KONRAD CEHAK UND ALBRECHT KESSLER

Varianzspektrumanalyse der Seespiegelschwankungen
des Titicaca-Sees (Südamerika)

Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Bundesrepublik Deutschland, und
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien, Österreich

Varianzspektrumanalyse der Seespiegelschwankungen des Titicaca-Sees (Südamerika)

Konrad Cehak und Albrecht Kessler

Mit 2 Abbildungen

Eingegangen am 12. November 1975

Zusammenfassung

Wegen der Bedeutung der Spiegelschwankungen des Titicaca-Sees für die Wirtschaft des umgebenden Landes und als Indikator für das großräumige Niederschlagsregime wurden diese Schwankungen mittels einer Varianzspektrumanalyse untersucht. Die Reihe der monatlichen Pegelwerte ergab nur Spitzen in den Spektren bei sehr langen Wellen mit Perioden von wenigstens 35 Jahren. Eine Jahresschwankung existiert ebenfalls, jedoch ist keine der bekannten Sonnenfleckwellen oder die 26monatige Periode in den Spektren zu finden, was mit den Ergebnissen anderer Autoren aus anderen tropischen Gebieten übereinstimmt. Daher erscheint es nicht möglich, Vorhersagen der Spiegelschwankungen auf Grund der Rhythmen in der Zeitreihe der Pegelwerte zu machen.

Summary

A Variance-Spectrum Analysis of the Level Height Variations of Lake Titicaca (South America)

On account of the importance of the level height variations of Lake Titicaca for the economy of the surrounding country and as an indicator of the large scale precipitation regime these variations were investigated by means of a variancespectrum analysis. The series of monthly gauge readings showed only peaks in the spectra at very long waves with periods of at least 35 years. An annual variation is present, too, however, none of the well-known sun-spot periods or the 26 month period could be detected in the spectra, which is in agreement to the findings of other authors in other tropical regions. So it seems not to be possible to make forecasts of the lake level variations using the rhythms in the time-series of gauge values.

Résumé

Variance-spectrum-análisis de las variaciones de nivel de las aguas del Lago Titicaca (América del Sur)

El desarrollo de los métodos de pronosticar las variaciones del nivel del Lago Titicaca debería de ser de gran importancia para la economía de la región cercana. Además dichas variaciones del nivel del lago son un indicador seguro para el régimen de precipitaciones

sobre grandes áreas. Es por esta razón que las variaciones de nivel del Lago Titicaca fueron sometidas a un variance-spectrum-análisis. La serie de los valores mensuales de nivel del agua únicamente mostró puntas en los espectros durante períodos muy largos, es decir de 35 años por lo menos. También sucede una variación anual, pero no se encuentra en los espectros alguna de las conocidas curvas de manchas solares, ni el período de 26 meses. Estas observaciones coinciden con los resultados obtenidos por otros autores en otras zonas tropicales. Por eso no parece posible pronosticar variaciones de nivel del agua a base de los ritmos en la serie temporal de los niveles del agua.

1. Einleitung

Der Titicaca-See liegt in 16° südlicher Breite in 3803 m Höhe (Nullspiegel von Puno) auf dem peruanisch-bolivianischen Altiplano. Er nimmt eine Fläche von ca. 8100 km² ein und hat 5 große Zuflüsse und einen bescheidenen Abfluß. Im Laufe der sommerlichen Regenzeit, die von November bis April reicht, steigt der Seespiegel um ca. 70 cm an, um in der Trockenzeit kontinuierlich mit meist sehr regelmäßigen Raten wieder abzufallen. Der Jahresperiodik sind langjährige Schwankungen überlagert, die im Zeitraum der regelmäßigen Beobachtungen eine Amplitude von ungefähr 5 m besaßen. (Maximum 3804,22 im März 1933, Minimum 3799,29 im November 1943.)

Wie Untersuchungen [5] über die einzelnen Glieder der Wasserbilanz des Sees ergeben haben, sind auch die langjährigen Schwankungen im wesentlichen auf Niederschlagsschwankungen zurückzuführen. Eine Analyse der Pegeländerungen kann daher auch einen guten Einblick in die Schwankungen des Gebietsniederschlages über dem See und in seinem Einzugsgebiet vermitteln. Eine Störung des engen Zusammenhangs zwischen Wasserhaushalt und Pegel kommt allerdings unter anderem durch den jahreszeitlich in Richtung und Stärke wechselnden Windschub zustande [3]. Dieser Störmechanismus hat eine Jahresperiode, da der Titicacasee in der Regenzeit in einer östlichen, in der Trockenzeit in einer westlichen Grundströmung liegt [4]; außerdem ist er von der örtlichen Witterung abhängig. Er konnte für die vorliegende Untersuchung aus der Beobachtungsreihe nicht eliminiert werden, da weitere Pegelbeobachtungen von anderen Stellen für den gesamten Untersuchungszeitraum nicht vorhanden sind. Für die langperiodischen Veränderungen dürfte der Windeinfluß von geringer Bedeutung sein.

Eine Vorhersage der langperiodischen Seespiegelschwankungen hat große Bedeutung für zahlreiche Wirtschaftszweige. Als Posnansky vor 40 Jahren einen Zusammenhang zwischen Sonnenfleckenzahlen und Seeständen gefunden zu haben glaubte, hoffte man, daß sich daraus Prognoseregeln entwickeln lassen könnten. Wie Abb. 1 zeigt, traten jedoch bald Störungen der mutmaßlichen Koppelung auf. Da ein direkter Zusammenhang zwischen Sonnenfleckentätigkeit und Niederschlag über dem Seegebiet ohnehin nur schwer zu erklären wäre, wurde in [4] zunächst einmal der Versuch gemacht, die

Pegel- und Niederschlagsschwankungen mit Veränderungen der allgemeinen Zirkulation in Zusammenhang zu bringen. Dabei ließ sich eine Beziehung zwischen der Zonalkomponente des Windes in 500 mb und den Seespiegelschwankungen feststellen, die Möglichkeiten für eine mittelfristige Pegelvor-

Abb. 1. Jahresmaxima der Pegelstände des Titicaca-Sees (Ausgezogen: Beobachtungswerte, Strichliert: gefilterte Reihe). Jahresmittel der Sonnenfleckenzahlen (unten)

hersage eröffnete. Einer Ausweitung dieser Untersuchung auf das Problem der langfristigen Seespiegelschwankungen stand die Kürze der Beobachtungsreihen der Höhenwindmessungen entgegen.

Bei den bisherigen Bemühungen waren folgende Fragen unbeantwortet geblieben: a) Welche Bedeutung ist überhaupt der Sonnenfleckensperiode als Prognosemittel beizumessen? b) Gibt es andere Perioden, die in diesem Zusammenhang eventuell wichtiger sind als die quasi 11jährige Periode? c) Läßt sich die 26-Monatsschwingung in den Pegelschwankungen finden? Eine Antwort auf diese Fragen wird im folgenden mit der Varianzspektrumanalyse gesucht.

2. Die Varianzspektrumanalyse für den Zeitraum 1914–1974

Die Varianzspektrumanalyse wurde auf die Pegelbeobachtungen am Pegel Puno jeweils am Ende eines Monats angewendet (Tabelle 1). Dadurch war bereits eine erste Filterung des Materials vorgenommen worden. Da für etwa 20 Jahre Pegelbeobachtungen von jedem zweiten Tag vorlagen, konnte ge-

prüft werden, wie groß die Abweichungen dieser Beobachtungen von der Verbindungslinie zwischen P_t und P_{t+1} waren (P_t Pegelstand am Ende des Monats). Im allgemeinen liegen die Abweichungen x im Bereich $0 \leq x \leq 2$ cm. In der Regenzeit können Maximalwerte von x mit ca. 7 cm auftreten.

Tabelle 1. *Hohe des Seespiegels des Titicaca-Sees am Ende jeden Monats (1955–1974).*
Einheiten: 3799,00 + „ . . m

	Jan.	Feb.	Marz	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
1955	3.63	3.95	4.33	4.33	4.25	4.13	4.01	3.89	3.85	3.77	3.65	3.75
1956	4.00	4.19	4.08	3.95	3.80	3.66	3.52	3.42	3.33	3.21	3.11	3.09
1957	3.16	3.35	3.32	3.32	3.24	3.14	3.01	2.88	2.78	2.71	2.65	2.70
1958	2.93	3.19	3.36	3.29	3.21	3.10	2.99	2.88	2.79	2.73	2.68	2.64
1959	2.63	2.78	3.12	3.20	3.15	3.04	2.92	2.81	2.71	2.63	2.54	2.70
1960	3.35	3.73	3.73	3.74	3.65	3.52	3.39	3.28	3.34	3.29	3.33	3.29
1961	3.38	3.65	3.79	3.81	3.84	3.70	3.59	3.47	3.44	3.35	3.33	3.51
1962	3.85	4.15	4.52	4.52	4.44	4.31	4.11	3.97	3.90	3.83	3.77	3.95
1963	4.23	4.78	5.15	5.19	5.09	4.92	4.77	4.69	4.65	4.59	4.47	4.53
1964	4.52	4.59	4.81	4.86	4.71	4.54	4.41	4.28	4.21	4.10	4.01	4.00
1965	4.03	4.35	4.43	4.41	4.35	4.17	4.00	3.92	3.83	3.73	3.65	3.76
1966	3.79	3.90	3.98	3.87	3.81	3.67	3.54	3.42	3.30	3.24	3.17	3.17
1967	3.12	3.21	3.50	3.42	3.28	3.14	3.03	2.95	2.93	2.86	2.75	2.81
1968	2.88	3.26	3.49	3.46	3.36	3.28	3.15	3.07	2.96	2.89	2.93	2.86
1969	3.20	3.32	3.39	3.36	3.12	2.96	2.88	2.77	2.68	2.58	2.49	2.44
1970	2.53	2.81	3.04	3.10	3.00	2.86	2.77	2.65	2.59	2.49	2.37	2.39
1971	2.58	3.15	3.35	3.27	3.14	3.02	2.89	2.79	2.66	2.56	2.50	2.51
1972	2.83	3.00	3.15	3.16	3.06	2.93	2.81	2.69	2.65	2.54	2.47	2.54
1973	2.87	3.16	3.47	3.54	3.47	3.34	3.26	3.16	3.11	3.08	3.00	2.93
1974	3.33	4.09										

* Die Daten von 1914 bis 1954 sind in World Weather Records 1941–1950 S. 1335 veröffentlicht. Washington, D. C., 1959

Nach der Rechenmethode von Tukey [1] wurden die 12 Monatsreihen (Januar 1915, Januar 1916 . . . ; Februar 1915, Februar 1916 . . . usw.) untersucht und zunächst die Autokorrelationsfunktion bis zu einer maximalen Zeitverschiebung von 25 Jahren berechnet und aus ihnen durch Fouriertransformation die Varianzspektren. Diese Wahl der Rechnungsannahmen gewährleistet eine Frequenzauflösung von 0,04 Zykeln pro Jahr und ergibt eine äquivalente Zahl von 4 Freiheitsgraden. Dann wurde nach demselben Verfahren auch die vom Jahresgang befreite Reihe der fortlaufenden Monatswerte (Oktober 1914, November 1914, Dezember 1914, Januar 1915 . . . usw.) der Spektrumanalyse unterworfen. In diesem Fall wurde als maximale Zeitverschiebung 50 Monate gewählt. Man erhält dann eine Auflösung von 0,02 Zyklen pro Monat und eine äquivalente Zahl von 28 Freiheitsgraden.

2.1 Die 12 Reihen der Einzelmonate

Betrachtet man die Verhältnisse des zweiten, dritten, . . . Autokorrelationskoeffizienten zur zweiten, dritten, . . . Potenz des ersten Autokorrelationskoeffizienten, so kann man feststellen, daß diese klein genug sind, daß man die Annahme treffen kann, das dem realen Prozeß zugrundeliegende Spektrum

Abb. 2. Autokorrelationsfunktion und Varianzspektrum für Dezember

sei das eines Markow-Prozesses. Diesem Hintergrundlärm überlagert sich jedoch in allen Monatsspektren eine signifikante Schwankung von 10 bis 50 Jahren Wellenlänge, wobei die Hauptspitze bei einer Wellenlänge von 50 Jahren liegt. Die oben angeführte Auflösungsfähigkeit des Rechensystems von 0,04 Zyklen pro Jahr läßt allerdings daraus nur die Aussage ableiten, daß diese Spitze in der Größenordnung von wenigstens 35 Jahren liegt. Eine genauere Festlegung kann man bei so kurzem Material auch nicht erwarten. Die Betrachtung der Reihen (Tabelle 1) selbst zeigt in allen Monaten Extreme in folgenden Jahren: Maxima 1923, 1963, Minima 1943. Dies deutet auf eine 40jährige Welle hin. Allerdings finden sich auch bedeutende Maxima 1933 und 1955, so daß diese Periodenfestlegung nicht sehr sicher ist. Kleinere Schwankungen im Spektrum bei kürzeren Rhythmendauern sind statistisch nicht signifikant, insbesondere tritt eine 11jährige Periode nicht besonders hervor. Die von Steinhauser [10, 11] in den Seespiegelschwankungen des Viktoria-Sees gefundene Schwankung von 6 Jahren Dauer tritt beim Titicaca-See nicht in Erscheinung.

Die Spektren (ein Beispiel in Abb. 2) der einzelnen Monate sind praktisch gleich, nur geringfügige Unterschiede können gefunden werden. Die Größe der ersten Autokorrelationskoeffizienten variiert von 0,91 im Februar bis 0,93 im Januar und Dezember. Die interannuelle Bindung ist demnach in allen Monaten sehr hoch. Der See mit seiner gewaltigen Wassermasse wirkt rascheren atmosphärischen Veränderungen ausgleichend entgegen. Daher fehlen im Spektrum auch die Spitzen bei kürzeren Periodenlängen.

2.2 Die Reihe der fortlaufenden Monatswerte

Für die Berechnung des Spektrums aus allen Monatswerten wurden diese zuerst vom Jahresgang befreit, indem standardisierte Werte gebildet wurde, d. h. jeder einzelne Monatswert wurde durch seine Abweichung vom 60-jährigen Mittel, dividiert durch die Streuung, ersetzt. Das so erhaltene Spektrum ist kein Spektrum eines Markow-Prozesses, es weist aber auch die langen Zyklen auf mit einer Periodenlänge von wenigsten 50 Monaten.

Sonnenfleckenperioden, die auch in Periodenlängen von nahe einem Jahr gefunden worden waren [9], treten in den Seespiegelwerten nicht auf. Die Reihe der Autokorrelationskoeffizienten fällt nur sehr langsam ab. Es besteht daher nicht nur eine starke interannuelle Bindung, sondern entsprechend der oben erwähnten Trägheit der Seemasse noch mehr eine solche zwischen den einzelnen Monaten. Besonders ist zu vermerken, daß die auch vielfach in klimatologischen Bodenbeobachtungen vorhandene 26monatige Periode [6] in diesem Spektrum nicht gefunden werden konnte.

2.3 Filterung der Beobachtungsreihe

Entsprechend dem Ergebnis der Spektrumanalyse wurde ein Tiefpaßfilter konstruiert, der die in den Beobachtungsreihen enthaltenen langperiodischen Wellen hervortreten lassen, die kurzperiodischen Wellen dagegen unterdrücken sollte. Dies wurde mit einem Binomialfilter mit folgenden Gewichten erreicht:

$$0,02 \quad 0,05 \quad 0,12 \quad 0,20 \quad 0,22 \quad 0,20 \quad 0,12 \quad 0,05 \quad 0,02$$

Es hat die in Tabelle 2 angeführte Frequenzcharakteristik $R(f)$ und ergibt keine Verschiebung von Phasen und Wellenvorgängen.

Tabelle 2. Frequenzcharakteristik des verwendeten Tiefpaßfilters, $R(f)$

Periode (Jahre)	∞	50	30	20	10	5	2
Frequenz (Jahr ⁻¹)	0	0,02	0,03	0,05	0,10	0,20	0,50
$R(f)$	1	0,98	0,94	0,86	0,55	0,08	0

Die gefilterte Reihe wurde ebenfalls in Abb. 1 eingezeichnet. Die im Abschnitt 2 angeführte 40-jährige Periode mit den aufgesetzten Nebenmaxima

kommt deutlich zur Geltung. Um diese langperiodischen Veränderungen des Seespiegels traten kurzperiodische Zufallsschwankungen auf, die in der Spektrumanalyse nicht angezeigt wurden.

3. Vergleich mit anderen Untersuchungen

Bei Untersuchungen [8] der täglichen Abflußmessungen von 57 Jahren aus der Panamaregion (9°N) mit der Spektralanalyse konnte ebenfalls weder die 26-monatige Periode noch die 11-jährige Periode der Sonnenflecken gefunden werden. In der Umgebung der einjährigen Periode wies das Spektrum allerdings Zacken auf. Eine ähnliche Untersuchung [7] der Niederschlagsreihe von Fortaleza im nordostbrasilianischen Trockengebiet (4°S) der Monate Januar 1849 bis August 1971 ergab im Spektrum weder bei 26 Monaten noch bei 11 Jahren markante Spitzen, dafür aber bei 13 und 26 Jahren signifikante Perioden.

Ein Vergleich mit einer ähnlichen Untersuchung in der gemäßigten Zone an einem im Verhältnis zum Titicaca-See sehr kleinen Alpensee [2] zeigt, daß dort die ersten Autokorrelationskoeffizienten sehr viel kleiner sind (maximal 0,37 für Monatsmittelwerte, maximal 0,57 für monatliche Minima, bzw. dem Betrag nach maximal 0,22 für monatliche Maxima), da die kleinere Wassermasse nicht als so extremer Tiefpaßfilter wirkt wie der große Titicaca-See. Dementsprechend finden sich auch Perioden mittlerer Länge gut ausgeprägt.

Abschließend kann man zum Ergebnis der vorliegenden Spektralanalyse feststellen, daß die bei ≈ 30 Jahren liegende Periode wegen der Kürze der Reihe zu weiteren Überlegungen noch nicht herangezogen werden kann und daß die anderen gefundenen Perioden zu wenig markant sind, als daß sie erfolgversprechend für die Prognose der Pegelbewegungen des Titicaca-Sees herangezogen werden könnten.

Herrn Ing. Duthurburu, Southern Railway of Peru, sei für die Überlassung von Pegel-daten bestens gedankt.

Literatur

1. Blackman, R. B., and J. W. Tukey: Measurement of Power Spectra. New York, 1958.
2. Cehak, K.: Spiegelschwankungen eines Alpensees in den letzten 50 Jahren. Wetter und Leben 27, 71–76 (1975).
3. Kessler, A.: Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca-Becken. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 18, 239–252 (1970).
4. Kessler, A.: Atmosphärische Zirkulationsanomalien und Spiegelschwankungen des Titicaca-Sees. Bonner Meteor. Abhandl., Heft 17, 361–372 (1974).

5. Kessler, A., und F. Monheim: Der Wasserhaushalt des Titicaca-Sees nach neueren Meßergebnissen. *Erdkunde, Arch. Wiss. Geographie* 22, 275–283 (1968).
6. Landsberg, H. E., J. M. Mitchell, H. L. Crutcher, and F. T. Quinlan: Surface Signs of the Biennial Atmospheric Pulse. *Mo. Weather Rev.* 91, 549–556 (1963).
7. Markham, C. G.: Apparent Periodicities in Rainfall at Fortaleza, Ceara, Brasil. *Journ. Applied Meteorology* 13, 176–179 (1974).
8. Reed, J. W.: Low Frequency Periodicities in Panama Rainfall Runoff. *Am. Met. Soc., WMO Proceed. of the Symposium on Tropical Meteor.* 1970, Honolulu (1970).
9. Schonwiese, C. D.: Spektrale Varianzanalyse klimatologischer Reihen im langperiodischen Bereich. *Univ. Munchen, Meteor. Inst., Wiss. Mitteilungen* Nr. 15 (1969).
10. Steinhauser, F.: Die Sonnenflecken und die Seespiegelschwankungen des Viktoria-Sees. *Wetter und Leben* 1, 260–262 (1948).
11. Steinhauser, F.: Ergänzung zur Mitteilung über die Sonnenflecken und die Seespiegelschwankungen des Viktoria-Sees. *Wetter und Leben* 1, 357–359 (1948).

Anschrift der Verfasser: Univ.-Prof. Dr. Albrecht Kessler, Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Werderring 10, D-7800 Freiburg im Breisgau, Bundesrepublik Deutschland. Univ.-Prof. Dr. Konrad Cehak, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien, Hohe Warte 38, A-1190 Wien, Österreich.