

References

1. COSTIN, A. B. (1956): A Note on the Gilgais and Frost Soils. *The Journal of Soil Science*, Vol. 6, pp. 32–34.
2. COTTON, C. A. (1952): Volcanoes as Landscape Forms. *Whitcombe & Tombs, 2nd Edition*, pp. 214–253.
3. ESCHER, B. G. (1925): L'eboulement prehistorique de Tasikimalaja et le volcan Galoungoung, Java. *Leidische Geol. Meded.*, Vol. 1, pp. 8–21.
4. FAIRBURN, W. A. (1963): Geology of the North Machakos-Thika Area. Report No. 59, *Geol. Surv. Kenya*, pp. 25–26.
5. GEVAERTS, E. A. L. (1964): Hydrology of the Nairobi Area. *Govt. Kenya, Water Development Dept. Technical Report No. 1*, pp. 34, see Chapter 3, p. 4.
6. HALLSWORTH, E. G., ROBERTSON, G. K., and GIBBONS, F. E. (1955): Studies in Pedogenesis in New South Wales, VII: The 'Gilgai' Soils. *The Journal of Soil Science*, Vol. 6, pp. 1–31.
7. OJANY, F. F. (1966): The Physique of Kenya: A Contribution in Landscape Analysis. *Annals Assoc. American Geographers*, Vol. 56, pp. 183–196.
8. PRESTON, J. A. (1932): In *C.S.I.R. (Australia) Bulletin No. 52*. (The present author has not been able to see the full length of this article).
9. SCOTT, R. M. (1963): The Soils of the Nairobi-Thika-Yatta-Machakos Area. *Dept of Agriculture, Kenya*, pp. 14–16.
10. STEPHEN, I., BELLIS, E., and MUIR, A. (1956): Gilgai phenomena in Tropical Black clays of Kenya. *The Journal of Soil Science*, Vol. 7, pp. 1–9.
11. THOMPSON, B. W., and SANSOM, H. W. (1967): Climate. In *Nairobi: City and Region*. Edited by W. T. W. Morgan, Oxford University Press, Nairobi, pp. 20 bis 38.
12. WILCOCKSON, W. H., DOWNIE, C., and others (1965): Explanatory Notes on the Geological Map of Kilimanjaro. *Geol. Surv. Division. Tanzania*, p. 7.

Note: A discussion of the problem of gilgaid soils in the recent literature is given in BREMER, HANNA: Musterböden in tropisch-subtropischen Gebieten und Frostmusterböden. *Annals of Geomorphology*, N.F., Bd. 9, Berlin 1965, pp. 222–236.

THE EDITORS

DER WASSERHAUSHALT DES TITICACASEES NACH NEUEREN MESSERGEBNISSEN

Mit 3 Abbildungen und 4 Tabellen

ALBRECHT KESSLER und FELIX MONHEIM¹⁾

Summary: The water budget of Lake Titicaca, after new measurements.

Since 1956, there have been 37 precipitation gauges in the Titicaca Basin (Peru and Bolivia). Apart from these, discharge measurements have been carried out since 1957 on the most important streams flowing into Lake Titicaca and on the Desaguadero. In addition, both authors have carried out their own observations. With the help of all these a map of annual precipitation for the 1957–1961 period was prepared and, using the water budget balance, evaporation, until now only estimated, was calculated.

The picture of precipitation distribution is particularly surprising, with a pronounced maximum of 1150 mm over the northern part of Lake Titicaca, partly explicable in terms of relief (lower height of the east Cordillera between Cordillera Real and the Apolobamba cordillera). Above all, however, the nightly land wind with convergence of ground winds over the lake and higher humidity there, contribute to this maximum.

The water budget of the lake was calculated for the five individual years 1957 to 1961. The moisture receipts of the lake are accounted for 58% by precipitation and 42% by surface inflow, the losses 2% from discharge and 98% (1480 mm) from evaporation. The mean annual level of the water budget components shows that evaporation has the lowest monthly variation in comparison to precipitation and inflow. In conclusion, the water budget of the Titicaca Basin is examined and a mean discharge coefficient of 0,21 calculated.

In seinen Untersuchungen zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens zeigte F. MONHEIM 1956, daß in der bisherigen Literatur sehr unterschiedliche Auffassungen über den Wasserhaushalt des Titicacasees und über den Abfluß durch den Desaguadero bestehen, der z. B. von A. FORTI zu 140 m³/sec berechnet wurde, von F. MONHEIM aber nur zu 20 m³/sec²⁾. Die damaligen Wasserhaushaltsberechnungen beruhten freilich auf unvollkommenen Unterlagen, da der Zufluß zum See noch nicht gemessen wurde und auch die Niederschläge wegen der Weitmaschigkeit des Beobachtungsnetzes und manchmal auch wegen mangelnder Schulung der Beobachter nicht mit der nötigen Genauigkeit bekannt waren.

Im Zusammenhang mit den schon länger diskutierten Projekten zur Nutzung des Wassers des Titicacasees zur Elektrizitätsgewinnung und zur Bewässerung in der pazifischen Küstenwüste haben nun Peru und Bolivien seit 1956 zahlreiche neue meteorologische Stationen im Titicacabecken errichtet. Außerdem werden in beiden Ländern seit 1957 Abflußmessungen in den wichtigsten Zuflüssen des Titicacasees und im Desaguadero durchgeführt. Dieses Material konnten die Verfasser 1962 auf einer gemeinsamen Forschungsreise einsehen und dann 1966 auf der La-

¹⁾ F. MONHEIM: Einleitung und Niederschlag; A. KESSLER: Zuflüsse und Wasserhaushalt.

²⁾ F. MONHEIM, 1956, S. 94.

teinamerikanischen Regionalkonferenz der I.G.U. in Mexico über seine Auswertung berichten³⁾).

Da diese Veröffentlichung nur in spanischer Sprache in den Konferenzberichten erfolgte, schien eine deutsche Bearbeitung wünschenswert, die zudem neueres Beobachtungsmaterial der Jahre 1962–1965 berücksichtigen kann. Darüber hinaus wird in dem hier vorgelegten Beitrag auch auf die von FLOHN und FRAEDRICH 1966 am Beispiel des Victoriasees aufgezeigte Bedeutung der tagesperiodischen Zirkulation für die Niederschlagsverteilung eingegangen.

In der Untersuchung von 1956 standen für die Berechnung des Wasserhaushaltes folgende Werte zur Verfügung⁴⁾:

1. Die von der Firma Hochschild durchgeführten Abflußmessungen im Desaguadero bei seinem Austritt aus dem Titicacasee;
2. Pegelmessungen an der Mole in Puno (seit 1912).
Die Verbindung dieser beiden Beobachtungsgruppen erlaubte es, den langjährigen mittleren Abfluß aus dem Titicacasee zu etwa 20 m³/sec zu bestimmen.
3. Niederschlagsmessungen an 6 Stationen des Titicacabeckens und an 11 Stationen in seiner näheren Umgebung. Anhand dieser Messungen wurde der mittlere jährliche Niederschlag auf dem See zu 625 mm angenommen und der mittlere Niederschlag im Einzugsgebiet zu 670 mm.
4. Verdunstungsmessungen an einigen meteorologischen Stationen, die z. B. für Puno im Mittel von 10 Jahren den Wert von 1896 mm ergeben. Diese Messungen sind aber mit methodischen Fehlern belastet, und sie ergeben mit Sicherheit einen zu hohen Wert. Selbst die Verdunstung vom See dürfte wesentlich geringer sein. Sie wurde von MONHEIM 1956 etwas willkürlich mit 1500 mm angesetzt.

Mit Hilfe dieser Messungen und der Annahmen über Niederschlag und Verdunstung war es damals möglich, die einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts wenigstens in ihrer Größenordnung zu schätzen. Danach sollten von den Wassereinnahmen des Titicacasees 60,5 % auf den Zufluß aus dem Einzugsgebiet entfallen und 39,5 % auf den Niederschlag auf dem See. Dagegen verteilen sich die Wasserverluste zu 95 % auf die Verdunstung und zu nur 5 % auf den Abfluß durch den Desaguadero. Es muß aber betont werden, daß diese Schätzung weitgehend auf den nur ungenau bekannten Werten für den Niederschlag auf den See und auf dem etwas willkürlich angesetzten Wert für die Verdunstung von der Seeoberfläche beruhte.

³⁾ A. KESSLER und F. MONHEIM, 1966. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei auch an dieser Stelle für die großzügige Reisebeihilfe gedankt.

⁴⁾ F. MONHEIM, 1956, S. 83–95.

An Hand des neuen Beobachtungsmaterials soll nun versucht werden, die damalige Schätzung zu überprüfen und zu verbessern. Dazu steht heute ein erheblich dichteres Netz von Niederschlagsmeßstellen zur Verfügung. Dazu kommen dann noch die Abflußmessungen im Desaguadero und in den Zuflüssen des Titicacasees. Letztere erlauben es auch, bei der Aufstellung des Wasserhaushaltes einen grundsätzlich anderen Weg zu beschreiten als 1956. Während damals der unbekannte Zufluß zum See als Differenz aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluß und Seespiegeländerung bestimmt wurde nach der Formel

$$\text{Zufluß} = \text{Verdunstung} + \text{Abfluß} - \text{Niederschlag} + \text{Seespiegeländerung}$$

kann heute umgekehrt die Verdunstung aus der Differenz von Zufluß, Niederschlag, Abfluß und Seespiegeländerung bestimmt werden, nach der Formel

$$\text{Verdunstung} = \text{Zufluß} + \text{Niederschlag} - \text{Abfluß} - \text{Seespiegeländerung.}$$

Im folgenden werden zunächst die einzelnen Komponenten dieser Gleichung besprochen.

a) Der Abfluß durch den Desaguadero

Seit 1956 werden im Desaguadero am Austritt aus dem Titicacasee regelmäßig Abflußmessungen durchgeführt⁵⁾. Sie ergeben für die Jahre 1957–1961 einen mittleren jährlichen Abfluß von 8 m³/sec, mit einem Maximum im April von 14 m³/sec und einem Minimum im November von 5 m³/sec. Bei einem Vergleich dieser Werte mit dem 1956 von MONHEIM angegebenen langjährigen Mittel von 20 m³/sec ist zu bedenken, daß der Titicacasee von 1957 bis 1961 einen etwas zu niedrigen Wasserstand hatte, so daß also das langjährige Mittel etwas höher sein muß.

b) Der Niederschlag auf dem See (Abb. 1)

Bis 1956 bestanden im peruanischen Teil des Titicacabeckens nur zwei meteorologische Stationen und im bolivianischen Teil 4 Stationen. 1957 wurden dann im peruanischen Teil 16 weitere Niederschlagsmeßstellen eingerichtet, von denen 4 in der Nachbarschaft des Sees liegen und zwei auf Inseln im See⁶⁾. Dazu

⁵⁾ Zur Kontrolle dieser Messungen führten die Verfasser 1962 eine Präzisions-Abflußmessung durch, die die Brauchbarkeit der peruanischen Angaben bestätigt. Allerdings sind die angegebenen Werte bei hohem Wasserstand (etwa oberhalb 10 Zoll am Pegel Puno) anscheinend zu niedrig. Zur Wasserführung des Desaguadero vgl. auch A. KESSLER, 1966.

⁶⁾ Inzwischen wurde das Beobachtungsnetz auf der peruanischen Seite bis 1966 nochmals erheblich verdichtet (2 weitere Stationen am See, 3 in seiner näheren Nachbarschaft und 14 in den äußeren Teilen des Titicacabeckens). Eine Niederschlagskarte für 1965 auf der Basis dieses dichteren Netzes bestätigt in den Grundzügen das Bild für 1957–1961. Als eine Besonderheit liegt freilich westlich des Sees im Raume Sta. Lucia-Mañazo ein lokales „Trockengebiet“ mit unter 400 mm Jahresniederschlag. Es bleibt ab-

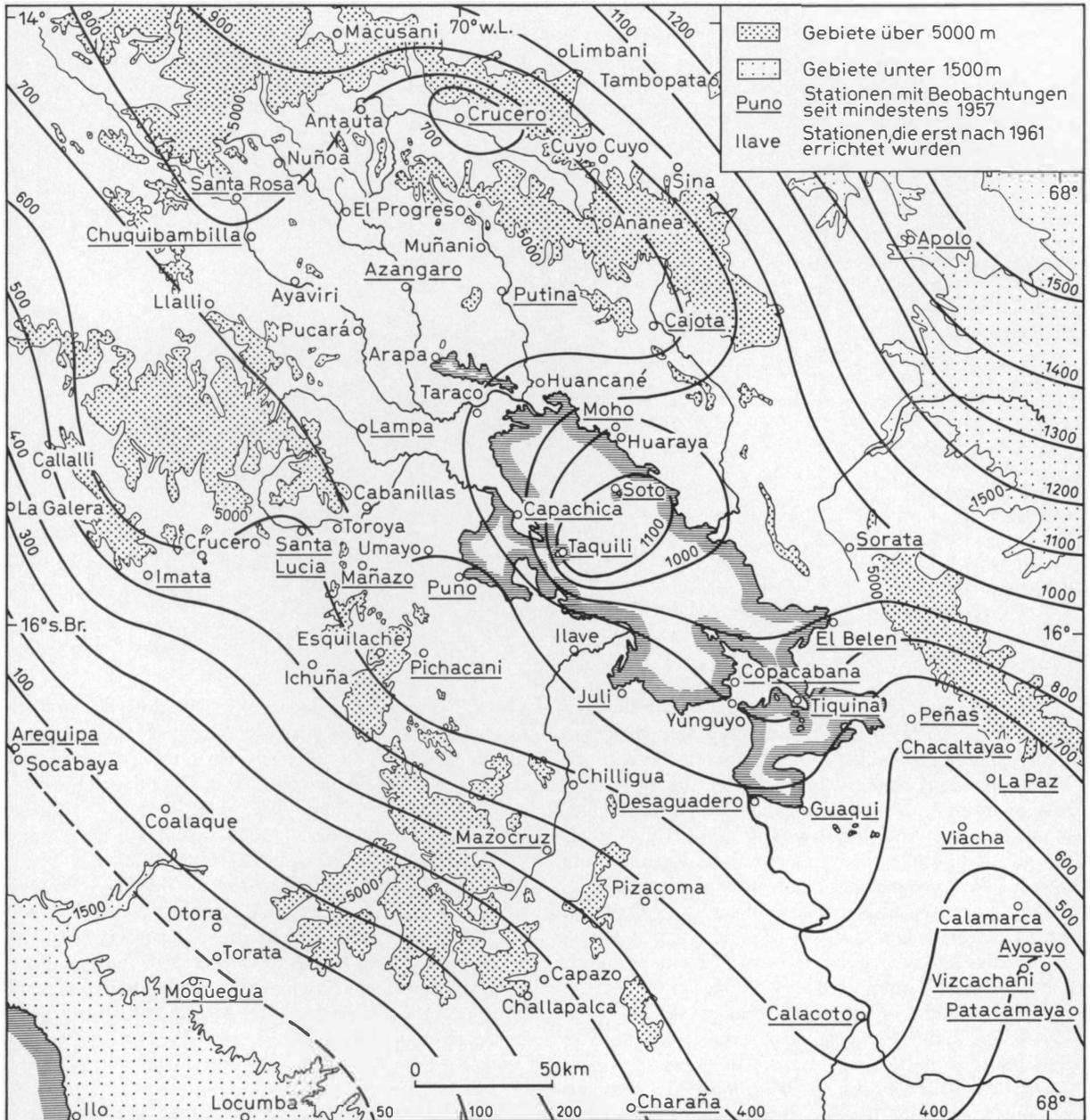


Abb. 1: Jahressummen des Niederschlags
(Mittel 1957–1961 in mm)

kommen auf der bolivianischen Seite noch 5 Stationen in der Nachbarschaft des Sees, die aber leider nur unregelmäßig arbeiten. Darüber hinaus wurden auch in den äußeren Teilen des Titicacabeckens 10 weitere Stationen angelegt (vgl. Abb. 1).

An Hand der Messungen dieser Stationen war es

zuwarten, ob dieses sich auch im langjährigen Mittel bestätigen wird, doch sprechen die Beobachtungen von 1957 bis 1961 dagegen.

möglich, eine neue Niederschlagskarte für das Titicacabecken zu entwerfen ⁷⁾.

⁷⁾ Der Entwurf dieser Karte wurde erschwert durch die Tatsache, daß in den Beobachtungsreihen gelegentlich Lücken auftreten und daß einzelne Werte unglaublich erscheinen. Zum Ausgleich dieser Lücken und Fehler wurde zunächst für jeden Monat eine eigene Niederschlagskarte gezeichnet (insgesamt also 60 Karten) und anhand dieser Karten die fehlenden Werte ergänzt bzw. bei den unglaublichen Werten Korrekturen vorgenommen. Um

Tabelle 1: Vektormittel der Höhenwinde in Ovejuyo bei La Paz (nach V. GUERRINI)

		Zahl der Beobachtungen	500 mb		400 mb		300 mb	
			grad	m/sec	grad	m/sec	grad	m/sec
Mai	1963	28	300	3,4	310	5,3	300	15,8
Juni	1963	34	270	4,0	290	6,0	280	12,8
Juli	1963	39	300	4,3	280	8,8	280	13,6
August	1963	30	270	4,1	290	7,6	290	16,4
September	1963	23	300	6,2	300	13,4	290	19,0
Oktober	1963	26	350	2,3	300	4,6	270	7,7
November	1963	27	110	1,3	070	0,8	290	16,6
Dezember	1963	44	130	2,1	120	0,8	330	3,3
Januar	1964	33	030	1,2	280	1,8	290	4,8
Februar	1964	27	080	2,0	110	3,8	100	3,9
März	1964	29	090	1,5	110	1,3	330	2,4
April	1964	25	090	3,0	090	2,7	240	3,7
Mai	1964	27	270	1,1	280	5,1	290	14,6
Juni	1964	29	250	2,7	280	4,9	260	13,6
Juli	1964	25	270	6,9	260	11,8	260	19,4
August	1964	19	300	10,4	290	15,2	270	22,6
September	1964	28	240	3,6	260	5,1	260	11,5
Oktober	1964	30	280	3,3	270	7,5	280	15,5
November	1964	26	180	2,0	280	5,0	300	13,1
Dezember	1964	22	130	1,2	060	1,3	350	4,0
Januar	1965	30	150	1,2	340	1,6	340	4,4
Februar	1965	26	090	1,3	120	2,8	190	1,6
März	1965	24	010	1,4	310	3,3	290	9,6
April	1965	27	070	1,6	220	1,2	290	5,8

Diese unterscheidet sich grundlegend von derjenigen, die MONHEIM 1956 veröffentlicht hat. Der wichtigste Unterschied betrifft den unmittelbaren Bereich des Titicacasees, auf dem anscheinend viel höhere Niederschläge fallen als 1956 angenommen wurde. Das Maximum liegt mit 1100 bis 1150 mm bei den Inseln Taquili und Soto, etwa im Zentrum des Lago Grande. Von hier aus nehmen die Niederschläge über dem See nach N auf etwa 850 mm ab und nach S und W auf etwa 700 mm. Der mittlere Niederschlag auf dem See beträgt nach dieser Karte etwa 930 mm, während 1956 nur mit 625 mm gerechnet wurde.

Dieser höhere Niederschlag erklärt sich aus verschiedenen Gründen. Der erste ergibt sich aus der Reliefgestaltung auf der Ostseite des Sees. Das Titicacabecken liegt nämlich in der sommerlichen Regenzeit noch ganz im Bereich der östlichen Höhenströmung der Tropen. Diese Tatsache, die 1956 nur aus den eigenen Wolkenzugbeobachtungen erschlossen werden konnte (vgl. MONHEIM 1956, S. 46 ff.), läßt sich inzwischen auch durch regelmäßige Radiosondaufstiege⁸⁾ in Ovejuyo bei La Paz belegen (vgl. Tab. 1). Von November bis April kommen hier die Höhenwinde im 500 mb-Niveau und meist auch im

400 mb-Niveau vorwiegend aus Nordost bis Südost. Östlich des Bereiches mit dem Niederschlagsmaximum auf dem Titicacasee liegt nun ein Gebiet, in dem sich die Ostkordillere ungewöhnlich stark erniedrigt. Während in der Cordillera Real und in der Kordillere von Apolobamba überall 5000 m überschritten werden und weite Teile sogar auf über 6000 m aufsteigen, mit Gipfelhöhen über 6500 m, liegt die Wasserscheide in diesem breiten Zwischenstück in etwa 4500 m Höhe und teilweise sogar darunter. Dadurch verlieren die aus dem Amazonasbecken herangeführten Luftmassen hier weniger Feuchtigkeit durch Steigungsregen. Sie erreichen den Altiplano also mit größerer absoluter Feuchte, so daß die entsprechenden Konvektionsniederschläge hier ergebiger sein können.

Dieser orographisch bedingte Effekt wird noch verstärkt durch die besonderen meteorologischen Bedingungen über dem Titicacasee. Durch die starke Verdunstung von der riesigen Seefläche ist die Luft feuchter als über dem benachbarten Land. Auch dadurch kann hier entsprechend mehr Niederschlag fallen.

Neuere Untersuchungen am Victoriasee legen die Vermutung nahe, daß möglicherweise auch tagesperiodische Winde an der Entwicklung dieses Niederschlagsmaximums beteiligt sind. Ein ähnliches Niederschlagsmaximum auf dem Victoriasee wird nämlich

das Ausmaß der Korrekturen zu zeigen, sei erwähnt, daß bei den 18 peruanischen Stationen insgesamt 2,2 % der Werte korrigiert und 4,1 % der Werte ergänzt wurden. Die Ergänzungen betreffen vor allem das erste Beobachtungsjahr 1957 (3 %), in dem bei 4 Stationen die Beobachtungen zunächst nur unregelmäßig durchgeführt wurden.

⁸⁾ Die Aufstiege erfolgen seit Mai 1963 im allgemeinen täglich um 12 Uhr GMT, gelegentlich auch zusätzlich um 24 Uhr GMT.

von H. FLOHN und K. FRAEDRICH durch die regelmäßig auftretenden nächtlichen Landwinde erklärt, die von allen Seiten in Richtung auf den See wehen und so zu einer nächtlichen Konvergenz der Bodenwinde über dem See führen⁹⁾. Dabei sind die Landwinde wegen der allgemeinen Ostströmung der Tropen auf der Ostseite des Victoriasees stärker ausgeprägt als auf seiner Westseite, und dementsprechend liegt die Konvergenz und das Niederschlagsmaximum über der Westhälfte des Sees.

Den Beweis für ihren Erklärungsversuch sehen FLOHN und FRAEDRICH in der entsprechenden Tagesperiodizität des Niederschlagsanges mit einem ausgesprochenen nächtlichen Maximum bei den in der Nachbarschaft des Sees oder auf Inseln im See gelegenen Stationen (Entebbe 4–7 Uhr im Sommer, 7–9 Uhr im Winter, Ukerewe 4–10 Uhr). Dagegen haben die auf der Ostseite des Sees gelegenen Stationen Kisumu und Kisii einen völlig anderen Niederschlagsgang (Maximum 16–18 Uhr bzw. 15–19 Uhr).

Der tagesperiodische Wechsel von Land- und See- wind ist auch am Titicacasee weit verbreitet¹⁰⁾. Er erfolgt hier im allgemeinen zwischen 8 und 9 Uhr am Morgen und gegen 18 Uhr am Abend. Leider liegen aber keine Angaben über die tageszeitliche Verteilung der Niederschläge an einzelnen Meßstellen vor, so daß von daher kein Beweis für eine ursächliche Verknüpfung des Niederschlagsmaximums über dem Titicacasee mit den nächtlichen Landwinden zu erbringen ist. Unsere eigenen Wetterbeobachtungen im Titicacabecken erfassen nur die Niederschlagshäufigkeit und nicht (wie bei den Stationen am Victoriasee) die Niederschlagsmenge. In den Jahren 1954 und 1962 wurden von uns insgesamt 100 Regenfälle beobachtet, deren Beginn folgende tageszeitliche Verteilung aufweist:

Puno und unmittelbare Nachbarschaft des Sees (vor allem Westufer)		übriges Titicacabecken
8–16 h	18 Regenfälle	33 Regenfälle
17–18 h	13 Regenfälle	5 Regenfälle
18–20 h	14 Regenfälle	3 Regenfälle
20–21 h	3 Regenfälle	2 Regenfälle
21– 8 h	7 Regenfälle	2 Regenfälle

Es zeigt sich zunächst ein markanter Gegensatz zwischen der Nachbarschaft des Sees mit einem Überwiegen der nächtlichen Niederschläge (zwischen 17 und 8 Uhr) und dem übrigen Becken, in dem die Tagesbeobachtungen dominieren. In dieser Schärfe dürfte er freilich nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen, da die Zahl der Tagesaufenthalte im „übrigen Titicacabecken“ aus reisetchnischen Gründen erheblich größer war als die Zahl der Nachtaufenthalte. Trotzdem zeigt die im Vergleich zu Puno

absolut viel größere Zahl der Regenfälle zwischen 8 und 16 Uhr im „übrigen Titicacabecken“, daß dort der Schwerpunkt der Niederschläge tatsächlich mehr bei den Tagregen liegt.

Umgekehrt läßt sich aus den zahlreichen ganztägigen Beobachtungen in der unmittelbaren Nachbarschaft des Sees und insbesondere in Puno mit Sicherheit folgern, daß dort die größte Niederschlagshäufigkeit in den frühen Abendstunden liegt, wenn auch die wirkliche Zahl der nächtlichen Regenfälle (zwischen 21 und 8 Uhr) sicher größer ist als die von uns registrierte, da ja nicht mit Gewittern verbundene nächtliche Niederschläge nur in Ausnahmefällen – bei zufälligem Aufwachen – beobachtet wurden.

Schließlich läßt sich auch ohne Niederschlagsmessung mit Sicherheit feststellen, daß die nächtlichen Niederschläge (zwischen 17 und 8 Uhr) in Puno und in der Nachbarschaft des Sees erheblich ergiebiger sind als die am Tage fallenden. Meist handelt es sich in den Abendstunden um länger anhaltende, schwere Gewitter, während am Tage mehr kurze Regenschauer auftreten. Beim Vergleich mit dem Victoriasee ergibt sich freilich anscheinend doch ein erheblicher zeitlicher Unterschied. Dort liegt das Maximum ja in den frühen Morgenstunden (4–10 Uhr), am Titicacasee dagegen am Abend und in der ersten Nachthälfte. Allerdings könnte es sich möglicherweise zum See hin (auf der Halbinsel Capachica und auf den Inseln Taquili und Soto) mehr gegen den Morgen verschieben. Darauf deuten zum mindesten einige Wolkenbeobachtungen von Puno aus hin.

Die im Vergleich zum Victoriasee frühere Lage des Niederschlagsmaximums dürfte beim Titicacasee durch das Relief bedingt sein. Während beim Victoriasee das Gelände in der Nachbarschaft des Sees nur langsam ansteigt, ist der Titicacasee im Westen und Osten im allgemeinen von recht steilen Hängen umgeben, die etwa 200–400 m über den See aufragen. An diesen Hängen entwickelt sich bereits in den frühen Abendstunden eine hangabwärts wehende, kühle Luftströmung, die sich unter die relativ warme und mit Feuchtigkeit angereicherte Luft über dem See schiebt und diese somit anhebt. Diese Erscheinung muß gerade in der von Halbinseln eingefassten Bucht von Puno besonders ausgeprägt sein, da dort die Hangabwinde praktisch von allen Seiten her zur Bucht abfließen. So kommt es hier wohl schon am Abend zur Ausbildung einer Konvergenz und damit zur Niederschlagsbildung¹¹⁾. Insgesamt dürften also auch beim Titicacasee die nächtlichen Landwinde – hier nur noch verstärkt durch den Hangwindeffekt – an der Entwicklung des Niederschlagsmaximums über der Seefläche beteiligt sein.

Wenn sich somit auch einleuchtende Gründe für die unerwartet hohen Niederschläge anführen lassen,

⁹⁾ H. FLOHN und K. FRAEDRICH 1966.

¹⁰⁾ Vgl. F. MONHEIM, 1956, S. 50–53.

¹¹⁾ Diesen Hinweis auf den evtl. Reliefeinfluß verdanke ich Herrn O. FRÄNZLE.

könnte vielleicht doch ein gewisser Zweifel an den Beobachtungen bestehenbleiben. Außerdem ergibt sich die Frage, ob die am Ufer und auf Inseln gelegenen Stationen wirklich repräsentativ sind für die freie Seefläche. Diese Frage läßt sich durch die Wasserhaushaltsberechnungen überprüfen. Dabei zeigt sich, daß die Niederschläge auf dem See tatsächlich in etwa die beobachtete Größenordnung haben müssen (vgl. unten).

Die neue Niederschlagskarte basiert auf den Messungen der Jahre 1957–1961. Diese kurze Periode war aber anscheinend erheblich feuchter als die Periode 1942–1946, die der früheren Karte zugrunde lag. Bei Chuquibambilla beträgt die Differenz etwa 15 % und bei Puno etwa 20 %. Auch gegenüber dem langjährigen Mittel dürften die Werte von 1957 bis 1961 um etwa 7 % zu hoch sein, so daß für langjährige Kalkulationen mit einem Niederschlag von etwa 860 mm zu rechnen ist.

c) Die Zuflüsse

An den Hauptzuflüssen zum Titicacasee werden seit 1957 regelmäßig Abflußmessungen vorgenommen, die für die Periode 1957–1961 folgende Jahresmittel ergeben ¹²⁾:

Ramis	82 m ³ /sec
Coata	30 m ³ /sec
Ilave	25 m ³ /sec
Huancané	16 m ³ /sec
Suchez	9 m ³ /sec

Für den Gesamtzeitraum 1957–1961 fehlten lediglich einige Monatswerte vom Suchez, die aber relativ einfach aus den übrigen Daten rekonstruiert werden konnten.

Es erhebt sich nun die Frage, wie weit mit der Abflußmenge dieser Hauptflüsse der Gesamtzufluß zum See erfaßt wird bzw. wie hoch ein eventueller Zuschlag bemessen sein muß. Auf ihrer Forschungsreise haben sich die Verfasser 1962 eingehend mit diesem Problem befaßt. In den Monaten März und April (Regenzeit) haben sie möglichst alle kleinen Flüsse und Bäche registriert und deren meist geringen Abfluß geschätzt, der in der Trockenzeit fast völlig zum Erliegen kommt. Eine weitere Erhöhung ergibt sich durch die Tatsache, daß nicht alle Abflußmeßstellen der großen Flüsse direkt am See liegen, so daß auch für das restliche Abflußgebiet ein bestimmter Betrag in Rechnung gestellt werden muß. Schließlich ist zu bedenken, daß an zahlreichen Stellen mit flachem Ufer wahrscheinlich ein Grundwasserstrom zum See führt. Nach sorgfältiger Abschätzung aller dieser Komponenten wurde mit einem Zuschlag von 5 % zu der Abflußmenge der fünf großen Zuflüsse gerechnet.

¹²⁾ In dem Aufsatz von KESSLER und MONHEIM 1966 wurden irrtümlich etwas abweichende Werte aus KESSLER, 1963, S. 166, übernommen, die eine andere Periode betreffen.

d) Der Wasserhaushalt des Titicacasees (Abb. 2 u. 3)

Die Berechnung des mittleren Wasserhaushalts für die Jahre 1957–1961 basiert auf den Einzelwerten der 60 Monate. Es wurden also zunächst 60 Monatsbilanzen berechnet und dann erst das Mittel gebildet. Dieses Verfahren erwies sich als besonders geeignet, um Fehler im Ausgangsmaterial auszumerzen und die Gesamtwerte auf ihre Stichhaltigkeit zu überprüfen. Dabei wurde festgestellt, daß die Abflußmessungen bei sehr großen, daher auch selteneren Hochwassern noch verbessert werden müßten. Alle Werte des Wasserhaushaltes sind auf Millimeter Wasserhöhe berechnet, bezogen auf die 8100 km² große Seefläche.

Die Ergebnisse der Haushaltsrechnung sind in den Tabellen 2 und 3 und in den Abbildungen 2 und 3 enthalten (S. 281).

Auf folgende Zahlen muß besonders hingewiesen werden: Mit 931 mm (= 58 %) steht der Niederschlag auf die Seefläche entgegen den bisherigen Annahmen an der Spitze der Wassereinnahmen. Der Zufluß ist daran nur mit 664 mm (= 42 %) beteiligt. Das entspricht einem Mittel von 171 m³/sec.

Bei den Verlusten konnten die Annahmen von 1956 im Prinzip bestätigt werden. Das Verhältnis verschiebt sich in den behandelten Jahren sogar noch etwas zugunsten der Verdunstung: Abfluß 2 % der Verluste (statt 5 % 1956), Verdunstung 98 %. Vergleicht man den mittleren Abfluß (8 m³/sec) mit den anderen Haushaltsgrößen, so zeigt sich deutlich, daß er für den Gesamthaushalt eine völlig untergeordnete Rolle spielt.

Als wichtigstes Ergebnis ist die Bestimmung der Jahresverdunstung von 1480 mm anzusehen. Wie oben schon betont wurde, konnte die Verdunstung von der Seeoberfläche bisher nur geschätzt werden. Dabei stimmt die Schätzung von 1956 (1500 mm) vorzüglich mit der heutigen Berechnung überein.

Der Umstand, daß die Jahresverdunstungswerte von 1957 bis 1961 nur zwischen 1440 mm und 1547 mm (also nur um 107 mm) schwanken, kann als Maß für die Güte dieser Werte angesehen werden. Aus theoretischen Überlegungen ist für die Verdunstung ja ein geringerer Schwankungskoeffizient zu fordern als beim Zufluß und beim Niederschlag. Auch dies geht aus den Zahlen deutlich hervor:

Verdunstung:

Minimum 1440 mm, Maximum 1547 mm,
Differenz 107 = 7 % von 1480;

Niederschlag:

Minimum 767 mm, Maximum 1173 mm,
Differenz 406 = 43 % von 931;

Zufluß:

Minimum 323 mm, Maximum 884 mm,
Differenz 561 = 85 % von 664.

Es wurde schon erwähnt, daß die Wasserhaushaltsberechnung auch eine Möglichkeit zur Überprüfung der Niederschlagsangaben bietet. Ein Fehler in den

Niederschlagswerten würde ja automatisch über die Gleichung mit in den Verdunstungswert eingehen. Deshalb lag es nahe, die Verdunstung einmal in den Monaten zu berechnen, in denen kein Niederschlag auf die Seefläche fiel, so daß also diese mögliche Fehlerquelle ausgeschaltet ist. Dafür kamen die Monate Juli 1957, Juni 1958, Juni und Juli 1961 in Frage. Da in diesen Wintermonaten auch der Zufluß sehr gering ist und der Abfluß durch den Desaguadero kaum eine Rolle spielt, reduziert sich die Verdunstungsbestimmung im wesentlichen auf die sehr genau durchführbare Bestimmung der Seespiegeländerung. Damit sind alle Fehlerquellen weitgehend ausgeschaltet. Das Mittel aus diesen 4 Monaten beträgt 135 mm. Dieser Wert unterscheidet sich praktisch nicht vom Mittel (137 mm) aus den 10 Werten der Monate Juni und Juli der Jahre 1957–1961.

Der Wert von 135 mm kann demnach als gut fundierter Standardwert für die Verdunstung in den Monaten Juni und Juli betrachtet werden. Er ist etwas größer als das allgemeine Monatsmittel von 1480: $12 = 123$ mm. Das entspricht durchaus den theoretischen Erwartungen, da die Verdunstung in der winterlichen Trockenzeit trotz der geringeren Temperaturen wegen des größeren Sättigungsdefizits größer sein

muß als in der Regenzeit. Diese Überlegung zeigt, daß auch der Jahresdurchschnittswert von 1480 mm keinen großen Fehler aufweisen kann.

Die Verdunstung war in der vorstehenden Wasserhaushaltsberechnung die einzige Unbekannte. Die beiden schon genannten Tatsachen: 1. die Errechnung eines relativ geringen Schwankungsbetrages der Verdunstung von Jahr zu Jahr und 2. die Relation des recht sicher bestimmbareren Verdunstungswertes der Trockenmonate zum Jahresmittel der Verdunstung deuten darauf hin, daß auch die anderen Werte der Gleichung mit großer Wahrscheinlichkeit wenigstens größenordnungsmäßig richtig sind. Da andererseits kein Grund vorliegt, an der Größenordnung der Zuflußmessungen zu zweifeln, wird durch die Wasserhaushaltsrechnung der unerwartet hohe Niederschlag auf dem See bestätigt.

Bisher wurden nur die Jahresmittel der einzelnen Haushaltskomponenten betrachtet. Als Ergänzung soll noch eine Analyse des Jahresganges an Hand der Monatsmittel durchgeführt werden (vgl. Abb. 2 und Tab. 3).

Die Extremwerte des Niederschlages liegen um 6 Monate auseinander (Maximum im Januar mit 181 mm und Minimum im Juli mit 2 mm). Der Nie-

Tabelle 2: Der Wasserhaushalt des Titicacasees 1957–1961 (Jahreswerte in mm)

	Z	N	A	Z + N — A	S	V
1957	323	767	32	1058	— 394	1452
1958	647	827	32	1442	— 64	1506
1959	665	966	20	1611	+ 64	1547
1960	884	1173	33	2024	+ 584	1440
1961	800	921	38	1683	+ 229	1454
1957–1961	664	931	31	1564	+ 84	1480
	= 171 m ³ /sec		= 8 m ³ /sec			

Tabelle 3: Der Wasserhaushalt des Titicacasees (Monatsmittel 1957–1961 in mm)

	Z (Zufluß)	N (Niederschlag)	A (Abfluß)	Z + N — A	S (Seespiegel- änderung)	V (Verdunstung)
Januar	116	181	2	295	+ 199	96
Februar	151	157	3	305	+ 251	54
März	153	116	4	265	+ 128	137
April	75	81	4	152	+ 6	146
Mai	36	43	4	75	— 56	131
Juni	20	9	3	26	— 118	144
Juli	14	2	3	13	— 117	130
August	11	15	2	24	— 116	140
September	10	57	2	65	— 53	118
Oktober	11	52	2	61	— 68	129
November	16	86	1	101	— 39	140
Dezember	51	132	1	182	+ 67	115
Summe	664	931	31	1564	+ 84	1480
	= 171 m ³ /sec		= 8 m ³ /sec			

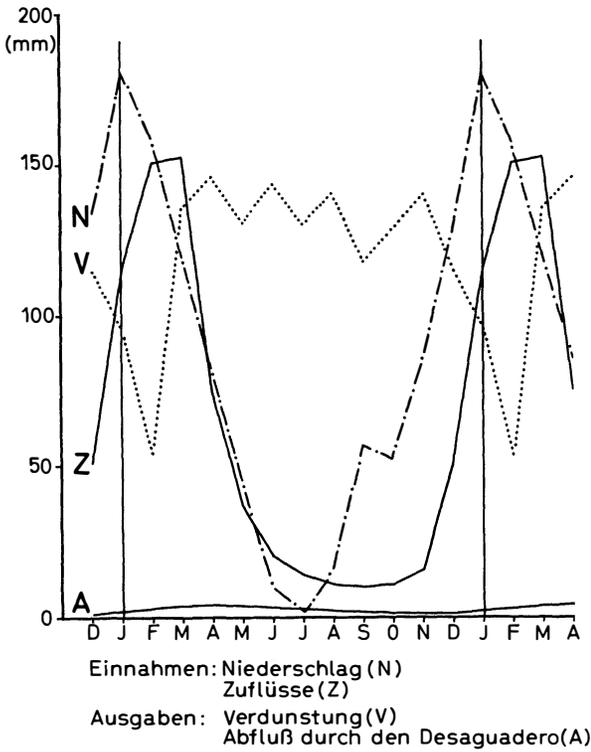


Abb. 2: Wasserhaushalt des Titicacasees (Mittel 1957-1961)

erschlag weist die höchste Jahresamplitude aller Haushaltsglieder auf (179 mm). Es folgt der Zufluß mit einer Schwankung von 143 mm. Maximum und Minimum des Zuflusses verschieben sich gegenüber den Niederschlagsextremen um 2 Monate. Die Verdunstung hat eine noch geringere Amplitude (92 mm). Im großen Ganzen ist der Verdunstungsgang entgegengesetzt zum Niederschlagsgang, indem die kühlere Trockenzeit die größeren Verdunstungswerte zeigt. Der Einfluß des Sättigungsdefizits auf den Verdunstungsvorgang wird hierbei deutlich unterstrichen. Die Niederschlagsmonate mit großer relativer Feuchte und hohem Bewölkungsgrad haben kleinere Verdunstungsbeträge. Es wird durch künftige Untersuchungen zu prüfen sein, ob weitere Merkmale der Verdunstungskurve – etwa die relativ großen Werte in den Übergangsjahreszeiten März/April und Oktober/November – real sind und welche meteorologischen Vorgänge eventuell dafür verantwortlich zu machen wären. Es ist anzunehmen, daß die Jahreskurve des Sättigungsdefizits mehrere Extremstellen besitzt wegen des entgegengesetzten Einflusses der Temperaturkurve und der Kurve der relativen Feuchte auf die Größe des Sättigungsdefizits. Untersuchungen über den Einfluß der Windgeschwindigkeit und des Strahlungshaushaltes müßten sich anschließen.

Der Abfluß des Desaguadero schwankt nur um 3 mm. Mit einem Monatsmittel von $31 : 12 = 2,6$ mm spielt er für die Wasserhaushaltskalkulation praktisch

keine Rolle. Im übrigen liegt dieser Betrag noch innerhalb der Fehlergrenze, mit der die anderen Haushaltsglieder bestimmt werden können.

In Abb. 3 wurde der Gang der einzelnen Haushaltsglieder als Summenkurve dargestellt (z. B. V_J , $V_J + V_F$, $V_J + V_F + V_M$ usw.). Besonders instruktiv ist der Verlauf der Summenkurve der Verdunstung. Er ist fast linear und unterscheidet sich dadurch wesentlich von allen anderen Haushaltsgliedern mit Ausnahme von der Summenkurve des Abflusses. Die Kurven spiegeln plastisch das Wesen der physikalischen Vorgänge wider, auf denen der Gang der Haushaltsgrößen beruht. Die Verdunstung von einer Seefläche ist ähnlich wie der Abfluß ein im allgemeinen stetiger Vorgang. Darin hebt sie sich grundsätzlich vom Vorgang etwa der Niederschlagsbildung ab. Dies muß sich natürlich auch im Jahresgang der Haushaltsglieder bemerkbar machen, vor allem in dem hier vorliegenden Klimabereich. Ein Vergleich zwischen den Summenkurven des Niederschlages und des Zuflusses läßt eine weitere typische Eigenschaft des Wasserhaushalts des Titicacasees deutlich hervortreten. Während die Niederschlagskurve des Sees (in gleicher Weise wie diejenige für das Einzugsgebiet der Flüsse) vom August zum September stark ansteigt, bleibt der Zufluß zunächst gering, da nach der langen Trockenzeit das Wasseraufnahmevermögen des Bodens im Einzugsbereich besonders groß ist und die Abflußspende dadurch anfangs klein gehalten wird. Erst vom November zum Dezember, nachdem die Rücklagebildung schon weiter fortgeschritten ist, beginnt der Zufluß zum See stärker zu wachsen.

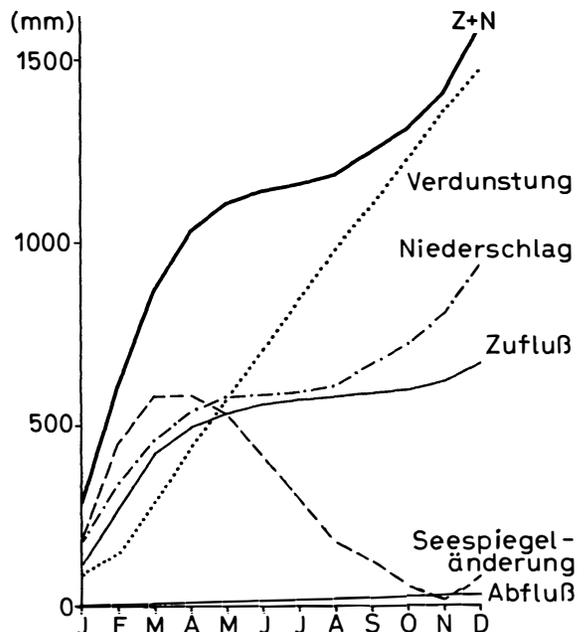


Abb. 3: Summenkurven der Wasserhaushaltsglieder des Titicacasees (Mittel 1957-1961)

e) Zum Wasserhaushalt des Titicacabeckens

Wie wir eben sahen, tritt im Unterschied zur Wasserhaushaltsberechnung des Sees bei der Behandlung des Einzugsgebietes das Problem auf, Rücklage und Verbrauch während des Wasserhaushaltsjahres genauer abzuschätzen. Dafür ist eine angemessene Beobachtungszeit notwendig, die bisher noch nicht vorliegt. Um trotzdem einen Vergleich mit der Arbeit von 1956 durchführen zu können, werden hier wenigstens die Jahresmittel 1957–1961 für den Wasserhaushalt eines Teiles des Titicacabeckens mitgeteilt. Man muß sich indessen über den vorläufigen Charakter dieser Zahlen im Klaren sein, da 5 Jahre einen zu kurzen Zeitraum darstellen, zumal das Vorjahr 1956 ein katastrophales Trockenjahr im Titicacabecken war (vgl. Tab. 4).

Die Abflußkoeffizienten und die Verdunstungswerte weisen verhältnismäßig große örtliche Schwankungen auf, die wahrscheinlich nicht ganz den natürlichen Gegebenheiten entsprechen. Das gilt besonders für den ungewöhnlich kleinen Abflußkoeffizienten und damit auch den großen Verdunstungswert für das Einzugsgebiet des Suhez. Beide dürften wohl dadurch bedingt sein, daß die bolivianischen Abflußmessungen zu Beginn der Beobachtungen zunächst zu geringe Werte ergaben¹³⁾. Man sollte deshalb weniger die Einzelwerte berücksichtigen, sondern nur den Wert für das gesamte Abflußgebiet der fünf wichtigsten Zuflüsse. Dieser stimmt mit einem mittleren Abflußkoeffizienten von 0,21 sehr gut mit der Berechnung MONHEIMS von 1956 ($S. 89 : A/N = 0,23$) überein. Es ist weiterhin hervorzuheben, daß die Landesverdunstung im Titicacabecken mit 575 mm nur

¹³⁾ So beträgt z. B. der mittlere Abfluß des Suhez für das nicht übermäßig feuchte Abflußjahr 1964–65 (Okt. 1964–September 1965) $19,7 \text{ m}^3/\text{sec}$, während als Mittel für die bereits etwas zu feuchte Periode 1957–1961 nur $9 \text{ m}^3/\text{sec}$ angegeben wurden!

gut ein Drittel der Seeverdunstung (1480 mm) ausmacht.

Die hier vorgetragenen Ergebnisse konnten nur erzielt werden dank der großzügigen Bereitstellung des Beobachtungsmaterials durch die peruanischen und bolivianischen Dienststellen. Dafür sei an dieser Stelle nochmals besonders gedankt. Gleichzeitig sei aber auch die Anregung ausgesprochen, das meteorologische Beobachtungsnetz noch weiter auszubauen und auch die Abflußmessungen noch über eine längere Zeit auszuweiten. Besonders wichtig scheint dabei die Bestimmung des Abflusses bei Hochwasser, die bisher vielleicht noch nicht die nötige Genauigkeit erreicht hat. Auf diese Weise wird es möglich sein, wirklich zuverlässige Grundlagen für die geplante Nutzung des Wassers des Titicacabeckens zur Bewässerung im Becken selbst, zur Wasserkraftnutzung und zur Bewässerung an der Küste zu gewinnen.

Zitierte Literatur

- H. FLOHN und K. FRAEDRICH: Tagesperiodische Zirkulation und Niederschlagsverteilung am Victoria-See (Ostafrika). Meteorol. Rundschau 19. Jhg. 1966, Heft 6, S. 157–165.
- V. GUERRINI: Resultados de dos años de radiosondeo en el Altiplano Boliviano. La Paz, o. J. (Umdruck, 1965 oder 1966).
- A. KESSLER: Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien, Peru) während des Hochstandes der letzten Vereisung. Erdkunde Bd. 17, 1963, S. 165–173.
- A. KESSLER: Junge Laufänderungen des Desaguadero und die Entstehung des Uru-Uru-Sees (Bolivianischer Altiplano). Erdkunde Bd. 20, 1966, S. 194–204.
- A. KESSLER und F. MONHEIM: El balance hidrológico del Lago Titicaca. Una contribución al aprovechamiento de sus aguas. Unión Geográfica Internacional, Conferencia Regional Latinoamericana, Mexico 1966, Bd. III, S. 412–422.
- F. MONHEIM: Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 1, 1956.

Tabelle 4: Der Wasserhaushalt eines Teils des Titicacabeckens (Mittel der Jahre 1957–1961 in mm)

	Einzugsgebiet des Pegels in km ²	Abfluß (A)	Niederschlag (N)	Abfluß- koeffizient (A/N)	Verdunstung (V = N — A)
Suhez	3 100	94	870	0,11	776
Huancané	3 630	143	790	0,18	647
Ramis	15 370	169	770	0,22	601
Coata	4 580	205	665	0,31	460
Ilave	7 200	107	540	0,20	433
Gesamtes Abflußgebiet der 5 Flüsse	33 880	151	726	0,21	575