORMULO DE 1956 (KUN ALRADIOJO BAZITA SUR n/N). LA VALOROJ KONCERNAS LA MONATOJN MARTO GIS OKTOBRO 1953—1955. MAJO 1954 ESTAS INDIKITA PER CIFERO 5.

Fig. 5. E_p observed by means of lysimeters and reduced to a grasslength of 2 cm, plotted against E_o calculated with the formula of 1956 (with income radiation based on n/N). The data concern the months of March till October 1953—1955. May 1954 is indicated by the figure 5.

klarigo povas esti en tio, ke majo 1954 estis malriĉa je pluvo, kaj la kampoj ĉirkaŭ la lizimetraro tre sekaj kun elvaporigo malpli ol la potenciala. Aplikado de la formulo de PENMAN postulas kondiĉon de vasta ebenaĵo kie la vaporigado ne malmulte devias de la potenciala vaporigado. Se la vaporigo estas malpli, neuzita varmo troas kaj pliiĝas kiel alfluanta varmo la vaporigon el bone akvitaj lizimetroj super la kvanto rezultanta el la formulo. Do fakte la situacio ne respondas al la postuloj por la aplikado de la formulo. Esceptante la plej altan, devian punkton (majo 1954), oni povas streki rektan linion

$$E_p = 0,73 E_o. \quad (18)$$

La situo de la punktoj ne indikas ke la linio estas kurba. Tio signifas ke la faktoro de PENMAN (E_p / E_o) ne ŝanĝiĝas dum la jaro.

5 MEZURITA ANSTATAŬ KALKULITA ALRADIOJO

5.1 Alradiojo kaj relativa daŭro de la sunbrilado

Se oni komparas la rezultojn de la Wageningen-a formulo por la alradiojo (5) kun la rekte mezurita alradiojo, pli-malpli grandaj diferencoj evidentiĝas (fig. 6). En la tri studitaj jaroj tiom da someraj valoroj devias ke ili donas la impreson ke ekzistas sistema subtaksado de la alradiojo laŭ la formulo (5). Verŝajne tio estas nur ŝajno, sekve de tro malgranda nombro da jaroj studitaj. Fakto estas ke la ekarto de la monataj valoroj de Q estas granda laŭ DE VRIES. (1955): σ varias de 16 % en decembro ĝis 11 % en junio. La konkludo do devas esti ke la relativa daŭro de la sunbrilado estas malbona reprezentanto por la alradiojo. Tial ankaŭ la kalkulo de E_o nepre donas malsamajn rezultojn

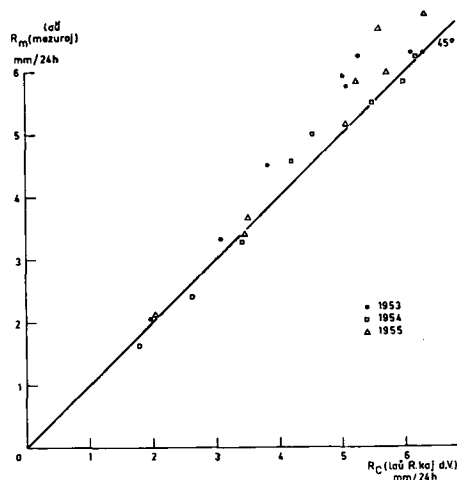


FIG. 6. ALRADIAJO EN MM/24H EN LA MONATOJ MARTO GIS OKTOBRO 1953—1955. VALOROJ BAZITAJ SUR SENPERAJ MEZUROJ (R_m) KOMPARE KUN VALOROJ KALKULITAJ LAU LA FORMULO DE REESINCK KAJ DE VRIES 1942. (R_c).

Fig. 6. Income radiation in mm/24 h in the months of March till October 1953—1955. Values based on direct measurements (R_m) are plotted against values calculated according to the formula of REESINCK and DE VRIES 1942 (R_c).

Tabelo 2. E_o kalkulita laŭ la Penman-formulo de 1956; maldekstre per la relativa daŭro de la sunbrilado (n/N), dekstre per mezurita alradiaĵo (R_m). La diferenco superas 10 % kie + estas metita, 15 % kie staras ++.

Table 2. E_o calculated according to the Penman formula of 1956; on the left based on the relative sunshine duration (n/N), on the right based on the measured income radiation (R_m). + indicates that the difference is greater than 10 %, ++ that the difference is greater than 15 %.

	1953 E_o kalkulita		1954 E_o kalkulita		1955 E_o kalkulita	
	per n/N	per R_m	per n/N	per R_m	per n/N	per R_m
marto	1,12	1,10	1,16+	1,03	1,46++	1,03
aprilo	2,42++	2,83	2,28	2,26	2,45	2,53
majo	3,26	3,55	3,15	3,42	3,12+	3,51
junio	3,36	3,63	3,21	3,20	3,92+	4,46
julio	3,55+	4,06	2,59+	2,84	3,66++	4,25
aŭgusto	2,93	3,48	2,31+	2,55	2,93+	3,35
septembro	2,00+	2,26	1,73+	1,53	1,81	1,83
oktobro	0,63	0,64	0,79++	0,58	0,80	0,77

depende de tio, ĉu ĝi estas bazita sur la relativa daŭro de la sunbrilado aŭ sur la mezurita alradiaĵo. Tion montras tabelo 2. La malsevereco de la rilato inter la efektiva alradiaĵo kaj la relativa daŭro de la sunbrilado estas la plej grava kaŭzo de la malprecizeco de la Penman-formulo de E_o . Probable ĉi tiu malprecizeco igas ĉiujn plibonigojn atingitajn de la nova formulo senefikaj.

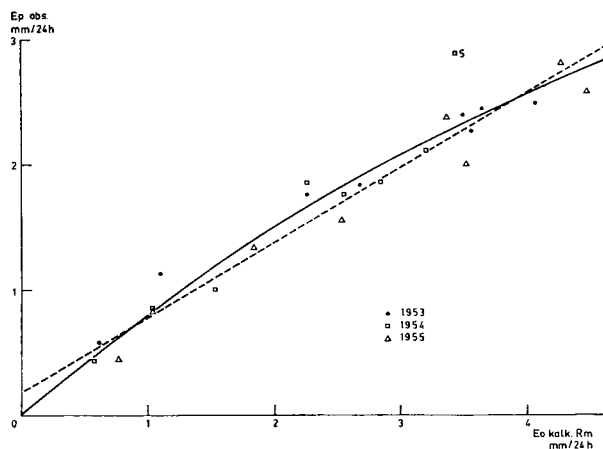


FIG. 7. E_p OBSERVITA PER LA LIZIMETROJ, NORMIGITA JE GRESLONGO DE 2 CM. KOM-PARE KUN E_o , KALKULITA LAU LA PENMAN-FORMULO DE 1956 KUN MEZURITA ALRADIAJO, MARTO GIS OKTOBRO 1953—1955. MAJO 1954 ESTAS INDIKITA PER CIFERO 5.

Fig. 7. E_p observed by means of lysimeters, reduced to a grass length of 2 cm, plotted against E_o calculated according to the Penman-formula of 1956 with measured income radiation. March till October 1953—1955. May 1954 is indicated by the figure 5.

5.2 Komparado de E_p observita kun E_o kalkulita per la mezurita alradiajo.

Komparado de kalkulitaj valoroj (de E_o) kun observitaj (de E_p) havas sencon nur se la valoroj estas kalkulitaj surbaze de la mezurita alradiajo. Figuro 7 bildigas la komparon. Tra la punktaro oni povas streki kurban linion. La kurbeco estas tiel ke E_p/E_o en la somero estas malpli ol 0,5, en la aŭtuno proksimume 0,8. La sezoninfluo do estas male al tiu ĉe Penman, kie E_p/E_o estas 0,6 en la vintraj kaj 0,8 en la someraj monatoj. Due, preciza komparo inter fig. 5 kaj 7 montras ke la ekarto ĉe la lasta estas malpli ol ĉe la unua. Tion oni rajtas postuli se oni uzas la mezuritan alradiaĵon anstataŭ la kalkulitan. Tio ĉi fortigas la konkludon ke la faktoro f inverse rilatas kun la taglongo.

6 EMPIRIA SIMPLIGO DE LA FORMULO DE PENMAN

La formulo de Penman ne donas senperan valoron por vegetacio; oni bezonas la helpfaktoron f . Kiel ni konstatis ĝia valoro estas alia ol PENMAN asertis. Pro tio estas sencplene serĉi metodon por senpera determinado de E_p .

Ĉar la alradiaĵo estas la plej grava faktoro determinanta la vaporigon, senpera komparo de E_p kun la mezurita alradiaĵo R_m proponis sin mem. Ĝi montras kurban rilaton inter la observita E_p kaj R_m (fig. 8), malforte konkavan al la ordinato. La numeroj ĉe la punktoj, indikantaj la monatojn, montras ke printempaj monatoj plejmulte havas pli altajn valorojn de E_p ol aŭtunaj. Tio indikas ke ekzistas temperaturinfluo. Se oni multiplikas R_m kun la temperaturfaktoro $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$, la rigreso iĝas rekta (fig. 9). La formulo de la linio

$$\text{estas} \quad E_p = 0,61 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,12 \quad (19)$$

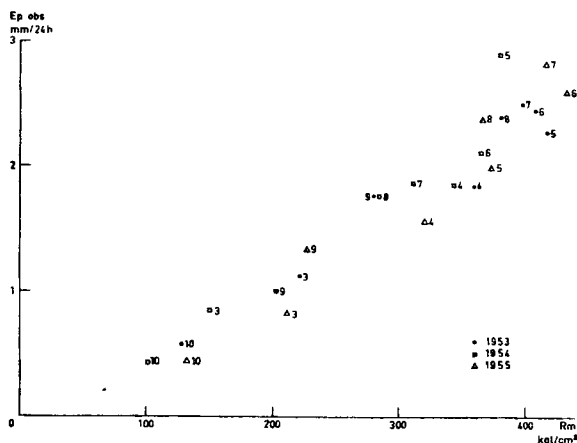


FIG. 8. E_p (DE LIZIMETROJ, NORMIGITAJ JE GRESLONGO DE 2 CM) KOMPARE KUN LA MEZURITA ALRADIOJO (R_m). LA CIFEROJ INDIKAS LA MONATOJN.

Fig. 8. E_p (of lysimeters, reduced to a grass length of 2 cm) plotted against the measured income radiation (R_m). The figures indicate the months.

en kiu R_m estas esprimita en mm/24 h.

Se oni volas streki la linion tra la origino, oni povas simple apliki

$$E_p = 0,58 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}. \quad (20)$$

Ĉe tiu ĉi formulo la vintraj monatoj estas kalkulataj iom tro altaj.

Tiras la atenton ke la ekarto ĉe tiu ĉi komparo estas malpli granda ol ĉe la komparo pri la plena Penman-formulo (fig. 7).

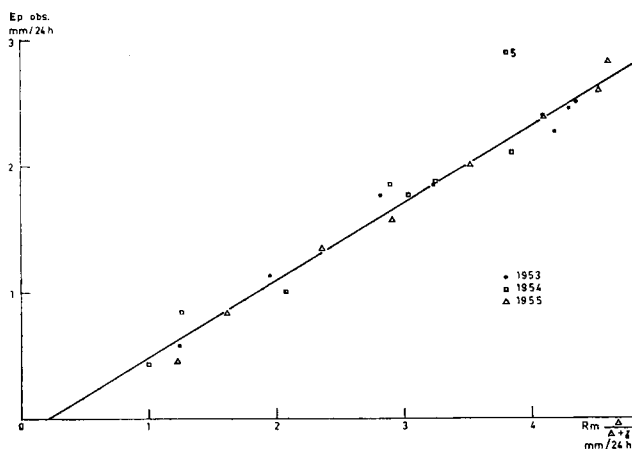


FIG. 9. E_p (DE LIZIMETROJ, NORMIGITAJ JE GRESLONGO DE 2 CM) KOMPARE KUN $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$. MAJO 1954 ESTAS INDIKITA PER CIFERO 5.

Fig. 9. E_p (of lysimeters, reduced to a grass length of 2 cm) plotted against $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$. May 1954 is indicated by the figure 5.

Tiu ĉi rezulto fortigas la konvinkon ke la lizimetraj observoj estas ĝustaj. Plue tio montras ke la simpligita formulo estas pli preciza ol la kompleta formulo kun la mezurita alradiaĵo. En Nederlando oni do rajtas uzi la pli simple manipuleblan formulon (19), kiu ankaŭ postulas malpli da mezuroj. Konsentita estas la malavantaĝo ke la mezuroj de la alradiaĵo ekzistas nur pri la lastaj jaroj kaj estas farataj nur en malmultaj meteorologiaj stacioj. Tamen eĉ por lokoj kie mankas solarimetro laŭ MOLL, oni povas konsideri ĉu oni uzos la simpligitan formulon. Tiukaze oni devas apliki faktoron por tiu loko X , bazitan sur la supozo ke eventuala devio de la tiea alradiaĵo ĉefe estas kaŭzata de malsama nombro de sunbrilaj horoj. Kiel reduktfaktoron oni verŝajne povas uzi n_X/n_S en kiu n indikas la nombron da horoj de sunbrilado, X la koncernan lokon kaj S la lokon de la solarimetro.

En ĉi tiu studo mi ne uzis la rezultojn el 1952 kaj 1956. La tialoj estas ke en 1952 nek la greslongo, nek la meteorologiaj grandoj de la Penman-formulo estis mezurataj. 1956 estis tre pluvriĉa jaro en kiu dum pluraj monatoj la lizimetraj kun sablo kaj kun akvonivelo de -50 cm ne atingis la vaporiĝintenson de aliaj lizimetraj, do ne E_p -on. Ankaŭ la greso kreskis ne tiel kiel ĝi fakte devus, verŝajne pro nesufiĉa aerado en la tero. Pro tio eble la vaporiĝo el la greso estis malpli ol potenciala.

Post fino de ĉi tiu studaĵo mi kalkulis pri 1952 la korekton pro la greslongo, post kiam mi taksis la longon el la rilato inter greslongo kaj seka rikoltaĵo, interpolante inter la rikoltdatoj. Mi kalkulis E_p per ciferoj trovitaj el la rilatoj inter la vetergrandoj ĉe la lizimetra stacio kaj tiuj de aliaj stacioj.

Pri 1956 mi elektis kiel proksimuman E_p la observojn de lizimetraj kun torfgrundo kun akvonivelo de -70 cm kaj -125 cm. Ni nun povas kompari la observojn el 1952 kaj 1956 kun la rezultoj de la nova Penman-formulo (kun mezurita alradiaĵo) kaj kun tiuj el la kalkulo per la empiria formulo (19). La rezultoj estas en tabelo 3 kaj en figuroj 10 kaj 11. Figuro 10 montras ke en kelkaj monatoj de 1956 la punktoj de E_p tro devias de la kurbo valida por la jaroj 1953—1955. Al la rekta linio ili pli bone adaptiĝas. Se oni anstataŭigas valorojn per pli altaj pri sablo (marto kaj aŭgusto) la situo malmulte pliboniĝas. Kvankam en figuro 11 la punktoj situas pli proksime al la linio, ili entute

Tabelo 3. E_p observita per lizimetraj kaj normigita je greslongo de 2 cm, E_o kalkulita per la Penman-formulo de 1956 kun mezurita alradiaĵo, kaj E_p kalkulita per formulo 19. Ĉiuj valoroj en mm/24 horoj.

Table 3. E_p observed by means of lysimeters and reduced to a grass length of 2 cm, E_o calculated by means of the Penman formula of 1956 with measured income radiation, and E_p calculated according to formula 19. All values are in mm/24 hours.

	E_p obs.	E_o kalk., R_m	E_p kalk. 19	E_p obs.	E_o kalk. R_m	E_p kalk. 19
marto	—	1,0	0,81	0,63 (0,75)	1,39	0,82
aprilo	1,72	2,9	2,05	1,15	1,94	1,24
majo	2,48	3,9	2,53	2,23	3,17	2,15
junio	2,44	4,5	2,72	1,75	3,00	1,95
julio	2,81	4,2	2,61	1,81	2,96	1,89
augusto	2,05	3,0	2,12	1,42 (1,52)	1,87	1,77
septembro	1,56	1,8	1,39	0,92	1,86	1,28
oktobro	0,46	0,8	0,63	0,44	0,93	0,65

estas tro deviaj. La kaŭzon oni serĉu ĉe la lizimetroj, kies observoj verŝajne estas tro malaltaj pro la tro aermalriĉa tero. Ni vidos en § 7 ke la kalkulitaj valoroj estas eksterdube ĝustaj.

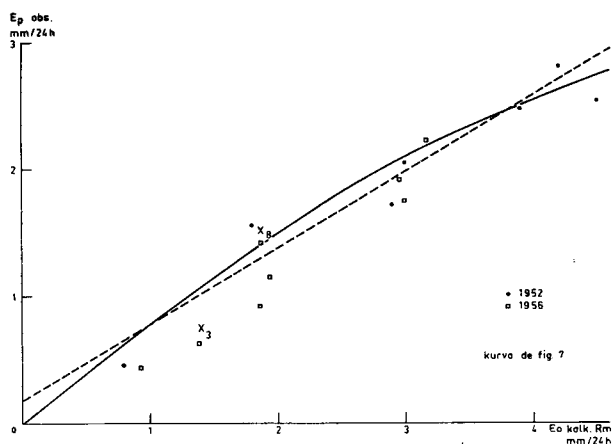


FIG. 10. E_p (LIZIMETROJ, GRESLONGO 2 CM) KOMPARE KUN E_o KALKULITA LAU LA PENMAN-FORMULO DE 1956 KUN LA MEZURITA ALRADIAJO. MARTO GIS OKTOBRO DE 1952 KAJ APRILO GIS OKTOBRO DE 1956. LA KURBO ESTAS TRANSPORTITA DE FIGURO 7. LA KVADRATETOJ DE 1956 KONCERNAS LIZIMETROJN KUN TORFGRUNDO. LA KRUCOJ LIZIMETROJN KUN SABLO EN MARTO KAJ AUGUSTO 1956.

Fig. 10. E_p (lysimeters, grass length 2 cm) plotted against E_o calculated according to the Penman-formula of 1956 with measured radiation. March to October 1952 and April till October 1956. The curve was taken from fig. 7. The squares of 1956 concern lysimeters with peat soil; the crosses lysimeters with sandy soil in March and August 1956.

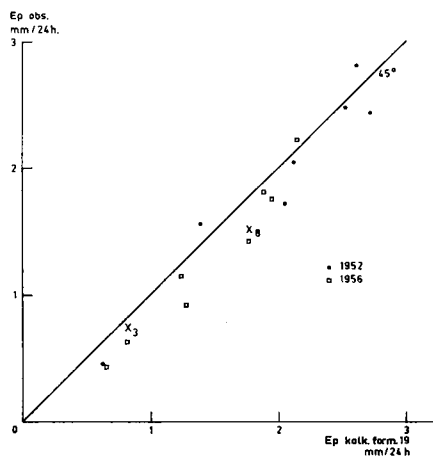


FIG. 11. E_p OBSERVITA (LIZIMETROJ, GRESLONGO 2 CM) KOMPARE KUN E_p KALKULITA PER FORMULO 19. SAMAJ PERIODOJ KIEL DE FIG. 10. PLUA KLARIGO SUB FIG. 10.

Fig. 11. E_p observed (lysimeters, grass length 2 cm) plotted against E_p calculated according to formula 19. Same periods as with fig. 10. Further details under fig. 10.

7 LA RILATO E_p / E_o

Ĉu la faktoro f kreskas kun la taglongo, kiel PENMAN asertas aŭ malkreskas kiel mi trovis?

Se oni desegne elmetas E_o (kalkulitan laŭ la nova Penman-formulo kun mezurita alradiaĵo) kontraŭ $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ oni povas streki rektan linion tra la punktaro (fig. 12).

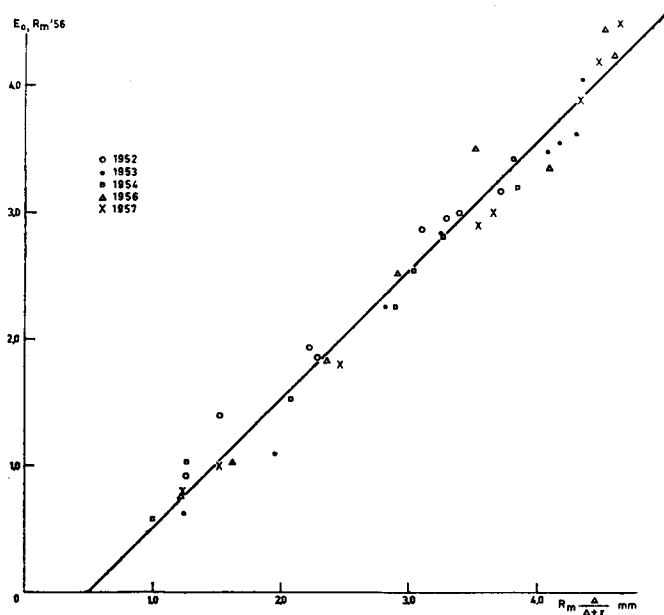


FIG. 12. E_o KALKULITA LAŬ LA FORMULO DE 1956 KUN MEZURITA ALRADIAĴO KOMPARE KUN $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$. MARTO ĜIS OKTOBRO DE 1952 ĜIS 1956.

Fig. 12. E_o calculated according to the formula of 1956 with measured income radiation plotted against $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$. March till October 1952—1956.

En ĉi tiu figuro ankaŭ ciferoj pri 1952 kaj 1956 estas metitaj. Ili evidente bone konformas al tiuj de 1953 ĝis 1955. Tio indikas ke la E_o -valoroj de la jaro 1956 ne devias kaj ne estas influitaj de la pluva somero. Tio konfirmas la konjekton faritan en la fino de § 6 ke la lizimetroj donis tro malaltajn valorojn en 1956.

La pozitiva rigreso inter E_o kaj $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ (fig. 12) devenas de la fakto ke la rigresoj inter la deradiaĵo R_D kaj la alradiaĵo R_m , kaj inter γE_a kaj ΔR_m estas ambaŭ pozitivaj, dum la tangento de la dua rigreso superas tiun de la unua, kiel farita ekzameni instruis. Tio klariĝas se oni transformas la originalan Penman-formulon

$$E_o = (\Delta H + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \quad (21)$$

al

$$E_o = (1 - r) R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - R_D \Delta / (\Delta + \gamma) + \gamma E_a / (\Delta + \gamma). \quad 1) \quad (22)$$

1) r staras por reflektfaktoro.

Por la linio en fig. 12 validas

$$E_o = 1,01 R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0,50. \quad (23)$$

Laŭ PENMAN.

$$f = E_p / E_o. \quad (24)$$

Substituante (19) kaj (23) en (24) ni trovas

$$\begin{aligned} f &= \frac{0,61 R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0,12}{1,01 R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0,50} \\ &= 0,60 \frac{R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0,20}{R_m \Delta / (\Delta + \gamma) - 0,50}. \end{aligned} \quad (25)$$

Oni vidas ke en ekvacio (25) la numeratoro estas pli granda ol la denominatoro. Ĝi superas relative des pli multe, ju pli $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ malgrandiĝas. Se $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ atingas 0,50 mm/24 h f iĝas eĉ ∞ . Tiu ĉi malgrandiĝo de $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ okazas dum la transiro de somero al vintro. Tiam f kreskas, male al la opinio de PENMAN. Por la jaroj 1952 ĝis 1956 mi trovis per (25) la sekvantajn mezajn valorojn de $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ kaj f :

	$R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$	f
marto	1,57	0,77
aprilo	2,96	0,68
majo	3,92	0,65
junio	4,15	0,65
julio	4,00	0,65
aŭgusto	3,60	0,65
septembro	2,40	0,70
oktobro	1,19	0,87

PENMAN aplikis en sia formulo reflektfaktoron de 0,05 por ĉiuj monatoj. Se oni kalkulas tiun por ĉiu aparta monato (surbaze de la kvanto de alradiaĵo kaj de la reflektkoeficiento de akvo depende de la sunalto, integrante laŭ la tempo dum la tago) ni trovas por la rekta radiado faktorojn, variantajn de 0,06 en majo-aŭgusto ĝis 0,32 en decembro-januario. Por oktobro de la studitaj 5 jaroj mi trovis ke la valoroj de E_o kalkulitaj kun reflektfaktoro de 0,14, tiom mal multe malpli iĝis ke oni rajtas neglekti la variadon de la reflektfaktoro. Tamen eble ne en la mezo de la vintro.

La rigresoj inter E_p kaj $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ (fig. 9), kaj inter E_o kaj $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ (fig. 11) estas praktike rektaj. La konsekvenco estas ke ankaŭ la rigreso inter E_p kaj E_o estas rekta (fig. 13).

El (19) kaj (23) sekvas ke por $E_o = 0$, E_p estas 0,18 mm/24 h. La kurbo de fig. 7 kaj 10 do povas esti rigardata rekta, krucante la ordinatoron ĉe $E_p = 0,18$. La fakto ke la linio ne pasas tra la origino, kaŭzas ke f ne estas konstanta, sed kreskas se la tagoj malplilongiĝas. Ĉe negativa E_p kaj pozitiva E_p f estas negativa.

8 EMPIRIAJ FORMULOJ PRI E_o

Krom la fundamenta originala Penman-formulo pri E_o (21) ni nun havas du empiriajn formulojn, nome (23) kaj kombinaĵo de (19) kaj f el la tabelo de § 7.

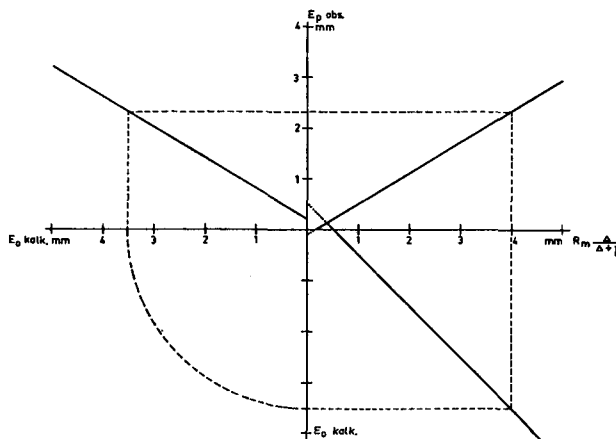


FIG. 13. RIGRESLINIO INTER E_p KAJ $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ KOMBINITA KUN RIGRESLINIO INTER E_o KAJ $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ LIVERAS RIGRESLINION INTER E_p KAJ E_o

Fig 13. Regression line between E_p and $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ combined with regression line between E_o and $R_m \Delta / (\Delta + \gamma)$ to obtain regression line between E_p and E_o

Por kontroli la precizecon de tiuj formuloj mi komparis iliajn rezultojn kun la mezuroj de la vaporigujo(j) de la lizimetra stacio. Por tiu komparo taŭgis nur la observoj koncerne senpluvajn tagojn, ĉar en pluvhavaj tagoj la observoj estis nefidindaj. La ciferoj estas en tabelo 4. Anticipe oni povas diri ke E_o de akvokuvo ne nepre devas konformi kun E_o kalkulita laŭ la Penman-formulo, pro la intersanĝo de varmo inter ujo kaj tero.

La korelaciaj koeficientoj (r) inter la observoj de la akvujo kaj la rezultoj de la formuloj estas:

r inter ujo kaj la nova Penman-formulo kun mezurita alradiaĵo kaj E_a -formulo de Wageningen	0,930
r inter ujo kaj (23) § 7	0,825
r inter ujo kaj (19) $\times f$ el tabelo de § 7	0,831

Ĉiuj kalkuloj tamen supertaksas la vaporigon el la kuvo kiel montras la meznombraj valoroj donitaj en tabelo 4. La supertakso estas plej malgranda ĉe la Penman-formulo.

El la farita komparo oni povas konkludi ke por kalkuli E_o , eĉ E_o de akvokuvo, la formulo de PENMAN (kun la mezurita alradiaĵo kaj la loka E_a -formulo) liveras pli proksiman kaj pli precizan rezulton ol la du empiriaj formuloj.

DANKESPRIMO

Mi ŝuldas dankon al profesoro d-ro W. R. VAN WIJK, direktoro de la Laboratorio por Fiziko kaj Meteorologio de la Agrikultura Universitato, Wageningen, pro la disponigo de ciferoj pri radiado kaj sunbrilado. D-ron C. T. DE WIT de la Instituto por Biologia kaj Kemia Esploro de Agrikulturaj Kreskaĵoj, Wageningen, mi dankas pro liaj valoraj rimarkoj.

LITERATURO

LOUSTALOT. A. J.: Influence of soil moisture condition on apparent photosynthesis and transpiration of pecan leaves, *J. Agr. Res.* 71: 519–532 (1945).

Tabelo 4. E_o observita per 1 aŭ 2 akvokuvojn dum senpluvaj tagoj kaj kalkulita laŭ la Penman-formulo de 1956 (kun mezurita alradiaĵo kaj la E_a -formulo trovita ĉe la lizimetra stacio). Plue E_o kalkulita laŭ formulo (23) kaj laŭ formulo (19) $\times 1/f$. La kalkuloj koncernas ankaŭ nur senpluvajn tagojn.

Table 4. E_o observed by means of 1 or 2 evaporation pans on rainless days and calculated according to the Penman formula of 1956 (with measured income radiation and the E_a -formula found at the lysimeter station). Further E_o calculated with formula (23) and with formula (19) times $1/f$. The calculated data also concern rainless days only.

Periodo	E_o kuvo	numero da tagoj	E_o kalk. form. '56 R_m, E_a Wag.	E_o kalk. form. 23	E_o kalk. form. $19 \times 1/f$
1953					
aprilo	2,4	12	2,92	3,00	2,92
majo	2,7	15	3,70	4,05	4,05
junio	2,9	13	4,34	4,40	4,35
julio	3,5	7	4,46	4,64	4,51
aŭgusto	3,2	14	4,23	4,74	4,60
septembro	2,0	17	2,44	2,64	2,55
oktobro	0,6	15	0,62	0,83	0,78
1954					
aprilo	2,7	20	3,10	2,79	2,74
majo	4,6	15	4,69	5,21	5,11
junio	2,9	10	3,81	5,96	5,80
julio	2,8	5	3,66	5,93	5,81
aŭgusto	2,4	9	3,40	4,05	3,99
septembro	2,2	6	2,16	2,93	2,77
oktobro	0,8	3	1,56	1,16	1,01
1955					
aprilo	2,3	15	2,75	3,09	3,00
majo	3,9	6	4,33	4,90	4,85
junio	5,2	19	5,15	5,48	5,35
julio	4,5	19	4,18	4,45	4,40
aŭgusto	3,1	19	3,64	4,25	4,15
septembro	2,2	13	2,19	2,66	2,51
oktobro	0,6	13	0,86	1,40	1,17
meznombre	2,75		3,25	3,75	3,65

MAKKINK G. F. : Toetsing van de berekening van de evapotranspiratie volgens Penman, *Landb. Tijdschr.* 67: 267—282 (1955).

— : Testing the Penman formula by means of lysimeters, *J. Inst. of Water Eng.* 11: 277—288 (1957).

PENMAN H. L. : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Royal Soc. A* 193: 120—145 (1948).

— : Evaporation: an introductory survey, *Netherl. J. Agr. Sc.* 4: 9—29 (1956).

REESINCK, J. J. M. kaj D. A. DE VRIES : De jaarlijkse en dagelijkse gang van het daglicht in Nederland, *Meded. Landb. Hogesch. Wageningen* 46 (1): 1—24 (1942).

STAFFELT, M. G.: Die stomataire Transpiration und die Physiologie der Spaltöffnungen, *Handbuch der Pflanzenphys.* III. Berlin, Göttingen, Heidelberg: 351—426 (1956).

VRIES, D. A. DE : Solar radiation at Wageningen, *Meded. Landb. Hogesch.* 55 (6): 277—304 (1955).