ALBRECHT KESSLER

Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im
Titicaca-Becken

Geographisches Institut der Universität Bonn, BRD

Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca-Becken

ALBRECHT KESSLER

Mit 6 Abbildungen

Eingegangen am 12. Juni 1970

Zusammenfassung

Es wird der Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca-Becken (Süd-Anden von Peru) untersucht. Dabei werden Ergebnisse von Messungen mit dem Piche-Evaporimeter und mit der Verdunstungswaage mit Berechnungen nach der Massenaustausch- und der Penman-Formel verglichen. Es werden Vorschläge gemacht, wie die Verdunstungskurve des Titicacasees, die aus der Wasserhaushaltsgleichung ermittelt wurde, verbessert werden könnte.

Summary

On the Annual Variation of the Potential Evaporation in the Basin of Lake Titicaca

The author investigates the annual variation of the potential evaporation in the basin of Lake Titicaca (southern part of the Peruvian Andes). The results of measurements with the Piche evaporimeter and with the evaporation balance are compared with calculations using the mass exchange formula and the Penman formula. The author suggests how one could improve the evaporation curve of Lake Titicaca which has been derived from the water balance equation.

Resumen

Las variaciones anuales de la evaporación potencial en la cuenca del Lago Titicaca

Se estudian las variaciones anuales de la evaporación potencial en la cuenca del Lago Titicaca (parte Sur de los Andes peruanos). Con esta finalidad se compararon los resultados obtenidos por mediciones con evaporímetros, con cálculos según las fórmulas de evaporación. Se hacen sugerencias para mejorar la curva de evaporación del Lago Titicaca, calculada a base de la ecuación para el régimen de las aguas.

1. Einleitung

In einer früheren Arbeit [5] wurde der Wasserhaushalt des Titicacasees für die Jahre 1957—1961 nach der Wasserhaushaltsgleichung untersucht. Dabei wurde die Formel $V = N + Z - A - \Delta S$ (mit V Verdunstung, N Niederschlag, Z Zufluß, A Abfluß, ΔS Speicheränderung) benutzt und die Verdunstung als Restglied aus den anderen gemessenen Größen bestimmt. Während die mittlere Jahreskurve von Niederschlag, Zufluß, Abfluß und Speicheränderung schon für den kurzen Zeitraum von 5 Jahren einen plausiblen klimatologischen Verlauf zeigte, stellte sich die Frage, ob auch die Kurve der potentiellen Verdunstung von der Seeoberfläche (vgl. Abb. 5, Mittel der Jahre 1958—1961) bereits in den Grundzügen richtig erfaßt wird und wie sie meteorologisch im einzelnen zu begründen ist.

Bei dieser Kurve fällt auf, daß sie keinen einfachen Jahresgang hat, daß zu Beginn und am Ende der sommerlichen Regenzeit (vgl. Abb. 6) verhältnismäßig große Verdunstungswerte auftreten und daß das Maximum schon Ende des Sommers im April erreicht wird und nicht erst in der winterlichen Trockenzeit in den Monaten Juni bis August, in denen die relative Feuchtigkeit die geringsten Werte annimmt. Es war zu vermuten, daß sich hier der Einfluß der Strahlungsbilanz auf den Verdunstungsgang bemerkbar macht.

Nun können aber gerade im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten Fehler bei der Verdunstungsbestimmung mit der Wasserhaushaltsgleichung auftreten. Zunächst kommt die Unsicherheit bei der Bestimmung des Gebietsniederschlages zur Geltung. Diese möglichen Fehler sind in der Trockenzeit auf ein Minimum reduziert. Da auch dann der Zufluß relativ gering ist und der Abfluß ohnehin eine untergeordnete Rolle spielt, hängt die Genauigkeit der Verdunstungsbestimmung nur von der Güte der Pegelbeobachtung für die Speicheränderung ab. Zur Berechnung der Speicheränderung stand nur der Pegel von Puno zur Verfügung. Da die Hauptzuflüsse in den nördlichen Teil des Sees münden und zugleich das Niederschlagsmaximum dort zu finden ist, wird aber in der Regen- und Übergangszeit auch die Berechnung der Speicheränderung mit einem einzigen Pegel problematisch, da der Seespiegel dann von Norden nach Süden geneigt ist. Hinzu kommt die Wirkung des jahreszeitlich wechselnden Windstaus auf den Pegel, die ohne umfangreiche Windmessungen nicht abgeschätzt werden kann. W. DAMMANN [1] hat auf ähnliche Probleme beim Tschadsee hingewiesen. Bei der Berechnung der Jahressumme der Verdunstung mit der Wasserhaushaltsgleichung werden zwar diese Fehler im wesentlichen kompensiert. Der Jahres-

gang läßt sich aber ohne Pegel- und Windbeobachtungen an mehreren gleichmäßig verteilten Stellen nicht korrigieren. Es blieb die Frage, ob sich diese Fehler überhaupt bemerkbar machen.

So lag es nahe, vor allem den Jahresgang der potentiellen Verdunstung noch mit anderen Methoden zu untersuchen.

Abb. 1. Das Titicaca-Becken

Für den Zeitraum 1958—1961 stehen aus dem Titicaca-Becken von mehreren Stellen Verdunstungsmessungen mit dem Piche-Evaporimeter und von Puno mit der Verdunstungswaage zur Verfügung.

Außerdem wurden die gleichzeitigen Klimabeobachtungen von Puno verwendet, um die Seeverdunstung mit Massenaustauschformeln zu berechnen. Um den möglichen Einfluß der Strahlungsbilanz auf den Jahresgang der Verdunstung klarer zu fassen, wurden Berechnungen mit der Penman-Formel angestellt. Leider waren für den gleichen Zeitraum nicht alle Daten der einzelnen Monate verfügbar. Es mußte zum Teil auf Daten anderer Perioden bzw. direkt auf die Mittelwerte

der Jahre 1958—1961 zurückgegriffen werden. Eine genaue Erfassung der Strahlungswerte und deren richtige Abschätzung gegenüber der Wirkung der Austauschvorgänge auf die Verdunstung scheint das Hauptproblem zu sein, da im Titicaca-Becken — anders als beispielsweise in Mitteleuropa — die Jahresgänge von Sättigungsdefizit und Strahlungsbilanz nicht parallel verlaufen.

2. Verdunstungsmessungen mit dem Piche-Evaporimeter und mit der Verdunstungswaage

Tab. 1 enthält die mittleren Monatssummen, Abb. 2 und 3 die mittleren Tagessummen der Verdunstung. Bei den Messungen mit Piche-Evaporimetern wurden je 2 Insel-, Küsten- und Binnenlandstationen ausgewählt und jeweils der Durchschnitt gebildet. Die Jahressummen des Niederschlages betragen bei den Inselstationen etwas über

Abb. 2. *I* Mittlere tägliche Verdunstung, mit Piche-Evaporimetern gemessen (1958—1961); *a* Küste, *b* Inseln, *c* Binnenland. *II* Mittleres tägliches Maximum der Lufttemperatur t_m in Puno (1958—1961). *III* Mittleres Sättigungsdefizit der Luft $E_L - e_L$ in Puno (1958—1961). *IV* *a* Wassermengen, die mit der Energie aus der Strahlungsbilanz täglich verdunstet werden könnten $H = Q/59$, *b* mittlere tägliche Verdunstung nach der Penman-Formel, *c* Ventilations-Feuchte-Anteil der potentiellen Verdunstung in der Penman-Formel

1100 mm, bei den Küstenstationen (einschließlich Puno) 700—900 mm und bei den Binnenlandstationen 500—800 mm. Die Binnenland-

stationen liegen 500 m höher als die übrigen. Bis auf fünf fehlende Monatswerte der Küstenstationen waren die Meßreihen vollständig.

Tabelle 1. *Verdunstungsmessungen mit Piche-Evaporimetern und mit einer Verdunstungswaage im Titicaca-Becken*

Mittlere Monatssummen (mm) der Jahre 1958—1961, *a* bis *c*: Durchschnitt von je 2 Stationen

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
a: 154	131	153	129	121	108	122	146	158	170	166	169	1727	
b: 150	126	141	123	121	110	114	132	133	151	134	146	1581	
c: 114	103	113	106	96	94	97	105	120	131	126	125	1330	
d: 143	118	154	151	171	182	212	243	237	238	206	191	2246	

a) Küstenstationen (Piche):

Capachica . . 69° 50' W, 15° 38' S, 3868 m

Desaguadero 69° 00' W, 16° 39' S, 3850 m

b) Inselstationen (Piche):

Isla Soto . . . 69° 30' W, 15° 33' S, 3850 m

Isla Taquili 69° 42' W, 15° 46' S, 3850 m

c) Binnenlandstationen (Piche):

Santa Rosa 70° 43' W, 14° 35' S, 4360 m

Mazo-Cruz 69° 43' W, 16° 45' S, 4390 m

d) Puno (Waage): 70° 01' W, 15° 51' S, 3852 m

Während der Kurvenverlauf der Meßwerte der Piche-Evaporimeter an den übrigen Stationen sehr ähnlich ist, hebt sich der Jahresgang der Meßwerte der Verdunstungswaage in Puno in wesentlichen Zügen davon ab. Auch ist deren Jahressumme bedeutend höher. Die Meßwerte der Piche-Evaporimeter lehnen sich im Jahresgang verhältnismäßig eng an den Temperaturverlauf der Region an, besonders an den Gang des mittleren täglichen Temperaturmaximums. Die starke Temperaturabhängigkeit der Meßwerte der Piche-Evaporimeter in diesem Klimabereich kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß die Stationen des feuchteren Inselklimas durchweg höhere Verdunstungsbeträge aufweisen als die Binnenlandstationen, die ihrerseits wegen der größeren Meereshöhe und wegen der binnenlandwärtigen Feuchteabnahme eigentlich eine stärkere Verdunstung aufweisen sollten. Thermisch sind die Küstenstationen am meisten begünstigt zugleich mit den höchsten Verdunstungswerten. Dabei mag die stärkere Belüftung, die durch die Land-Seewind-Zirkulation verursacht wird, und die geringere Feuchte im Vergleich zu den Inselstationen in gleicher Richtung wir-

ken. Im übrigen ist jedoch festzustellen, daß der Gang der Windgeschwindigkeit (Abb. 2 und 3) in der ersten Jahreshälfte entgegengesetzt zu den Verdunstungswerten der Piche-Evaporimeter verläuft. Der dominierende Einfluß der Temperatur macht sich auch dadurch bemerkbar, daß der steile Anstieg des Sättigungsdefizits der Luft (Abb. 2) zu Beginn der winterlichen Trockenzeit nicht verhindert, daß die mit Piche-Evaporimetern gemessene Verdunstung ihr Minimum annimmt. Das Sättigungsdefizit wurde aus den Monatsmitteln der relativen Feuchte und dem Sättigungsdampfdruck bei der Monatsmitteltemperatur bestimmt.

Da der Temperaturgang eine Folge des Strahlungsumsatzes ist, verwundert es nicht, daß der mit der Penman-Formel berechnete Verdunstungsgang große Ähnlichkeiten mit dem Gang der mit Piche-Evaporimetern gemessenen Verdunstung erkennen läßt. Diesem Verdunstungstyp (Piche, Penman) mit dem Minimum vom Mai bis Juni steht der Jahresgang der mit der Waage gemessenen Verdunstung mit dem tiefsten Wert im Februar und einem kontinuierlichen Anstieg bis zum September entgegen. Die Waage spricht deutlich auf das Sättigungsdefizit $E_L - e_L$ an. Noch deutlicher ist die Parallele zur Berechnung der Seeverdunstung mit den Massenaustauschformeln, in die das Dampfdruckgefälle Wasseroberfläche — Luft ein-geht.

3. Berechnung der Verdunstung mit Massenaustauschformeln

Von den zahlreichen Massenaustauschformeln für Seen wurden folgende gewählt (vgl. 8, S. 79 ff.):

$$V = 0.131 u (E_W - e_L) \quad (\text{mm/Tag}) \quad (1)$$

$$V = 0.13 (1 + 0.72 u) (E_W - e_L) \quad (\text{mm/Tag}) \quad (2)$$

u = Monatsmittel der Windgeschwindigkeit (m/s) in 2 m Höhe über der Wasseroberfläche;

E_W = Monatsmittel des Sättigungsdampfdruckes (mb) bei Wasseroberflächentemperatur;

e_L = Monatsmittel des Dampfdruckes (mb) in 2 m Höhe.

In der zweiten Formel wird der Einfluß des Windes auf den Verdunstungsgang gegenüber der Gl. (1) etwas abgeschwächt. In Ermangelung von Windmessungen über dem See wurden die Beobachtungen der Küstenklimastation Puno-Salcedo benutzt. Da auch

keine Seeoberflächentemperaturen verfügbar waren, wurden sie nach folgendem Verfahren rekonstruiert: In Puno herrscht das ganze Jahr über eine gut ausgeprägte Land-Seewind-Zirkulation. 1965 kamen zum Mittagstermin (vgl. Tab. 2) 80 % aller Winde aus den Richtungen E und NE, das heißt, vom See her. Der Jahresgang des täglichen Maximums der Lufttemperatur in Puno kann ein Maß für die

Tabelle 2. *Häufigkeiten der Windrichtungen zum 13 Uhr-Termin in Puno im Jahre 1965*

(Nach Resumen Climatologico e Hidrologico mensual, Lima, Peru)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	Summe
Januar	1	4	20	2	1	0	1	1	1	31
Februar	3	8	14	3	0	0	0	0	0	28
März	4	7	16	2	0	0	0	2	0	31
April	0	5	21	3	1	0	0	0	0	30
Mai	1	5	19	2	0	0	3	1	0	31
Juni	2	9	18	1	0	0	0	0	0	30
Juli	4	3	14	1	0	0	6	3	0	31
August	0	3	28	0	0	0	0	0	0	31
September . . .	1	4	22	0	0	0	0	3	0	30
Oktober	0	2	25	4	0	0	0	0	0	31
November . . .	0	2	26	1	0	0	0	1	0	30
Dezember . . .	0	8	9	12	0	0	0	1	1	31

Jahresmittel aller 13 Uhr — Beobachtungen in ‰

4	16	64	8	1	0	3	3	1	100
---	----	----	---	---	---	---	---	---	-----

Jahresschwankung der Seeoberflächentemperatur sein. Es wird zunächst angenommen, daß das Mittel der Seeoberflächentemperatur im Februar der Jahre 1957—1961 bei 13° C lag (zu den bereits vorhandenen Messungen vgl. F. MONHEIM [6], S. 96). Das mittlere tägliche Maximum der Lufttemperatur im Februar des gleichen Zeitraumes in Puno ist 15,2° C. Die Seeoberflächentemperaturen der Einzelmonate wurden mit der Formel: Monatsmittel der Seeoberflächentemperatur = Monatsmittel des täglichen Maximums der Lufttemperatur — 2,2° C berechnet und daraus dann der Sättigungsdampfdruck bestimmt.

Die Kurven der beiden Formeln (vgl. Abb. 3) unterscheiden sich nur wenig. Auch zwischen den mit Massenaustauschformeln und den mit der Waage bestimmten Werten besteht eine bemerkenswerte Übereinstimmung, sowohl was die Amplituden als auch den allgemeinen Verlauf betrifft. Die Waage verdunstet allerdings durchweg größere Mengen. Die mittleren Jahressummen weichen verhältnismäßig weit voneinander ab: Gl. (1) gibt 1737 mm, Gl. (2) gibt 1706 mm, mit der

Waage wurden 2246 mm gemessen, nach der Wasserhaushaltsgleichung ergibt sich für (1958—1961) eine Seeverdunstung von 1487 mm. Mit Gl. (2) wurden auch die Verdunstungskurven für

Abb. 3. I Mittlerer Dampfdruck e_L in Puno (1958—1961). II Mittleres Dampfdruckgefälle Wasseroberfläche — Luft $E_W - e_L$ (1958—1961). III Mittlerer Sättigungsdampfdruck bei Seeoberflächentemperaturen E_W (1958—1961), mittlere Seeoberflächentemperatur im Februar 13°C , siehe Text. IV Mittlere Windgeschwindigkeit in Puno (1958—1961). V Mittlere tägliche Verdunstung (1958—1961)

a mit Waage in Puno gemessen,

$$\left. \begin{array}{l} \text{c} \\ \text{b} \end{array} \right\} \text{ berechnet nach } \bar{V} = \frac{1}{4} \sum_1^4 V_n \left\{ \begin{array}{l} \text{mit } V_n = 0.13 (1 + 0.72 u_n) [(E_W)_n - (e_L)_n] \\ \text{mit } V_n = 0.131 u_n [(E_W)_n - (e_L)_n] \end{array} \right.$$

12°C und 11°C berechnet (Abb. 4). Die Jahressummen liegen auf einer schwach gekrümmten Linie. Einer mittleren Seeoberflächentemperatur im Februar von $11,7^{\circ}\text{C}$ entspricht eine Jahressumme von 1487 mm.

Es wurde ferner geprüft, wie groß die Abweichungen bei unterschiedlicher Mittelbildung ausfallen. Es war $|\bar{V} - \bar{\bar{V}}| \leq 0,08$ (mm/Tag), bei $\bar{X} = 1/4 \sum X_n$, mit $V_n = 0.13 (1 + 0.72 u_n) [(E_w)_n - (e_L)_n]$ und $\bar{\bar{V}} = 0.13 (1 + 0.72 \bar{u}_n) (\bar{E_w} - \bar{e_L})$. Mit dem vorliegenden

Abb. 4. Mittlere tägliche (oben) und jährliche (unten) Verdunstung berechnet nach der Massenaustauschformel (2) für verschiedene Seeoberflächentemperaturen

Material erweisen sich beide Verfahren als gleichwertig. Man kann ohne Bedenken einen Vergleich mit der Penman-Formel anstellen, für deren Berechnung nur Mittelwerte verwendet werden konnten.

4. Berechnung der Verdunstung von einer Wasseroberfläche mit der Formel von Penman

Die Penman-Formel wurde in folgender Form mit Werten der Klimastation Puno benutzt:

$$V = \frac{DH + \gamma E}{D + \gamma} \quad (\text{mm/Tag}) \quad (3)$$

$$H = Q/59, \quad Q = R \cdot 0.95 (0.18 + 0.55 n/N) \cdot a -$$

$$\sigma T^4 (0.56 - 0.09 \sqrt{e_L}) (0.10 + 0.9 n/N)$$

$$E = 0.35 (1 + 0.15 u) (E_L - e_L) \quad (\text{mm/Tag})$$

D = Steigung der Dampfdruckkurve bei Monatsmittel der Lufttemperatur t (mm Hg/ $^{\circ}$ C); Q = Strahlungsbilanz (cal/cm² Tag); R = extraterrestrische Strahlung; n, N = wirkliche und astronomisch mögliche Sonnenscheindauer; $n = n_0 + 40$, n_0 Sonnenscheindauer in Puno mit Horizonteinengung der Station von ca. 40 Minuten; a = Faktor, der die Strahlungszunahme mit der Höhe berücksichtigt — für den 3812m hoch gelegenen See wurde nach [2] S. 74 a mit 1,136 abgeschätzt; $T = 273,2 + t$; $\gamma = 0,48 p/755$ mit $p = 485$ mm Hg = mittlerer Luftdruck in Puno; E = Ventilations-Feuchte-Anteil der Verdunstung; E_L, e_L (mm Hg); u (km/h).

Die Jahressumme liegt mit 1714 mm noch um 230 mm über dem Wasserhaushaltswert. In den Monaten der winterlichen Trockenzeit Juni bis August wird mehr Energie für die Verdunstung verbraucht, als aus der Strahlungsbilanz zur Verfügung steht. Die Unterschiede der Jahresgänge zwischen den mit der Massenaustauschformel und den mit der Penman-Formel berechneten Verdunstungswerten sind vor allem durch den Einfluß der Strahlungsbilanz in der Penman-

Tabelle 3. *Daten zur Anwendung der Penman-Formel*
(soweit nicht in Abbildungen enthalten)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>N</i> für 15°S (Minuten)											
776	755	731	706	685	674	679	697	721	746	769	780
<i>n</i> ₀ für Puno 1938—1950 nach Guerava [3] (Minuten)											
397	379	416	461	538	543	539	546	528	515	505	408
<i>t</i> Monatsmittel der Lufttemperatur von Puno 1958—1961											
9.5	9.1	8.5	7.9	7.2	6.6	6.1	6.3	7.8	9.1	9.5	8.1
<i>R</i> Mittlere tägliche extraterr. Strahlung auf die horizontale Fläche für 15°S (cal/cm ² Tag)											
960	936	876	776	684	635	650	726	828	906	948	964
σT^4 (cal/cm ² Tag)											
748	744	738	731	724	718	713	715	730	744	748	733
Langwellige Strahlungsbilanz (cal/cm ² Tag)											
159	153	168	190	235	254	256	254	224	215	203	167
Kurzwellige Strahlungsbilanz (cal/cm ² Tag)											
508	490	494	478	476	450	457	504	548	576	584	517
<i>Q</i> Strahlungsbilanz (cal/cm ² Tag)											
349	337	326	288	241	196	201	250	324	361	381	350

Formel bedingt (Abb. 5 und 2). Eine Kontrollrechnung mit geringfügiger Änderung von $\gamma = 0,3$ auf 0,5 zeigte, daß das Minimum der mit der Penman-Formel berechneten Verdunstung vom Juni auf den

April vorverlegt und damit eine Annäherung an die mit der Massenaustauschformel berechneten Verdunstung bewirkt wird. Eine Entscheidung darüber, welcher Formel bzw. welchem der beiden Typen der Vorrang bei der Verbesserung der Seeverdunstungskurve zu geben ist, ist eigentlich erst dann zu treffen, wenn Strahlungsbilanz-

Abb. 5. Mittlere tägliche Verdunstung des Titicacasees (1958—1961); I nach der Wasserhaushaltsgleichung $V = N + Z - A - \Delta S$, II nach der Penman-Formel, reduziert auf die Jahressumme von I, III nach der Massenaustauschformel (2), reduziert auf die Jahressumme von I

messungen, Austauschmessungen möglichst an der Wasseroberfläche oder von einer Insel aus und exakte Bestimmungen der Seeoberflächentemperatur vorliegen.

5. Folgerungen für den Jahresgang der Verdunstung des Titicacasees

Um die Kurven der Jahresgänge der mit der Wasserhaushaltsgleichung, mit der Massenaustausch- und mit der Penman-Formel berechneten Verdunstungsmengen direkt vergleichen zu können (Abb. 5), müssen sie auf eine gleiche Jahresmenge reduziert werden. Als Bezugswert wurde die Jahressumme der aus der Wasserhaushaltsgleichung sich ergebenden Verdunstung von 1487 mm gewählt. Der Gang der mit der Massenaustauschformel (2) bestimmten Verdunstung wurde zweckmäßigerweise durch Veränderung der Oberflächentemperatur als Parameter reduziert. Eine mittlere Oberflächentemperatur im Februar von $11,7^{\circ}\text{C}$ bleibt im Rahmen der Wahrscheinlichkeit. Die Abänderung des Faktors 0,13 hätte zu einer stärkeren Verkleinerung der Amplitude geführt. Bei der in Betracht kommenden Temperaturverringerung ändert sich die Amplitude nur wenig (Abb. 4). Auch bei der Penman-Formel wurde von der Verwendung eines Reduktionsfaktors und damit von der Änderung der Amplitude abgesehen. Die Penman-Formel hat mit 2,2 mm/Tag ohnehin schon die kleinste Amplitude ergeben, wenn man von den

problematischen Messungen mit Piche-Evaporimetern mit Amplituden von 1,1 (Binnenland), 1,2 (Insel) und 1,9 (Küste) absieht. Die Reduktion wurde folgendermaßen vorgenommen: $V_i = V - 0,65$.

Der Kurvenvergleich läßt folgende vorläufige Interpretation des Verdunstungsganges des Titicacasees zu. Das Maximum scheint in der Übergangsjahreszeit vom trockenkühlen Winter zum feuchten Sommer in den Monaten Oktober und November zu liegen, während die Sonne durch den Zenit nach Süden wandert (zwischen 1. und 10. November). Während des zweiten Zenitstandes (zwischen 3. und 12. Februar) wird das Maximum der Regenzeit erreicht. Ein starker

Abb. 6. Mittlere klimatische Wasserbilanz ($N - V$) des Titicacasees (1958—1961)

Rückgang der Verdunstung ist die Folge. Wann das Minimum auftritt, bleibt noch ungeklärt. Der steile Abfall und Anstieg der Verdunstungskurve aus der Wasserhaushaltsgleichung am Jahresanfang

scheint korrekturbedürftig. Der starke Verdunstungsrückgang kann noch durch eine Unterbestimmung des Niederschlages in der Berechnung verursacht sein. Ein weiterer Ausgleich zwischen den Januar- und Februarwerten einerseits und den Folgemonate andererseits käme wahrscheinlich zustande, wenn die Fehler der Wasservolumenbestimmung eliminiert würden, die gerade in dieser Jahreszeit einen Vorzeichenwechsel haben dürften. Die größeren Jahreswerte der mit den unreduzierten Massenaustausch- und Penmanformeln berechneten Verdunstung würden eine Erhöhung der Niederschlagsjahressumme durch Korrekturen an den Monatssummen am Jahresanfang ebenfalls rechtfertigen. Es sollte den Niederschlagsmessungen daher in Zukunft noch mehr Sorgfalt gewidmet werden.

6. Die klimatische Wasserbilanz ($N - V$) des Titicacasees

Der Titicacasee ist ein Fremdlingssee, der durch seine Zuflüsse aufrechterhalten wird. Er verdunstet wesentlich mehr Wasser, als Niederschlag auf ihn fällt. Im Durchschnitt der Jahre 1958—1961 lauten die mit der Wasserhaushaltsgleichung berechneten Jahreswerte $N = 972$ mm, $V = 1487$ mm, $N - V = -515$ mm.

Abb. 6 zeigt den Jahresgang der klimatischen Wasserbilanz. Der Verdunstungsgang wurde nach der Massenaustauschformel (2) berechnet. Aus der Differenz $N - V$ ergeben sich nur 4 Monate mit positiver klimatischer Wasserbilanz. Nach der Penman-Formel wird auch die Dezemberdifferenz schwach negativ, so daß nur 3 „humide“ Monate übrig bleiben. Auch die noch zu erwartenden Verbesserungen der Verdunstungskurve des Titicacasees werden dieses Bild der klimatischen Wasserbilanz nicht mehr wesentlich verändern.

Den Herren im Ministerio de Fomento — Dirección de Irrigación — in Lima und vom Landwirtschaftsdienst der Universidad Técnica del Altiplano in Puno bin ich für die Überlassung unveröffentlichten Beobachtungsmaterials sehr zu Dank verpflichtet, für dessen Übermittlung ebenfalls den Herren Ing. BARREDA und Dr. ZEA, Puno.

Literatur

1. DAMMANN, W.: Zur Meteorologie des Tschadsee-Gebietes. Ber. des Bundes der Diplomgärtner, 36—47 (1967).
2. DIRMHIRN, I.: Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Frankfurt a. M.: Akad. Verlagsges., 1964.
3. GUERAVA, A.: El clima de Puno. Boletín de la Dirección Gen. de Agric. Lima, 78—87 (1953).
4. HOFMANN, G.: Strahlung und Verdunstung. Wiss. Zeitschr. der Karl-Marx-Universität Leipzig, Math.-Nat. Reihe, Heft 4, 13, 767—770 (1964).

5. KESSLER, A., und F. MONHEIM: Der Wasserhaushalt des Titicacasees nach neueren Meßergebnissen. *Erdkunde* **22**, 275—283 (1968).
6. MONHEIM, F.: Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. *Heidelberger Geogr. Arb.* **1**, 1956.
7. PENMAN, H. C.: Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **193**, 120—145 (1948).
8. World Meteorological Organization: Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration. *Techn. Note Nr. 83*, Geneva 1966.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. ALBRECHT KESSLER, Im Eichholz 10, D-53 Bonn-Ippendorf.