

**Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung
der Justus-Liebig-Universität Gießen**

**Ursachen und Auswirkungen der
Seespiegelschwankungen
des Issyk-Kul' in jüngerer Zeit**

von

Romanovskij, V.V.¹; Kuz'mičenok, V.A.¹

Nr. 22, Gießen, Mai 2005

1 Institut für Wasserprobleme und Hydroenergie der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Republik Kirgistan

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	1
2.	Die hydrologische Bilanz des Issyk-Kul'	3
3.	Aktuelle Veränderungen des Wasserhaushalts	19
4.	Zusammenhang der Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' und der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre	23
5.	Veränderung der Lufttemperatur	25
6.	Veränderung der Wassertemperatur	27
7.	Wasserverbrauch durch Bewässerung	28
8.	Der unterirdische Zufluss in den Issyk-Kul'	32
9.	Schwankungen des Grundwasserspiegels	36
10.	Die hydrologische Bilanz des Džergalan	44
11.	Verdunstungsverluste	49
12.	Räumliche und jahrezeitliche Verteilung des Niederschlags	54
13.	Zu erwartende Entwicklung des Seespiegels des Issyk-Kul'	58
14.	Auswirkungen der Seespiegelabsenkung	66
15.	Zusammenfassung	71
16.	Literaturverzeichnis	86

Abbildungen

- Abb. 1: Topographische Lage des Issyk-Kul'-Beckens, Kirgistan
- Abb. 2: Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' 1920 – 2004 (Höhe in m über BS)
- Abb. 3: Zusammenhang zwischen dem Zufluss von 16 Flüssen und dem Zufluss aller Flüsse des Beckens
- Abb. 4: Zusammenhang zwischen dem berechneten Jahresniederschlag auf dem See (nach GGI) und dem an den Stationen Balykši und Karakol gemessenen Jahresniederschlag
- Abb. 5: Zusammenhang zwischen dem Jahresniederschlag der Stationen Karakol und Bajtik, 1968-1996
- Abb. 6: Zusammenhang zwischen dem Jahresniederschlag der Stationen Karakol und Pokrovka
- Abb. 7: Berechnung der Jahresniederschläge auf der Seeoberfläche durch Polynomen verschiedener Grade
- Abb. 8: Zusammenhang zwischen Verdunstung und dem Restfehler der Wasserbilanz
- Abb. 9: Entwicklung der Wasserentnahme für Bewässerungszwecke im Issyk-Kul'-Becken 1946-2000
- Abb. 10: Zusammenhang zwischen Wasserentnahme und Bewässerungsverluste
- Abb. 11: Entwicklung von Zufluss, Niederschlag und Verdunstung von der Seeoberfläche 1935-2000
- Abb. 12: Entwicklung der Verdunstung und der Summe aus Abfluss und Niederschlag
- Abb. 13: Monatliche Verdunstung an der Station Balykši 1936-1956 und 1957-2003
- Abb. 14: Relative Luftfeuchtigkeit an der Station 1936-1957 und 1957-2003
- Abb. 15: Entwicklung der Verdunstung an den Stationen Balykši , Karakol und Krasnyj Oktjabr', 1957-1999
- Abb. 16: Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit an den Stationen Balykši , Karakol und Krasnyj Oktjabr', 1957-1999
- Abb. 17: Entwicklung des Seespiegels des Kaspischen Meeres und Häufigkeit westlicher Luftströmungen von 1891 bis 1998 (Meščerskaja et al., 2002)
- Abb. 18: Abweichung vom langjährigen durchschnittlichen Auftreten westlicher (W), meridionaler (C) und östlicher (E) Zirkulationsprozesse nach Zahl der Tage (N) (zehnjährige gleitende Mittelwerte)
- Abb. 19: Abweichung der globalen Lufttemperatur vom langjährigen Mittel im Zeitraum 1880-2000 (°F)
- Abb. 20: Entwicklung der Wassertemperatur des Issyk-Kul' im Februar 1975-2001 (Station Tamga)
- Abb. 21: Gletscher, Fichtenwälder und Bewässerungsflächen im Issyk-Kul'-Becken
- Abb. 22: Verwaltungseinheiten, meteorologische Stationen und Grundwassermessstellen
- Abb. 23: Jahresgang des Grundwasserspiegels an der Messstelle 1112
- Abb. 24: Jahresgang des Grundwasserspiegels an den Messstellen 866, 16 und 15
- Abb. 25: Jahresgang des Grundwasserspiegels an den Messstellen 119 und 1161
- Abb. 26: Jahresmittel des Grundwasserspiegels an den Messstellen 15, 866 und 16, 1962-2002

- Abb. 27: Entwicklung des Seespiegels des Issyk-Kul' und des Grundwasserspiegels an der Messstelle 15
- Abb. 28: Trend des Grundwasserspiegels an den Messstellen 16, 15 und des Seespiegels des Issyk-Kul', 1980-2002
- Abb. 29: Zusammenhang zwischen dem Seespiegel des Issyk-Kul' und dem Grundwasserstand an der Messstelle 15, 1962–2002
- Abb. 30: Zusammenhang zwischen dem Seespiegel des Issyk-Kul' und dem Grundwasserstand an der Messstelle 16, 1962–2002
- Abb. 31: Zusammenhang zwischen Seespiegels des Issyk-Kul' und dem Wasserstand an der Grundwassermessstelle 15 im Zeitraum 1983 – 2002
- Abb. 32: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 15 und 16, 1964 - 2002
- Abb. 33: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 16 und 866, 1962–2002
- Abb. 34: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 16 und 866 (1980–2002)
- Abb. 35: Grundwasserstand an der Messstelle 866 und Jahresniederschlag an der Station Čolpon-Ata
- Abb. 36: Grundwasserstand an Messstelle 866 und Jahresniederschlag an der Station Čolpon-Ata. Zeitraum 1985 – 2001, um ein Jahr gegeneinander verschoben.
- Abb. 37: Langjährige Monatsmittel des Abflusses des Džergalan für Januar, Februar und März
- Abb. 38: Trend der mittleren Monatsabflüsse des Džergalan
- Abb. 39: Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' und Massenbilanz des Abramov-Gletschers
- Abb. 40: Abweichung der Jahresniederschläge im Issyk-Kul'-Becken von der „Höhenorm“
- Abb. 41: Abweichung der Jahresniederschläge von höhenominierten Jahresniederschlägen in Kirgistan
- Abb. 42: Jahreszeitliche Niederschlagsverteilung in Kirgistan
- Abb. 43: Jahreszeitliche Niederschlagsverteilung im Issyk-Kul'-Becken
- Abb. 44: Julitemperatur der Station Prževalsk' (Karakol), 1879-2002
- Abb. 45: Trends der Monatstemperaturen der Station Čolpon-Ata, 1973-2003
- Abb. 46: Mittlere Lufttemperatur im April auf den Stationen Čolpon-Ata und Tjuja-Ašu, 1973-2003
- Abb. 47: Mittlere Lufttemperatur im Juli auf den Stationen Čol-pon-Ata und Tjuja-Ašu, 1973-2003
- Abb. 48: Monatliche Trends von Temperatur und Niederschlag an der Station Čolpon-Ata, 1973-2003.
- Abb. 49: Monatliche Trends der relativen Luftfeuchtigkeit an der Station Balykši, 1973-2003.
- Abb. 50: Monatliche Trends der Verdunstung an der Station Balykši, 1973-2003.
- Abb. 51: Mittlere Seespiegelhöhe des Issyk-Kul', tatsächlich (1927-2003) und prognostiziert (bis 2033).

Tabellen

- Tab. 1: Hydrologische Bilanz in drei Teilzonen des Issyk-Kul' im Jahr 1979
- Tab. 2: Liste der in Betrieb befindlichen Abflussmessstationen im Issyk-Kul'-Becken
- Tab. 3: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz (D), der Wasserentnahme für Bewässerung (I) und den klimatischen Charakteristika an der MS Karakol (T: Jahresmitteltemperatur, P: Jahresniederschlag, LF: relative Luftfeuchte)
- Tab. 4: Korrelation zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz (D) und einzelnen Komponenten der Bilanz (Q: Zufluss, Q_o : oberirdischer Zufluss, Q_U : unterirdischer Zufluss, B: Bewässerungsverlust, P: Niederschlagssumme, E: Verdunstung, Δh : Änderung des Seespiegels)
- Tab. 5: Korrelationskoeffizienten zwischen den Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung (Q: Zufluss, Q_o : oberirdischer Zufluss, Q_U : unterirdischer Zufluss, B: Bewässerungsverlust, P: Niederschlagssumme, E: Verdunstung, Δh : Änderung des Seespiegels)
- Tab. 6: Standardabweichung der Approximation des Fehlers der hydrologischen Bilanz (km^3) durch algebraische Potenzpolynome (N) als Funktion der Bilanzkomponenten Bewässerungsverlust (B) und Verdunstung (E)
- Tab. 7: Ursprüngliche und korrigierte (*) Werte der hydrologischen Bilanz.
- Tab. 8: Wasserbilanz des Issyk-Kul' 1979-2000
- Tab. 9: Wasserbilanz des Issyk-Kul' 1935 -1978.
- Tab. 10: Länge und Art der Bewässerungskanäle im Issyk-Kul'-Becken und die Wasserentnahme für Bewässerung in den einzelnen Rajonen (1971-1983)
- Tab. 11: Der Wasserverbrauch in den Bewässerungssystemen des Issyk-Kul'-Beckens
- Tab. 12: Infiltrationskoeffizienten
- Tab. 13: Bilanz des unterirdischen Wassers im Issyk-Kul'-Becken nach verschiedenen Autoren
- Tab. 14: Die hydrologische Bilanz des Džergalan
- Tab. 15: Verdunstung über verschiedenen Oberflächen im Issyk-Kul'-Becken
- Tab. 16: Periodizität des Seespiegels des Issyk-Kul' von 1942-2003 und Projektion für 2003-2033
- Tab. 17: Mittlere jährliche Seespiegelhöhe des Issyk-Kul', gemessen und prognostiziert
- Tab. 18: Sedimentologische Kenngrößen der unterschiedlichen Reliefformen auf der Halbinsel Kara-Bulun

Vorwort

Die vorliegende Untersuchung über die jüngeren Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' wurde von Dr. V. V. Romanovskij und Dr. V. A. Kuz'mičenok im „Institut für Wasserprobleme und Hydroenergie“ der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Republik Kirgistans in Biškek erstellt. Sie ist Teil der Arbeiten zum interdisziplinär ausgerichteten Forschungsprojekt „Wasserverknappung, Wassernutzungskonflikte und Wassermanagement in Trockengebieten Zentralasiens (Usbekistan, Kasachstan, Kirgistan, Xinjiang/VR China).

Das Ziel des Forschungsprojektes besteht darin, die Ursachen und Auswirkungen der zunehmenden Wasserverknappung und Verschlechterung der Wasserqualität in den Trockengebieten Zentralasiens zu untersuchen. Die Untersuchungen werden vergleichend in vier abflusslosen Beckenbereichen vorgenommen: Im Aralsee-Becken, Ili-Balchaš-Becken, Issyk-Kul'-Becken und Tarim-Becken.

Ausdruck der zunehmenden Wasserverknappung ist die seit den 1960er Jahren zu beobachtende Absenkung des Seespiegels fast aller zentralasiatischen Binnenseen, so des Aral- und Balchaš-Sees und auch des Issyk-Kul', dessen Seespiegel bereits seit Beginn der systematischen Messungen im Jahr 1927 mit kurzen Phasen der Unterbrechungen sinkt.

In diesem Zusammenhang sei auf die von Dr. A.N. Dikich, Glaziologe und Stellvertreter Direktor des „Instituts für Geologie“ der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften, erstellte Arbeit über die „Gletscherwasserressourcen im Issyk-Kul'-Becken“ hingewiesen, die in enger inhaltlicher Verflechtung mit der vorliegenden Arbeit steht. Sie ist als Nr. 19, August 2004, der Discussion Paper Reihe des Zentrums für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung publiziert.

Die von den beiden Autoren auf russisch vorgelegten Arbeiten wurden von Katrin Zitzmann übersetzt und nachfolgend von Dr. Wilfried Hagg, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München, fachlich überarbeitet. Beiden sei für Ihre Unterstützung herzlich gedankt.

Danken möchte ich auch der Volkswagen-Stiftung, die das auf vier Jahre angesetzte Forschungsprojekt (Mai 2001 – April 2005) im Rahmen der Förderinitiative „Mittel-Asien/Kaukasus im Focus der Wissenschaft“ unterstützt.

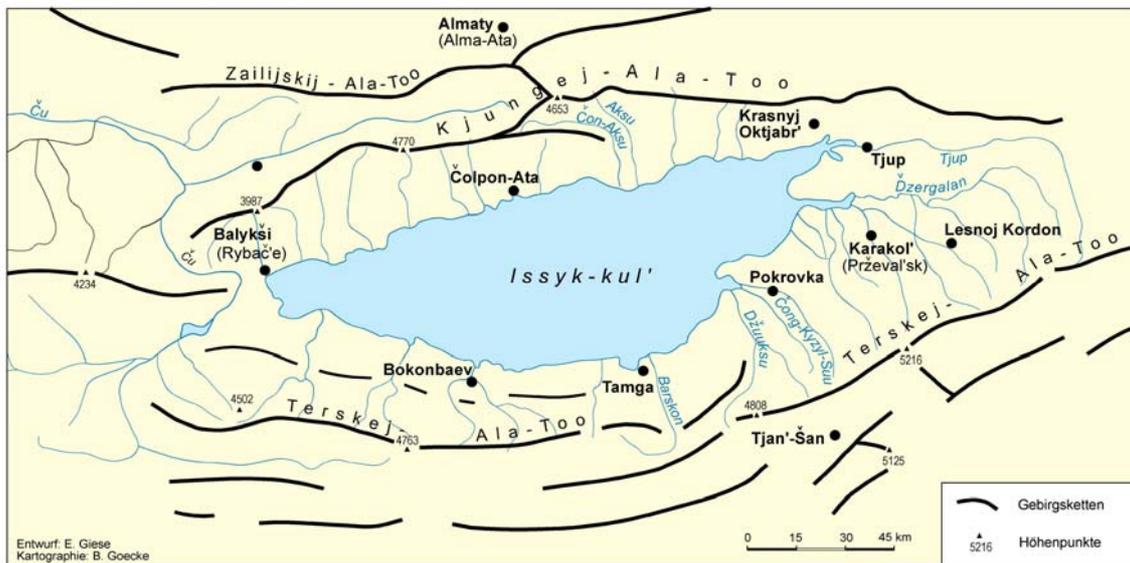
Gießen, im Mai 2005

Prof. Dr. Ernst Giese
(Projektleiter)

1. Einführung *)

Das Issyk-Kul'-Becken ist eine tektonische Depression im kirgisischen Teil des Tjan'-Šan' Gebirges, eingerahmt vom Kungej-Alatau im Norden und dem Terskej-Alatau im Süden. Das Einzugsgebiet ist 22.000 km² groß und stellt ein geschlossenes Abflusssystem mit zentraler Entwässerung in den gleichnamigen See dar. Der See liegt auf 1606 m über B.S. Er erreicht Tiefen von über 660 m und bedeckt ein Viertel des Beckens. Die Kammlagen der Gebirgsumrahmung liegen meist zwischen 4000 und 5000 m über B.S. (vgl. Abb. 1)

Abb. 1: Topographische Lage des Issyk-Kul'-Beckens, Kirgistan



Seit Beginn der systematischen Messungen im Jahr 1927 sinkt der Seespiegel des Issyk-Kul' unterbrochen von kurzen Phasen eines Anstiegs (vgl. Abb. 2). Er ist seither um rund 3 m gesunken, von 1.609,5 m auf 1.606,5 m über B.S. Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Seespiegelabsenkung sind erheblich.

Deshalb stellen sich folgende Fragen:

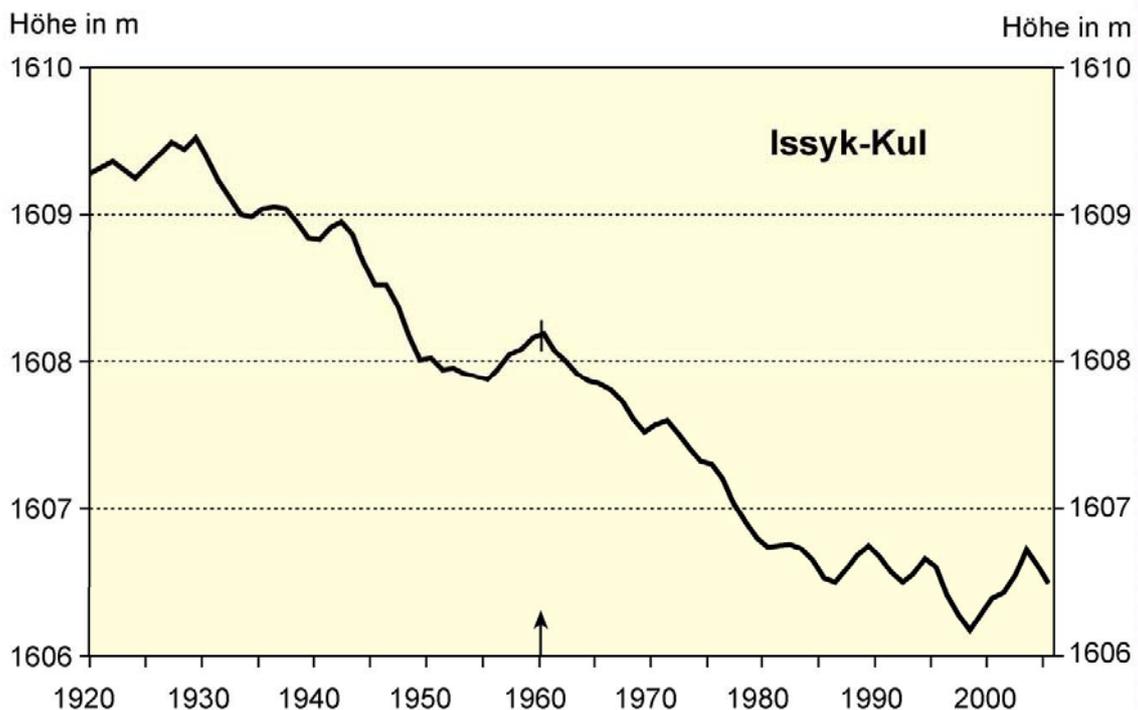
1. Welche Ursachen liegen der Seespiegelabsenkung zugrunde? – Ist sie die Folge klimatischer Veränderungen oder die Folge wirtschaftlicher Eingriffe in der Sowjetzeit (Auswirkungen der Kollektivierung verbunden mit der Selbsthaftmachung der Nomaden und Einführung der Bewässerungswirtschaft)? –

*) Ergänzung des Projektleiters

2. Mit welcher weiteren Entwicklung ist zu rechnen? – Mit dem Zusammenbruch der Sowjetunion und der damit verbundenen Verselbständigung der mittelasiatischen Republiken hat Anfang der 90er Jahre ein Transformationsprozess der Wirtschaft eingesetzt, der zu einem veränderten Wasserverbrauch u. a. infolge Reduzierung des Bewässerungsfeldbaus geführt hat.
3. Welche Auswirkungen sind mit der Seespiegelabsenkung verbunden? –

Diesen Fragen am Beispiel des Issyk-Kul' nachzugehen, ist von besonderem Interesse, da es sich beim Issyk-Kul'-Becken um ein weitgehend abgeschlossenes Becken handelt, die für hydrologische Fragen dieser Art eine Modellregion natürlichen Art par excellence darstellt.

Abb. 2: Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' 1920 – 2004 (Höhe in m über BS)



Quelle: Daten wurden freundlicherweise von Dr. V. V. Romanovskij, Biškek, zur Verfügung gestellt.

2. Die hydrologische Bilanz des Issyk-Kul'

Die Wasserhaushaltsgleichung des abflusslosen Sees besitzt folgende Form:

$$P + Q_o + Q_u - B - E \pm \Delta h = 0$$

P: Niederschlag

Q_o : oberirdischer Zufluss

Q_u : unterirdischer Zufluss

B: Verlust durch Bewässerung

E: Verdunstung

Δh : Änderung des Seespiegels

Eine Vielzahl von Autoren beschäftigte sich in der Vergangenheit mit dem Wasserhaushalt des Issyk-Kul'. So existieren ca. 20 unterschiedliche Varianten der hydrologischen Bilanz. In diesen Bilanzen variieren die Niederschlagsmengen von 230 bis 350 mm, der oberirdische Zufluss schwankt zwischen 184 und 567 mm, der unterirdische Zufluss zwischen 241 und 330 mm. Die Verdunstung der Wasseroberfläche reicht nach den Angaben der verschiedenen Autoren von 700 bis 878 mm.

Die erste Wasserhaushaltsuntersuchung erfolgte 1946 durch Z.A. Vikulina. In dieser Studie wurde der oberirdische Zufluss anhand von nur 15 Abflussmessstellen ermittelt, und es wurden konstante Niederschlagssummen über die gesamte Seeoberfläche inklusive der Uferbereiche angenommen. Die Verdunstung wurde nach der einfachen empirischen Formel nach Mejer-Tichomirov mit Daten zweier Wetterstationen berechnet. Trotz der starken Vereinfachungen ergibt diese erste Wasserbilanz eine gute Abschätzung des Verhältnisses zwischen Wasserzugewinn und -verlust.

Cigel'naja (1960) berücksichtigte in seiner Bilanz erstmals meteorologische Stationen in größerer Entfernung vom See, was zu einer enormen Absenkung der Verdunstung führte. Die Restgröße der Gleichung von 98 mm wird auf Wasserverluste durch Bewässerung (42 mm) und Industrie (56 mm) zurückgeführt.

In den Arbeiten von Šnitnikov (1980) wird die hydrologische Bilanz des Issyk-Kul' bei vorhandenem und bei fehlendem Abfluss in den Ču gezogen. Die Ergebnisse weisen große Ähnlichkeit mit jenen von Cigel'naja (1960) auf, allerdings geht der Autor nicht näher auf seine Berechnungsmethoden ein.

Der unterirdische Zufluss wurde erstmals von Kaplinskij und Timčenko (1977) als eige-

ne Komponente betrachtet. Sie berechneten den Anteil des Grundwassers am gesamten Zufluss zu 30%.

Auch Ratkovič (1977) erstellte eine Bilanz, die auf Berechnungen von Presnecovoj beruht. Diesen Forschungen liegt eine umfangreiche Datenbasis zugrunde, darunter auch meteorologische Messungen an Bord von Schiffen. Der von Ratkovič (1977) angenommene Anteil der Wasserverlustes durch Bewässerung von 2/3 an der gesamten Wasserentnahme ist jedoch deutlich zu hoch gegriffen.

Von der Vielzahl der Berechnungen ist die hydrologische Bilanz von Krivošej und Gronskaia (1986) für den Zeitraum von 1935-1978 die überzeugendste. Auf der Grundlage von langjährigen Feldbeobachtungen wurde detailliert die Bildung des Oberflächenabflusses und seiner Infiltration in der seenahen Ebene erforscht. Außerdem wurde der unterirdische Zufluss bestimmt, Bewässerungsverluste untersucht und die Verdunstung nach 4 unabhängigen Methoden bewertet. Nach dieser Bilanz erhält der See 274 mm aus Niederschlägen und 594 mm aus dem Zufluss (295 mm oberirdisch, 299 mm unterirdisch). Die Verdunstung beträgt 836 mm, 78 mm gehen durch Bewässerung verloren. Als Restfehler der hydrologischen Bilanz bleiben 4 mm (Krivošej, Gronskaia, 1986).

Zur Bestimmung der Verdunstung auf der Seeoberfläche wurde eine schwimmende Plattform mit zwei Evaporimetern, einem Regenschirm, einem Hygrometer, einem Wasserthermometer sowie einem Anemometer bestückt. Auf diesem Floß, das 100 m vom Ufer entfernt verankert wurde, führten die Mitarbeiter der Seestation „Čolpon-Ata“ über einen langjährigen Zeitraum Messungen durch. In der Regel funktionieren schwimmende Verdunstungsanlagen nicht bei hohem Wellengang, weil die Wasserbehälter der Verdunstungsmesser überschwemmt werden können. In solchen Fällen wurden Messlücken durch Berechnungen geschlossen.

Dazu diente eine anhand der Messreihe gewonnene, regional gültige empirische Formel:

$$E = 0,19 n * \Delta e_{200} (1 + 0,40 * U_{200}) \quad (\text{Romanovskij 1990})$$

Δe_{200} : Differenz zwischen partiellem Wasserdampfdruck in einer Höhe von 200 cm über der Seeoberfläche und dem Sättigungsdampfdruck für die Temperatur der Wasseroberfläche

U_{200} : mittlere Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 200 cm über der Seeoberfläche in m/s

Auf der Wasseroberfläche variiert die Höhe der Verdunstung enorm. In einer ersten

Annäherung kann man den See in die beiden Zonen „ufernah“ und „offen“ einteilen. In der ufernahen Zone mit einer Breite von 1-2 km wird der Verdunstungsprozess in deutlichem Umfang vom Uferbereich mitbestimmt: die Luft ist nur schwach mit Wasserdampf gesättigt und die Windcharakteristika ändern sich beim Übergang vom Ufer auf die Wasseroberfläche. Auf dem offenen See dagegen ist die Luftfeuchtigkeit stets im Sättigungsbereich und das Windprofil homogen. Die Verdunstung in der Uferzone übersteigt erheblich diejenige auf der offenen Wasserfläche, wo sie im Sommer bei windstillem Wetter um 20 % geringer ist als am Ufer. Nachts, wenn der Wind vom Festland zum See weht, beträgt die Breite der Uferzone 2 km. Bei auflandigen Winden tagsüber kann sich der vom Ufer beeinflusste Bereich auf 100-200 m verengen.

Berechnungen der Verdunstungsmengen, die von Novak (1988) für das Jahr 1986 durchgeführt wurden, zeigen minimale Werte (620-650 mm) im Zentrum des Sees und Maxima (930-960 mm) im westlichen Teil. Im östlichen Bereich beträgt die Höhe der jährlichen Verdunstung 780-840 mm. Einer der Faktoren, der die Verdunstung von der Seeoberfläche bestimmt, ist die Wassertemperatur. Während eines Großteils des Jahres (April-Oktober) zeigen die ufernahen Flachwasserbereiche erhöhte Temperaturen gegenüber dem offenen Wasser. Ein anderer Faktor, der für die Heterogenität der Verdunstung verantwortlich ist, ist der Anstieg der Luftfeuchtigkeit im Issyk-Kul'-Becken von Westen nach Osten.

Die räumliche Ungleichverteilung von Verdunstung, Abfluss und Niederschlag verursacht deutliche Unterschiede im Wasserhaushalt der verschiedenen Seebereiche. Dies verdeutlicht Tabelle 1 anhand des Beispieljahres 1979.

Tab. 1: Hydrologische Bilanz in drei Teilzonen des Issyk-Kul' im Jahr 1979

Kennziffern des Wasserhaushalts (mm)	Westliche Zone (571 km²)	Nördliche Zone (4725 km²)	Östliche Zone (940 km²)
Niederschlag (P)	71	208	337
Zufluss (Q)	56	160	1576
Verdunstung (E)	-939	-730	-682
Seespiegelabsenkung (Δh)	-812	-362	-1231

Die Bewässerungsfläche im Issyk-Kul'-Becken nimmt mehr als 150.000 ha ein. Das entspricht in etwa einem Viertel der Fläche des Sees entspricht. Nach Angaben des Staatlichen Hydrologischen Instituts in Sankt Petersburg (GGI) betragen die Wasserverluste durch Bewässerung durchschnittlich 12% des Abflusses bzw. 45% der Wasserentnahme. Dieser hohe Anteil ist auf die ineffektive Methode der Überflutungsbe- wässerung, die auf ungefähr 90% der Bewässerungsflächen angewandt wird, zurück-

zuführen. Bei dieser Bewässerungsmethode verdunstet ein besonders großer Anteil des Wassers und geht verloren. Außerdem kommt es zur Einspülung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln in den See. Gegenwärtig wird die Verbesserung des Wasserhaushalts im Becken durch wassersparende Bewässerungsanlagen diskutiert.

Die Bilanzgleichung von Krivošej und Gronskaja (1986), in der die Höhe der Bewässerungsverluste 78 mm/Jahr betragen, wurde in dieser Arbeit für die Berechnung des Seespiegels verwendet. Unter dem Begriff „Niveau der Tendenz“[†] verstehen wir die Höhe des Seespiegels, bei der die Höhe der Wasserverluste durch Verdunstung gleich dem Wassergewinn durch Niederschlag und Zufluss ist. Beim gegenwärtigen Anstieg des Seespiegels erhöhen sich die Verdunstungsverluste, da sich die Fläche des Sees vergrößert. Berechnungen auf Grundlage der Hypsometrie des Beckens zeigen, dass sich die Fläche des Issyk-Kul' bei der gegenwärtigen Wasserentnahme für Bewässerung um 512 km² verringern wird, was einer Absenkung des Seespiegels um 10 m entspricht. Ohne den anthropogenen Wasserverbrauch würde sich die Seefläche um 362 km² vergrößern und der Wasserspiegel würde um 9,1 m über seinem heutigen Stand liegen.

Um den Einfluss der aktuellen Klimaveränderung auf die Höhe des Seespiegels abzuschätzen, musste die Reihe von jährlichen Bilanzgleichungen, die vom Staatlichen Hydrologischen Instituts in Sankt Petersburg für den Zeitraum 1935–1978 erstellt wurde, verlängert werden. Für Aussagen, die lediglich die Seespiegelhöhe betreffen, ist nur das Verhältnis von Wasserzufluss und Wasserverlust entscheidend. Deshalb wird in dieser Untersuchung nicht zwischen ober- und unterirdischem Zufluss unterschieden, sondern lediglich der Gesamtzufluss (Q) betrachtet.

Leider wurden in den letzten 10 Jahren viele meteorologische Stationen und Abflusspegel im Issyk-Kul'-Becken geschlossen. Im Jahr 2000 verblieben noch 3 der 8 meteorologischen Stationen, die zu Beginn der 90er Jahre in Betrieb waren, von den ehemals 56 Abflussmessstationen existieren nur noch 16 (Tab. 2).

Für die Verlängerung der hydrologischen Bilanzen auf den Zeitraum 1979–2000 wurde zunächst die Korrelation zwischen den gegenwärtig zur Verfügung stehenden hydro-meteorologischen Informationen und den vollständigen Wasserhaushalts-Gleichungen im Zeitraum 1935-1978 untersucht.

Der Abfluss der in Tabelle 2 aufgeführten 16 Flüsse besitzt einen hohen Korrelations-

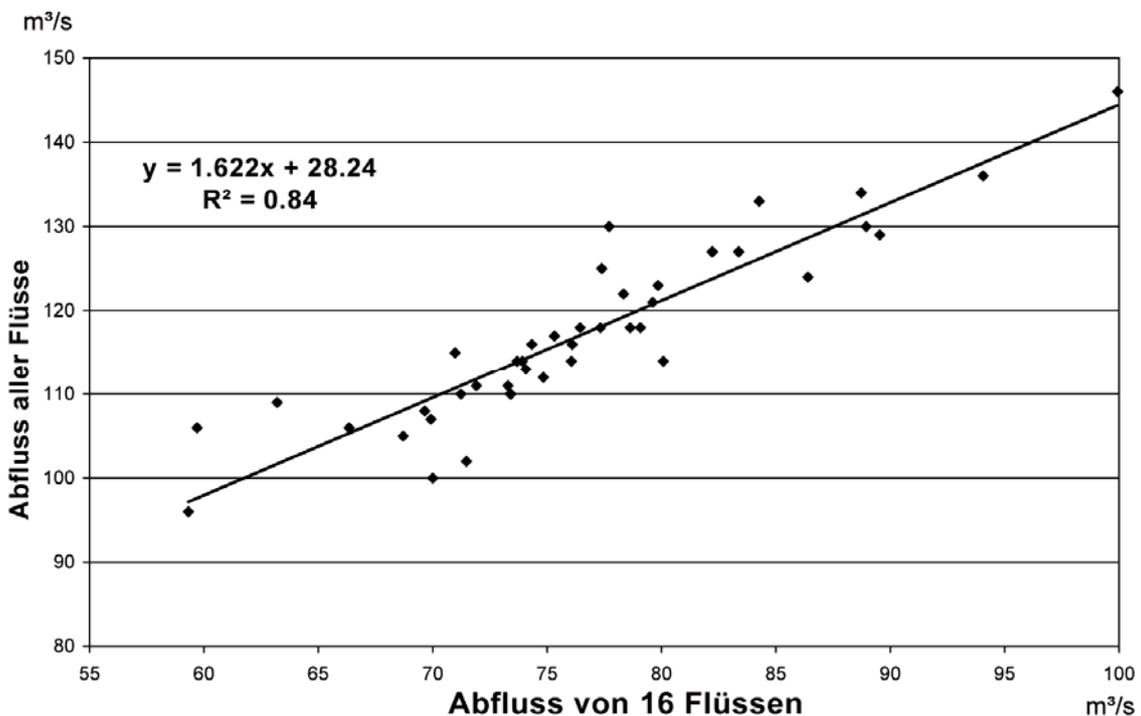
[†] Es existiert keine eindeutige Übersetzung, eigentlich bezieht sich das russische Wort auf Gravitation, Schwere, Last, Anziehungskraft und Tendenz. Anm. d. Übers.

koeffizienten ($r=0,91$) zum Gesamtabfluss des Beckens (Abb. 3).

Tab. 2: Liste der in Betrieb befindlichen Abflussmessstationen im Issyk-Kul'-Becken

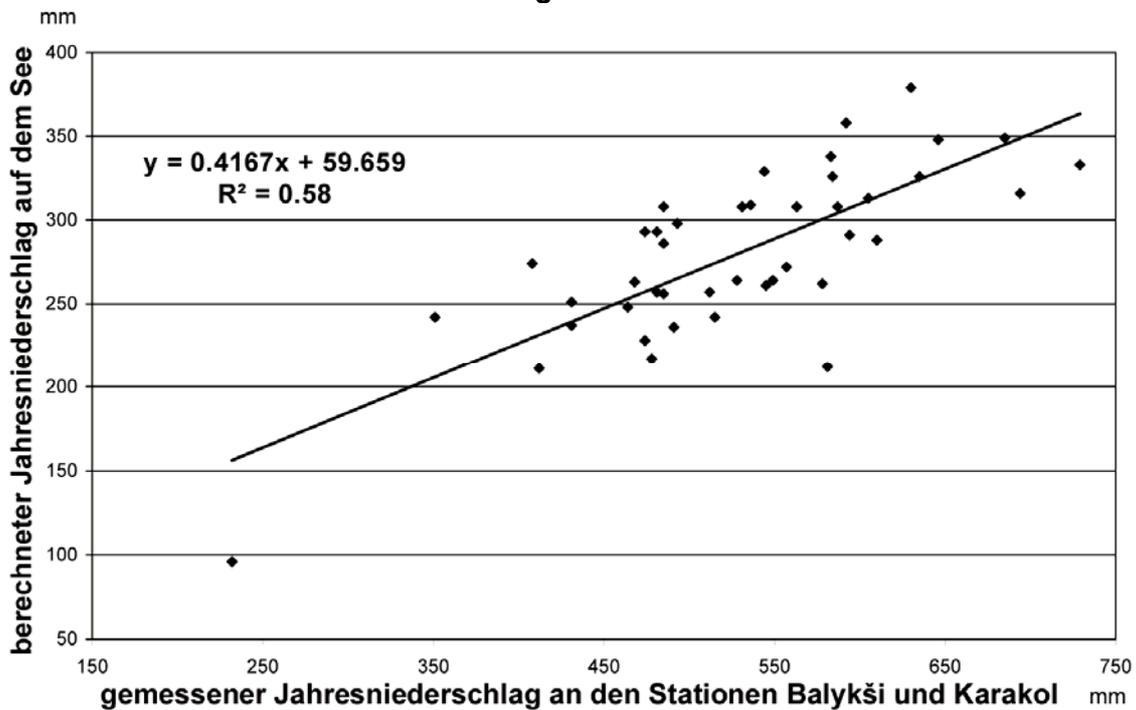
Nr.	Fluss	Station	Nr.	Fluss	Station
1	Džergalan	Sovetskoe	9	Tossor	Mündung d. Kodol
2	Turgen'-Ak-Suu	Lesozavoda	10	Ton	Tura-Suu
3	Ak-Suu	Teploključenka	11	Čon-Koj-Suu	Kurskoe
4	Karakol	Mündung des Kaška-Suu	12	Čolpon-Ata	Čolpon-Ata
5	Čon-Kysyl-Suu	Waldkordon	13	Čon-Ak-Suu	Grigor'evka
6	Džuuksu	Mündung des Džuukučak	14	Ak-Suu	Semenovka
7	Barskoon	Mündung des Sasyk	15	Čon-Urjukty	Konebodčeskij sovchoz
8	Ak-Saj	Kok-Saj	16	Ojtal	Ojtal

Abb. 3: Zusammenhang zwischen dem Zufluss von 16 Flüssen und dem Zufluss aller Flüsse des Beckens



Die Niederschläge auf dem See wurden aus den Jahressummen der Stationen Balykši und Karakol, die sich am westlichen und östlichen Seeufer befinden, berechnet (Abb. 4).

Abb. 4: Zusammenhang zwischen dem berechneten Jahresniederschlag auf dem See (nach GGI) und dem an den Stationen Balykši und Karakol gemessenen Jahresniederschlag



Leider wurde die Station Karakol, an der seit 1878 Aufzeichnungen vorgenommen wurden, im Jahre 1996 geschlossen.

Diese Lücke wurde mit Hilfe von Korrelationen zu den Stationen Bajtik (Abb. 5) und Pokrovka (Abb. 6) geschlossen.

Abb. 5: Zusammenhang zwischen dem Jahresniederschlag der Stationen Karakol und Bajtik, 1968-1996

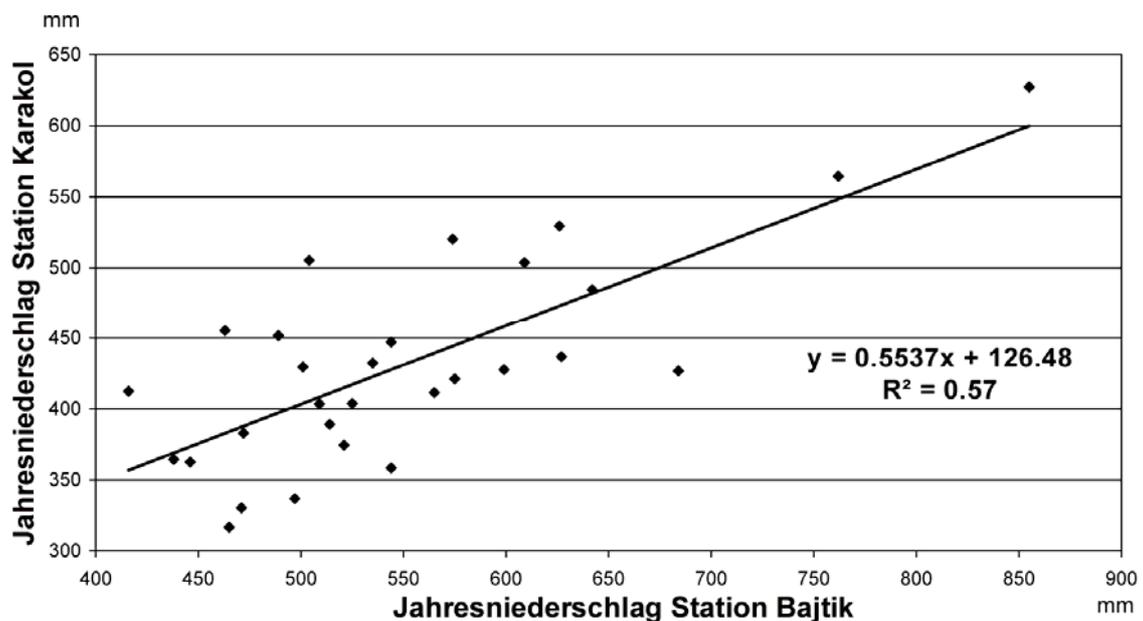
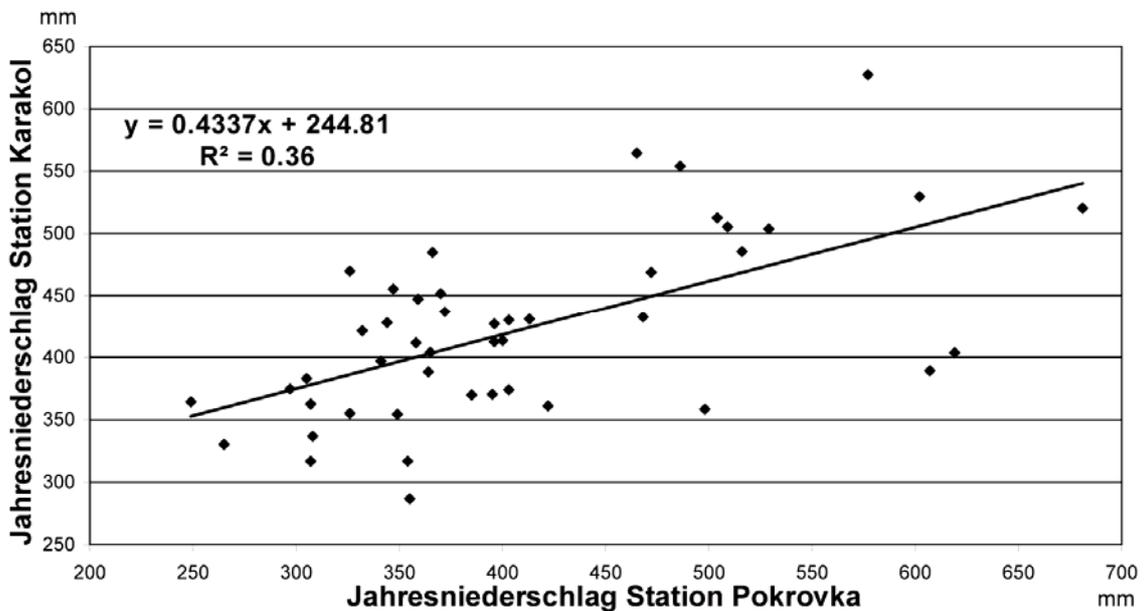


Abb. 6: Zusammenhang zwischen dem Jahresniederschlag der Stationen Karakol und Pokrovka



Dabei zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient zwischen den 300 km voneinander entfernten Stationen Bajtik und Karakol höher ist ($r = 0,75$) als zwischen den nur 40 km entfernten Stationen Pokrovka und Karakol ($r = 0,60$).

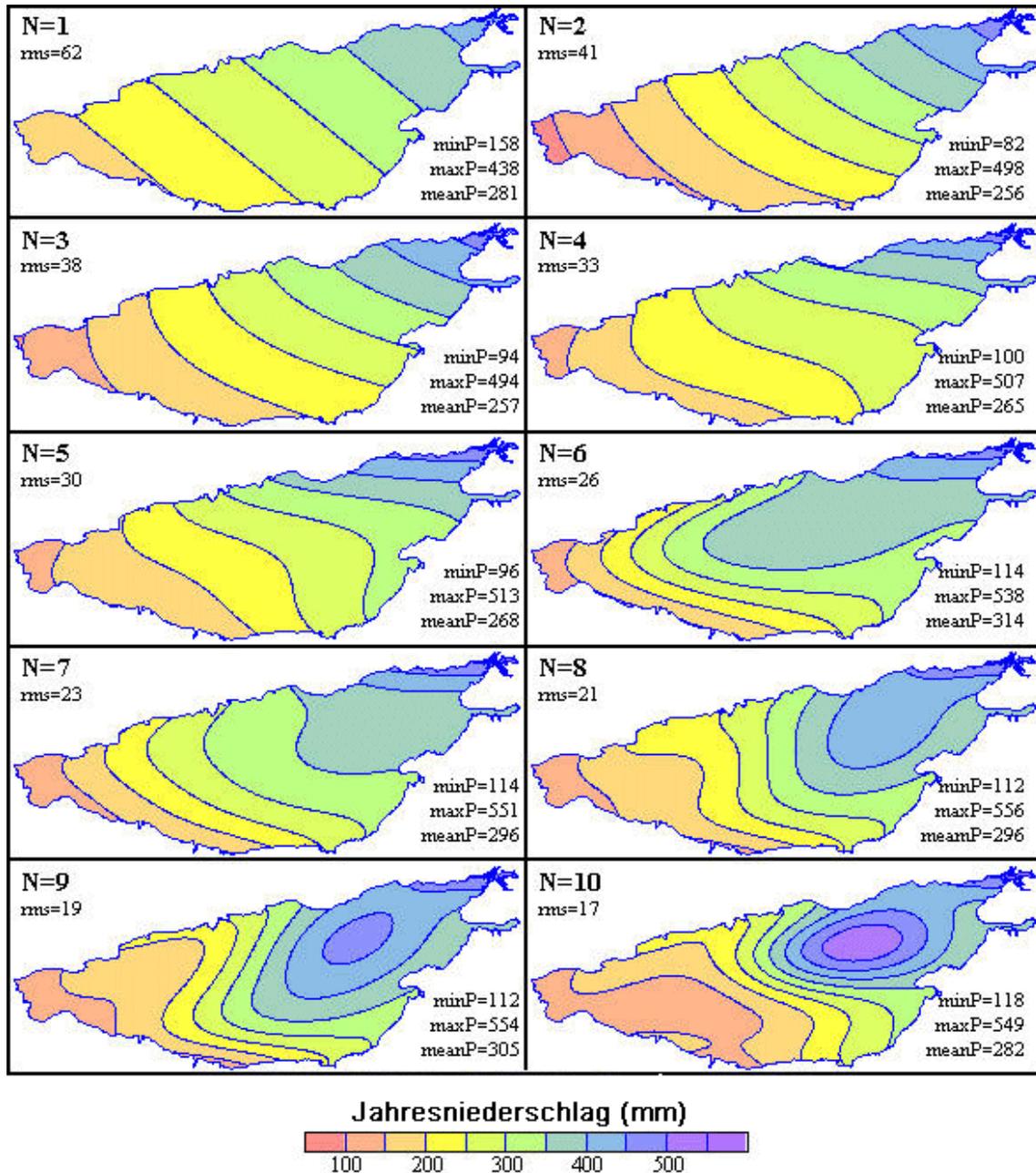
Zur Berechnung der Jahresniederschläge und ihrer Verteilung auf der Seefläche wurden diese durch Polynome verschiedener Grade approximiert (Abb. 7).

Nach Einschätzung von Experten spiegeln Polynome fünften Grades die reale Situation am besten wieder. Demzufolge beträgt die jährliche Niederschlagssumme 268 mm, wobei im zentralen Teil des Sees weniger Niederschläge fallen als in Ufernähe. Dieses Ergebnis stimmt gut mit dem mittleren Jahresniederschlag aus den hydrologischen Bilanzen der Periode 1935–1978 überein (Tab. 10).

In den Wasserhaushaltsgleichungen des GGI wird eine deutliche Abhängigkeit des Restfehlers von der Verdunstung sichtbar (Abb. 8).

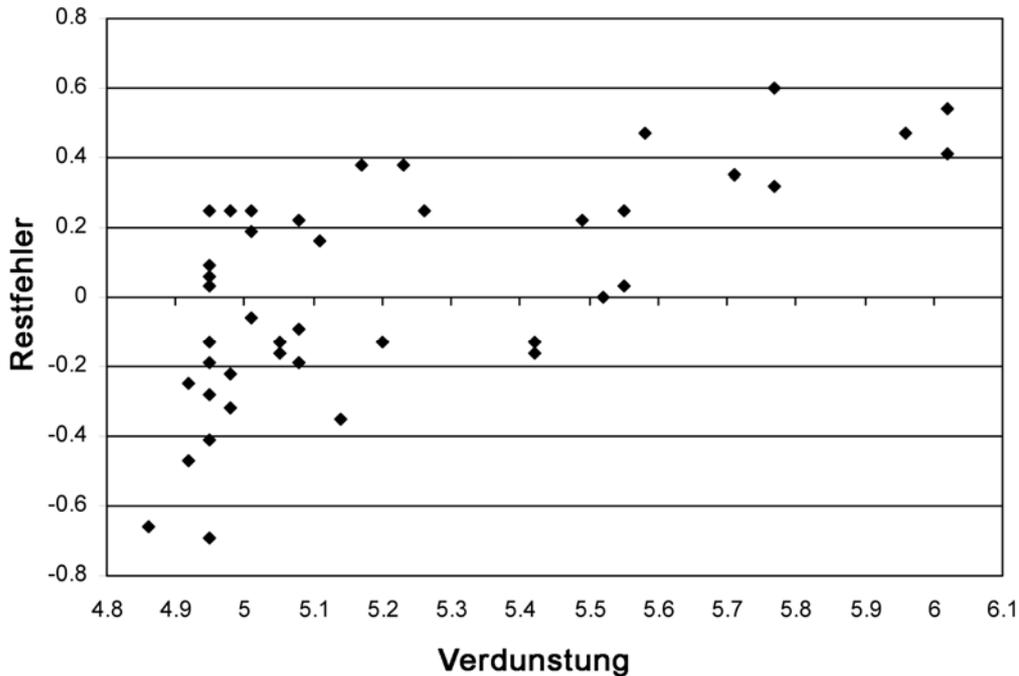
In diesem Zusammenhang wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate neue Werte für die am schwierigsten zu bestimmenden Größen, nämlich Bewässerungsverluste (B) und Verdunstung (E), ermittelt.

Abb. 7: Berechnung der Jahresniederschläge auf der Seeoberfläche durch Polynomen verschiedener Grade



Es wurden Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz (D), den klimatischen Verhältnissen an der Station Karakol und der Wasserentnahme für Bewässerung (I) bestimmt (Tab. 3), des weiteren wurden Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz und einzelnen Termen der Wasserhaushaltsgleichung (Tab. 4) sowie zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz und zweier Bilanzgrößen (Tab. 5) ermittelt.

Abb. 8: Zusammenhang zwischen Verdunstung und dem Restfehler der Wasserbilanz



Tab. 3: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz (D), der Wasserentnahme für Bewässerung (I) und den klimatischen Charakteristika an der MS Karakol (T: Jahresmitteltemperatur, P: Jahresniederschlag, LF: relative Luftfeuchte)

	D	T	P	LF	I
D	1	0,120	0,125	-0,192	0,187
T	-	1	-0,275	-0,549	0,235
P	-	-	1	-0,020	-0,143
LF	-	-	-	1	-0,266
I	-	-	-	-	1

Tab. 4: Korrelation zwischen dem Fehler der hydrologischen Bilanz (D) und einzelnen Komponenten der Bilanz (Q: Zufluss, Q_o: oberirdischer Zufluss, Q_u: unterirdischer Zufluss, B: Bewässerungsverlust, P: Niederschlags-summe, E: Verdunstung, Δh: Änderung des Seespiegels)

	D	Q	B	Q _o	Q _u	P	E	Δh
D	1	0,025	0,195	-0,113	-0,012	0,010	0,638	0,145
Q	-	1	0,020	0,675	0,655	0,269	0,210	0,622
B	-	-	1	-0,569	-0,267	-0,364	-0,098	-0,422
Q _o	-	-	-	1	0,289	0,322	0,128	0,655
Q _u	-	-	-	-	1	0,395	0,281	0,541
P	-	-	-	-	-	1	0,222	0,739
E	-	-	-	-	-	-	1	0,061
Δh	-	-	-	-	-	-	-	1

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten zwischen den Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung (Q: Zufluss, Q_o: oberirdischer Zufluss, Q_u: unterirdischer Zufluss, B: Bewässerungsverlust, P: Niederschlagssumme, E: Verdunstung, Δh: Änderung des Seespiegels)

	B	Q_o	Q_u	P	E	Δh
Q	0,196	0,116	0,027	0,027	0,638	0,147
B	1	0,225	0,195	0,195	0,667	0,243
Q_s	-	1	0,114	0,114	0,647	0,184
Q_u	-	-	1	0,016	0,638	0,146
P	-	-	-	1	0,638	0,145
E	-	-	-	-	1	0,654

Die Standardabweichung der Approximation des Fehlers der hydrologischen Bilanz wurde durch algebraische Potenzpolynome (N) als Funktion der Bilanzgrößen berechnet. Die approximierte Gleichung lautet:

$$\Delta h = 0,96581B - 0,42756B^2 - 0,71692E + 0,12369E^2$$

Die so ermittelten Werte (Tab. 6) zeigen, dass die Verluste durch die Bewässerung kleiner und die Verdunstungsmengen größer sind als die in den hydrologischen Bilanzen des GGI.

Tab. 6: Standardabweichung der Approximation des Fehlers der hydrologischen Bilanz (km³) durch algebraische Potenzpolynome (N) als Funktion der Bilanzkomponenten Bewässerungsverlust (B) und Verdunstung (E)

	Erstes Polynom			Polynom ohne erstes Glied		
	N = 1	N = 2	N = 3	N = 1	N = 2	N = 3
f(E)	0,250	0,249	0,244	-	0,251	0,249
f₁(E)+f₂(B)	0,235	0,232	0,224	-	0,235	0,232
f(E,B)	-	0,230	0,206	-	0,235	0,215

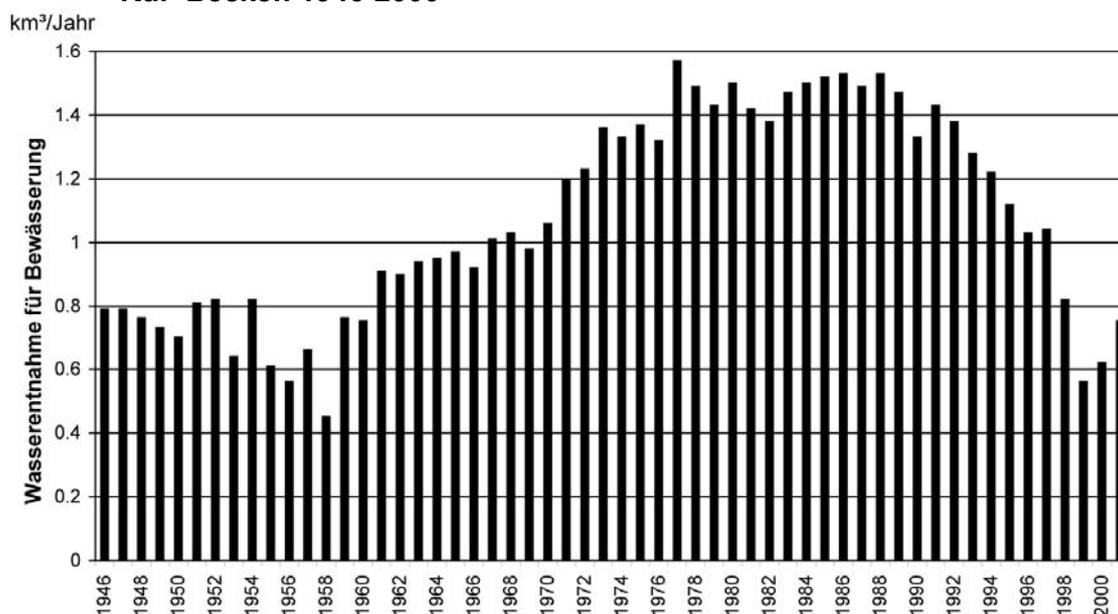
Im gesamten Issyk-Kul'-Becken wurden Daten über Wasserentnahmen für Bewässerungszwecke gesammelt (Anlage 1).

Aufgrund des landwirtschaftlichen Wandels kam es in den 90er Jahren zu einem starken Rückgang des Wasserverbrauchs für Bewässerung (Abb. 9).

Tab. 7: Ursprüngliche und korrigierte (*) Werte der hydrologischen Bilanz.

	B	B*		E	E*		Δh	Δh*	
		km ³	mm		km ³	mm		km ³	mm
1935	0.32	0.05	9	4.95	5.47	877	-0.63	-0.38	-60
1936	0.38	0.07	12	5.08	5.53	886	-0.09	0.05	9
1937	0.44	0.1	16	5.77	5.79	928	0.32	0	-1
1938	0.54	0.14	23	4.95	5.47	877	-0.19	-0.07	-11
1939	0.5	0.12	20	4.95	5.47	877	0.06	0.2	32
1940	0.32	0.05	9	5.08	5.53	886	0.22	0.4	65
1941	0.5	0.12	20	5.58	5.73	918	0.47	0.24	39
1942	0.57	0.16	25	4.95	5.47	877	-0.69	-0.58	-94
1943	0.88	0.36	58	4.95	5.47	877	0.09	0.09	14
1944	1.07	0.53	84	5.01	5.5	881	0.25	0.19	31
1945	0.54	0.14	23	5.05	5.52	884	-0.13	-0.06	-10
1946	0.5	0.12	20	5.11	5.54	889	0.16	0.22	35
1947	0.5	0.12	20	5.05	5.52	884	-0.16	-0.07	-11
1948	0.5	0.12	20	4.92	5.45	874	-0.25	-0.09	-15
1949	0.38	0.07	12	4.95	5.47	877	0.25	0.46	74
1950	0.91	0.39	62	4.98	5.48	879	0.25	0.23	37
1951	0.44	0.1	16	5.01	5.5	881	-0.06	0.08	14
1952	0.82	0.32	51	5.08	5.53	886	-0.19	-0.24	-39
1953	0.38	0.07	12	4.95	5.47	877	-0.28	-0.07	-11
1954	0.38	0.07	12	4.95	5.47	877	-0.41	-0.2	-32
1955	0.38	0.07	12	4.98	5.48	879	-0.32	-0.12	-20
1956	0.6	0.17	28	4.95	5.47	877	0.25	0.34	55
1957	0.32	0.05	9	5.01	5.5	881	0.19	0.41	66
1958	0.19	0.02	4	5.2	5.58	895	-0.13	0.09	14
1959	0.25	0.04	6	5.14	5.56	891	-0.35	-0.15	-24
1960	0.47	0.11	18	5.52	5.71	915	0	-0.17	-27
1961	0.44	0.1	16	4.98	5.48	879	-0.22	-0.06	-10
1962	0.41	0.09	14	4.92	5.45	874	-0.47	-0.26	-42
1963	0.32	0.05	9	5.42	5.67	909	-0.16	-0.17	-28
1964	0.6	0.17	28	5.23	5.6	897	0.38	0.32	51
1965	0.66	0.21	33	5.17	5.57	893	0.38	0.33	53
1966	0.5	0.12	20	5.55	5.72	917	0.03	-0.18	-28
1967	0.57	0.16	25	5.71	5.77	925	0.35	0	0
1968	0.6	0.17	28	6.02	5.85	938	0.41	-0.18	-29
1969	0.41	0.09	14	6.02	5.85	938	0.54	0.05	8
1970	0.5	0.12	20	5.55	5.72	917	0.25	0.04	7
1971	0.57	0.16	25	5.77	5.79	928	0.6	0.21	33
1972	0.5	0.12	20	4.86	5.42	869	-0.66	-0.47	-76
1973	0.69	0.23	36	5.49	5.7	913	0.22	-0.04	-6
1974	0.54	0.14	23	5.96	5.84	936	0.47	-0.05	-8
1975	0.63	0.19	31	5.26	5.61	899	0.25	0.16	26
1976	0.76	0.27	44	5.42	5.67	909	-0.13	-0.37	-59
1977	1.13	0.58	94	4.95	5.47	877	0.03	0	0
1978	1.26	0.72	116	4.95	5.47	877	-0.13	-0.15	-24
Mittel	0.55	0.17	-	5.21	5.58	-	0.02	0	-
Std. Abw.	0.22	0.14	-	0.33	0.13	-	0.32	0.24	-

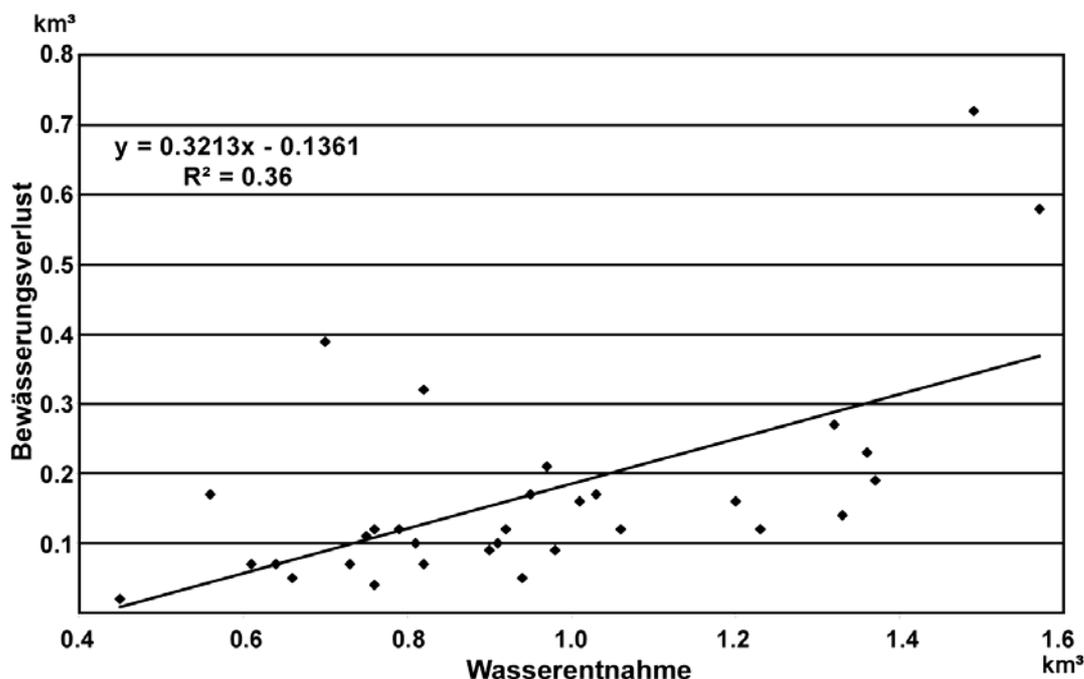
Abb. 9: Entwicklung der Wasserentnahme für Bewässerungszwecke im Issyk-Kul'-Becken 1946-2000



Der Zusammenhang zwischen Wasserentnahme und Abfluss wurde anhand der beiden größten Flüsse des Einzugsgebiets, Džergalan und Tjup, analysiert. An den Mündungen dieser Flüsse wurde eine saisonale Umverteilung des Abflusses festgestellt. Diese wird durch den Rückgang des Wasserverbrauchs im Sommer und den starken Abflussanstieg im Herbst und Winter aufgrund hohen Grundwasserzustroms gekennzeichnet. Es wurde über einen langen Zeitraum keine Verringerung der mittleren jährlichen Abflussmengen beobachtet, was beweist, dass der Einfluss der Wasserentnahme für Bewässerungszwecke auf den mittleren Jahresabfluss und die hydrologische Bilanz des Sees insgesamt nicht sehr groß ist.

Bewässerungsverluste, die dem Einzugsgebiet unwiederbringlich verloren gehen, zeigen eine lineare Abhängigkeit von den Wasserentnahmen (Abb. 10). Aufgrund dieser Abhängigkeit wurden die Wasserverluste durch Bewässerung für den Zeitraum 1979–2000 berechnet.

Abb. 10: Zusammenhang zwischen Wasserentnahme und Bewässerungsverluste



Wegen fehlender meteorologischer Messungen auf der Seeoberfläche, die für die Berechnung der Verdunstung notwendig sind, wurde versucht, ersatzweise Daten der meteorologischen Stationen am Ufer und der ufernahen Zone heranzuziehen und durch Iteration die Verdunstung auf der Seeoberfläche zu ermitteln. Die Berechnung der Verdunstung (Anlage 2) erfolgte nach der Formel von Ivanov:

$$E = 0,0018(25+T)^2(100 - a),$$

- E: Evaporation
- T: mittlere monatliche Lufttemperatur
- a: mittlere monatliche Luftfeuchtigkeit.

Die mittlere monatliche Luftfeuchtigkeit an den Stationen Balykši , Karakol und Krasnyj Oktjabr' befinden sich in Anlage 3. Die Ermittlung der Verdunstung von der Seeoberfläche mittels Iteration aus Werten vom Ufer ergab keine guten Resultate, sie wurden in diesem Bericht nicht weiter verwendet. Untersuchungen zur aktuellen Tendenz von Klimaparametern wie relative Luftfeuchte und Verdunstung sind jedoch zweifellos von großem Interesse, auf sie wird in den nächsten Abschnitten noch genauer eingegangen.

Mangels besserer Alternativen wurde die Verdunstung in den Wasserhaushaltsgleichungen im Zeitraum 1979–2000 (Tab. 8) als Restglied berechnet. Zur Wahrung der Homogenität wurde mit den hydrologischen Bilanzen des GGI von 1935-1978 (Tab. 9) analog verfahren. Die Bewässerungsverluste wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Tab. 8: Wasserbilanz des Issyk-Kul´ 1979-2000

	Zufluss aus der			Unwiederbringliche Was-			Niederschlag			Verdunstung			Veränderung des	
	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	KM ³	MM
1979	120	3.8	607	10,3	0,32	52	58	1.8	295	180	5,7	910	-0.37	-60
1980	121	3.8	612	10,9	0,34	55	58	1.8	295	180	5,7	912	-0.37	-60
1981	137	4.3	693	10,1	0.32	51	83	2.6	420	194	6,1	982	0.50	80
1982	114	3.6	577	9,7	0.31	49	54	1.7	274	168	5,3	852	-0.31	-50
1983	124	3.9	627	10,7	0.34	54	53	1.7	275	178	5,6	898	-0.31	-50
1984	121	3.8	612	10,9	0.34	55	53	1.7	271	195	6.2	988	-1.00	-160
1985	113	3.6	571	11,1	0,35	56	57	1.8	288	169	5,3	853	-0.31	-50
1986	114	3.6	577	11,3	0.36	57	60	1.9	301	158	5	801	0.12	20
1987	132	4.2	668	10,9	0.34	55	73	2.3	372	167	5,3	845	0.87	140
1988	131	4.1	662	11,3	0.36	57	72	2.3	366	160	5,1	811	1.00	160
1989	116	3.7	587	10,7	0.34	54	50	1.6	255	174	5,5	878	-0.56	-90
1990	126	4	637	9,3	0.29	47	53	1.7	278	189	6,0	958	-0.56	-90
1991	111	3.5	561	10,3	0.32	52	57	1.8	284	175	5.5	883	-0.56	-90
1992	111	3.5	561	9,7	0.31	49	60	1.9	305	166	5,2	837	-0.12	-20
1993	125	3.9	632	8,7	0.27	44	69	2.2	351	154	4,9	779	1.00	160
1994	137	4.3	693	8,1	0.26	41	50	1.6	260	191	6,0	968	0.19	30
1995	120	3.8	607	7,1	0.22	36	47	1.5	238	200	6,3	1009	-1,25	-200
1996	118	3.7	597	6,1	0.19	31	57	1.8	294	194	6,1	980	-0.75	-120
1997	119	3.8	602	6,3	0.20	32	52	1,6	265	209	6,6	1055	-1.37	-220
1998	141	4.4	713	4,0	0.12	20	66	2,1	345	184	5,8	928	0,69	110
1999	141	4.4	713	1,4	0,04	7	76	2,4	388	185	5,8	934	0,37	160
2000	135	4.3	683	2,0	0,06	10	60	1,9	303	191	6,0	966	0,06	10
Summe	2727	86	13792	190,9	6,0	964	1318	41,7	6723	3961	125	20027	-3,04	-390
Mittel	124	3,9	627	8,7	0,27	44	60,0	1,9	306	180	5,7	910	-0,14	-18

Tab. 9: Wasserbilanz des Issyk-Kul' 1935 -1978.

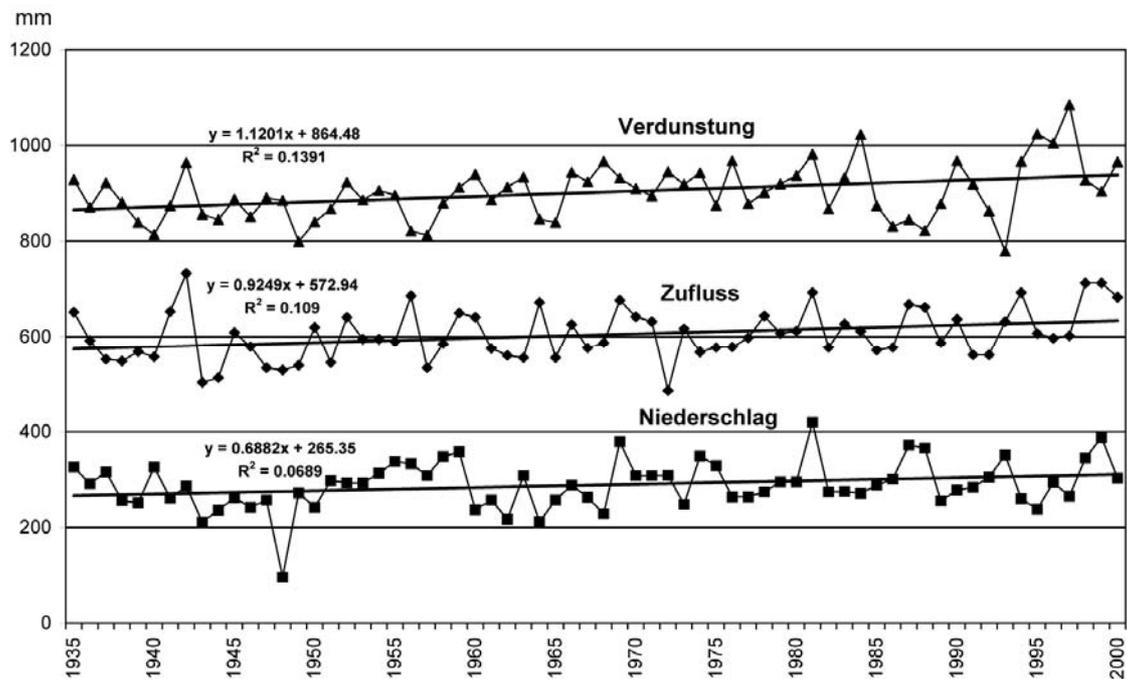
	Zufluss aus der Zone der Abflussbildung			Unwiederbringliche Wasserverluste durch Bewässerung			Niederschlag			Verdunstung			Veränderung des Seevolumens	
	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	M ³ /s	KM ³	MM	KM ³	MM
1935	130	4,10	652	1,78	0,06	9	65	2,05	326	184	5,79	929	0,25	40
1936	118	3,72	592	2,37	0,07	12	58	1,83	291	172	5,43	871	0,00	0
1937	110	3,47	552	3,16	0,1	16	63	1,99	316	182	5,75	922	-0,44	-70
1938	109	3,44	548	4,54	0,14	23	51	1,61	256	174	5,49	881	-0,63	-100
1939	113	3,56	568	3,95	0,12	20	50	1,58	251	166	5,23	839	-0,25	-40
1940	111	3,50	557	1,78	0,06	9	65	2,05	326	161	5,08	814	0,38	60
1941	130	4,10	653	3,95	0,12	20	52	1,64	261	173	5,45	874	0,13	20
1942	146	4,60	733	4,94	0,16	25	57	1,80	286	191	6,01	964	0,19	30
1943	100	3,15	503	11,5	0,36	58	42	1,32	211	169	5,34	856	-1,25	-200
1944	102	3,22	513	16,6	0,52	84	47	1,48	236	167	5,27	845	-1,13	-180
1945	121	3,82	609	4,54	0,14	23	52	1,64	262	176	5,54	888	-0,25	-40
1946	115	3,63	579	3,95	0,12	20	48	1,51	242	168	5,31	851	-0,31	-50
1947	106	3,34	534	3,95	0,12	20	51	1,61	257	176	5,56	891	-0,75	-120
1948	105	3,31	529	3,95	0,12	20	19	0,60	96	175	5,52	885	-1,75	-280
1949	107	3,37	539	2,37	0,07	12	54	1,70	272	158	4,98	799	0,00	0
1950	123	3,88	620	12,3	0,39	62	48	1,51	242	166	5,24	840	-0,25	-40
1951	108	3,41	545	3,16	0,1	16	59	1,86	298	171	5,41	867	-0,25	-40
1952	127	4,01	641	10,1	0,32	51	58	1,83	293	183	5,76	923	-0,25	-40
1953	118	3,72	595	2,37	0,07	12	58	1,83	293	175	5,53	886	-0,06	-10
1954	118	3,72	595	2,37	0,07	12	62	1,96	313	179	5,65	906	-0,06	-10
1955	117	3,69	590	2,37	0,07	12	67	2,11	338	177	5,59	896	0,12	20

1956	136	4,29	686	5,54	0,17	28	66	2,08	333	162	5,12	821	1,06	170
1957	106	3,34	534	1,78	0,06	9	61	1,92	308	161	5,07	813	0,12	20
1958	116	3,66	585	0,79	0,02	4	69	2,18	348	174	5,48	879	0,31	50
1959	129	4,07	650	1,19	0,04	6	71	2,24	358	180	5,69	912	0,56	90
1960	127	4,01	641	3,54	0,11	18	47	1,48	237	186	5,86	940	-0,50	-80
1961	114	3,60	575	3,16	0,1	16	51	1,61	257	175	5,53	886	-0,44	-70
1962	111	3,50	560	2,77	0,09	14	43	1,35	217	181	5,69	913	-0,94	-150
1963	110	3,47	555	1,78	0,06	9	61	1,92	308	185	5,82	934	-0,50	-80
1964	133	4,19	672	5,54	0,17	28	42	1,32	212	167	5,28	846	0,06	10
1965	110	3,47	555	6,53	0,21	33	51	1,61	257	166	5,23	839	-0,38	-60
1966	124	3,91	626	3,95	0,12	20	57	1,80	288	187	5,89	944	-0,31	-50
1967	114	3,60	576	4,94	0,16	25	52	1,64	263	183	5,76	924	-0,69	-110
1968	116	3,66	587	5,54	0,17	28	45	1,42	228	191	6,03	967	-1,12	-180
1969	134	4,23	677	2,77	0,09	14	75	2,37	379	184	5,81	932	0,69	110
1970	127	4,01	642	3,95	0,12	20	61	1,92	308	180	5,67	910	0,12	20
1971	125	3,94	632	4,94	0,16	25	61	1,92	308	177	5,58	895	0,12	20
1972	96	3,03	486	3,95	0,12	20	61	1,92	309	187	5,89	945	1,06	-170
1973	122	3,85	617	7,12	0,22	36	49	1,54	248	182	5,73	919	-0,56	-90
1974	112	3,53	567	4,55	0,14	23	69	2,18	349	186	5,88	943	-0,31	-50
1975	114	3,60	577	6,13	0,19	31	65	2,05	329	173	5,46	875	0	0
1976	114	3,60	578	8,7	0,27	44	52	1,64	264	191	6,04	968	-1,06	-170
1977	118	3,72	598	18,6	0,59	94	52	1,64	264	174	5,48	878	-0,68	-110
1978	127	4,01	644	22,9	0,72	116	54	1,70	274	178	5,62	902	-0,62	-100
Mittel	117,5	3,70	592	5,38	0,17	27,2	55,5	1,75	280	176	5,56	891	-0,29	-46

3. Aktuelle Veränderungen des Wasserhaushalts

Die Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten ist in Abbildung 11 dargestellt und verdeutlicht, dass der Abfluss im Zeitraum 1935–2000 deutlich zugenommen hat. Im Jahr 2000 betrug die spezifische Abflusshöhe 60 mm, was einer Abflussmenge von 11,9 m³/s und damit in etwa der Wasserführung des zweitgrößten Flusses im Becken, des Tjup, entspricht.

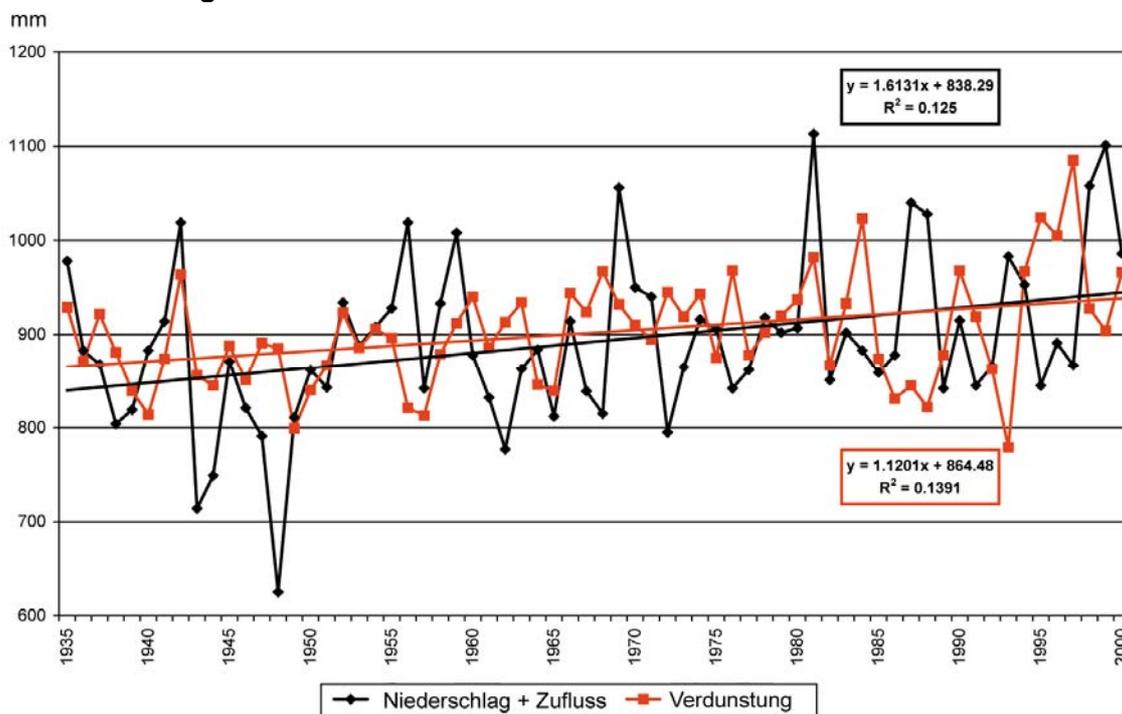
Abb. 11: Entwicklung von Zufluss, Niederschlag und Verdunstung von der Seeoberfläche 1935-2000



Der Trend der Jahresniederschläge ist ebenfalls positiv, die Zunahme von 1935 bis 2000 beträgt 45 mm. Die Verdunstung von der Seeoberfläche hat im gleichen Zeitraum um 57 mm zugenommen.

Die zeitlichen Trends der Verdunstung und der Summe aus Abfluss und Niederschlag (Abb. 12) zeigen, dass die positiven Terme der Bilanz in der Periode 1935–1970 geringer waren als die Verdunstung. In den 80er Jahren waren dann auf ähnlichem Niveau und in den 90er Jahren überstieg der Wasserzugewinn die Verdunstung. 1935 liegt die Trendlinie der wasserliefernden Terme 31 mm unterhalb derjenigen der Verdunstung, im Jahr 2000 übersteigt sie diese um 18 mm.

Abb. 12: Entwicklung der Verdunstung und der Summe aus Abfluss und Niederschlag



Bewässerungsverluste verringern den Wasserzufluss in den See, resultierende Größe ist der Höhe des Seespiegels. Dieser senkte sich im Zeitraum 1935–1978 um 46 mm/a (Tab. 9) und von 1979–2000 (Tab. 8) um 18 mm/a. Während der letzten 5 Jahre wurde ein Anstieg des Seespiegels um 100 mm/a beobachtet.

Verdunstung und relative Luftfeuchtigkeit (Anlagen 2,3) wurden seit 1936 an der Station Balykši gemessen. Die Station wurde im Jahre 1957 um 2 km landeinwärts versetzt und besitzt damit eine Inhomogenität in der Datenreihe. Deswegen werden die beiden Zeiträume getrennt voneinander betrachtet (Abb. 13, 14). Die Verdunstungshöhe stieg innerhalb beider Abschnitte an, nach der Versetzung der Station (1957-2000) mit einem Wert von beinahe 200 mm allerdings deutlich steiler.

Auch im Südosten des Sees (Station Karakol) ist eine Erhöhung der Verdunstung feststellbar, im Nordosten (Station Krasnyj Oktjabr') verringerte sie sich mit der Zunahme des Niederschlags. Im außergewöhnlichen feuchten Jahr 1972 war die Verdunstung an allen drei Stationen sehr niedrig (Abb. 15). Die relative Luftfeuchtigkeit an den 3 Stationen (Abb. 16) zeigt einen statistisch nicht signifikanten Trend. 1972 war die relative Luftfeuchtigkeit im Westen und im Osten des Sees gleich.

Abb. 13: Monatliche Verdunstung an der Station Balykši 1936-1956 und 1957-2003

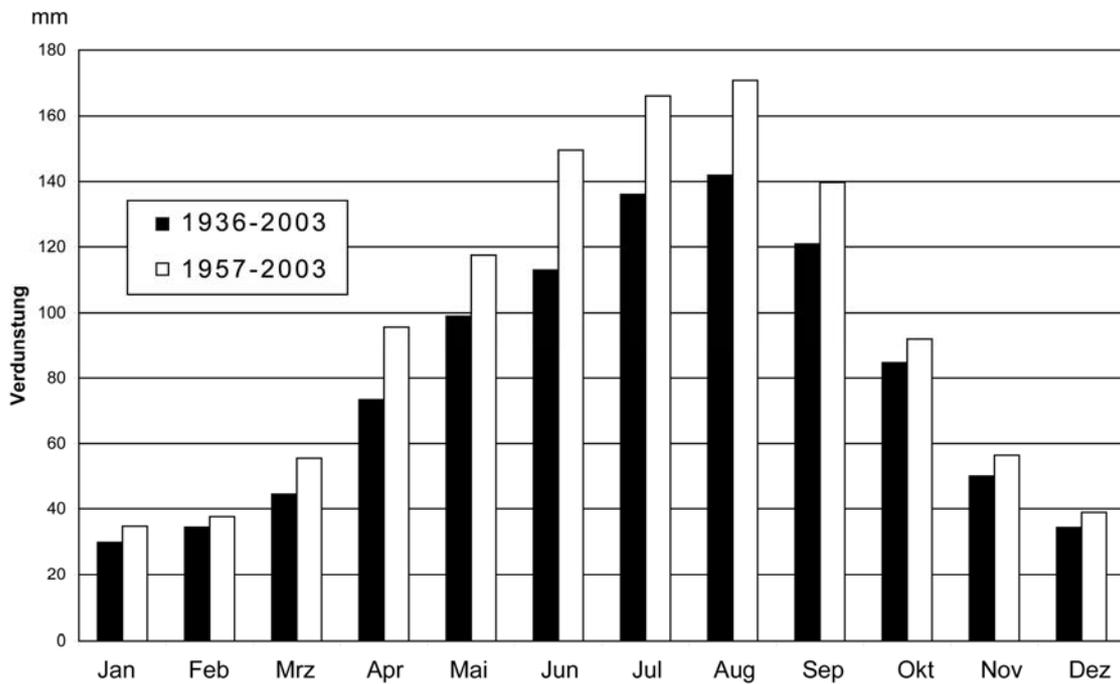


Abb. 14: Relative Luftfeuchtigkeit an der Station 1936-1957 und 1957-2003

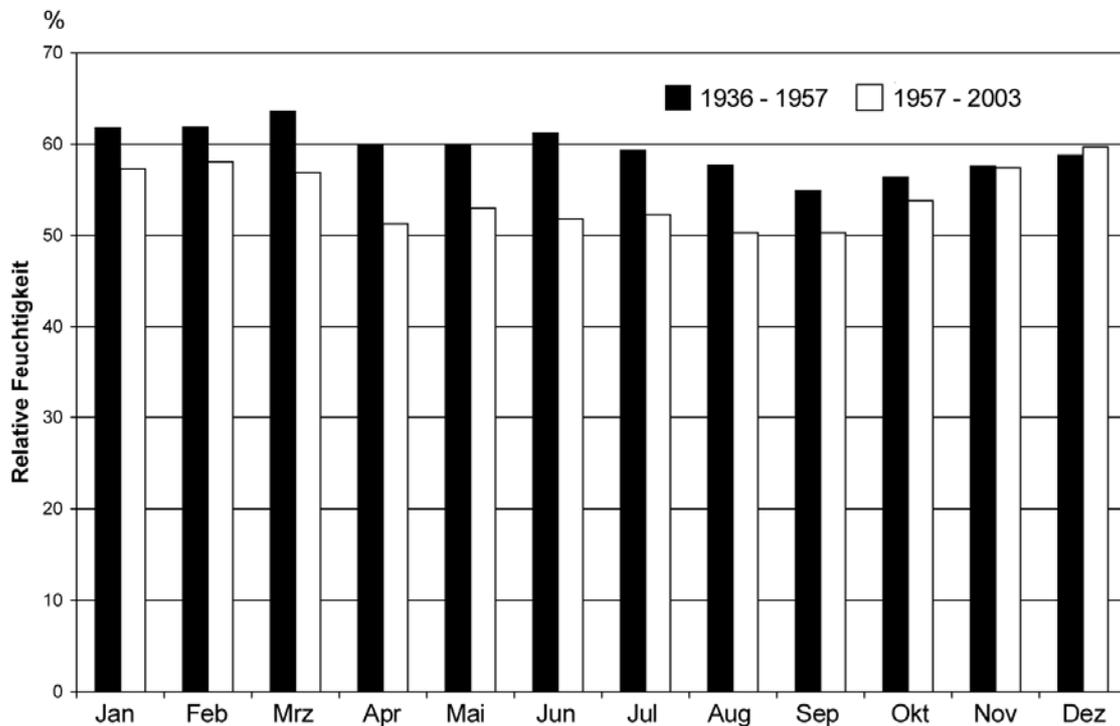


Abb. 15: Entwicklung der Verdunstung an den Stationen Balykši , Karakol und Krasnyj Oktjabr´, 1957-1999

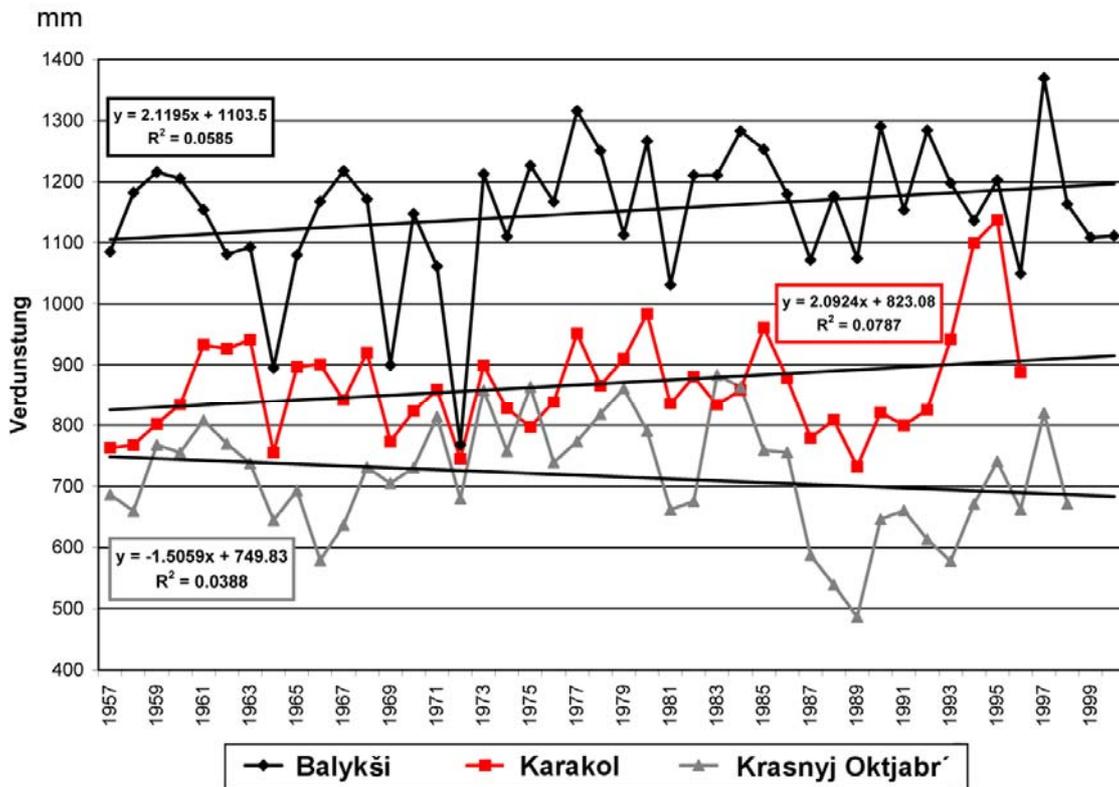
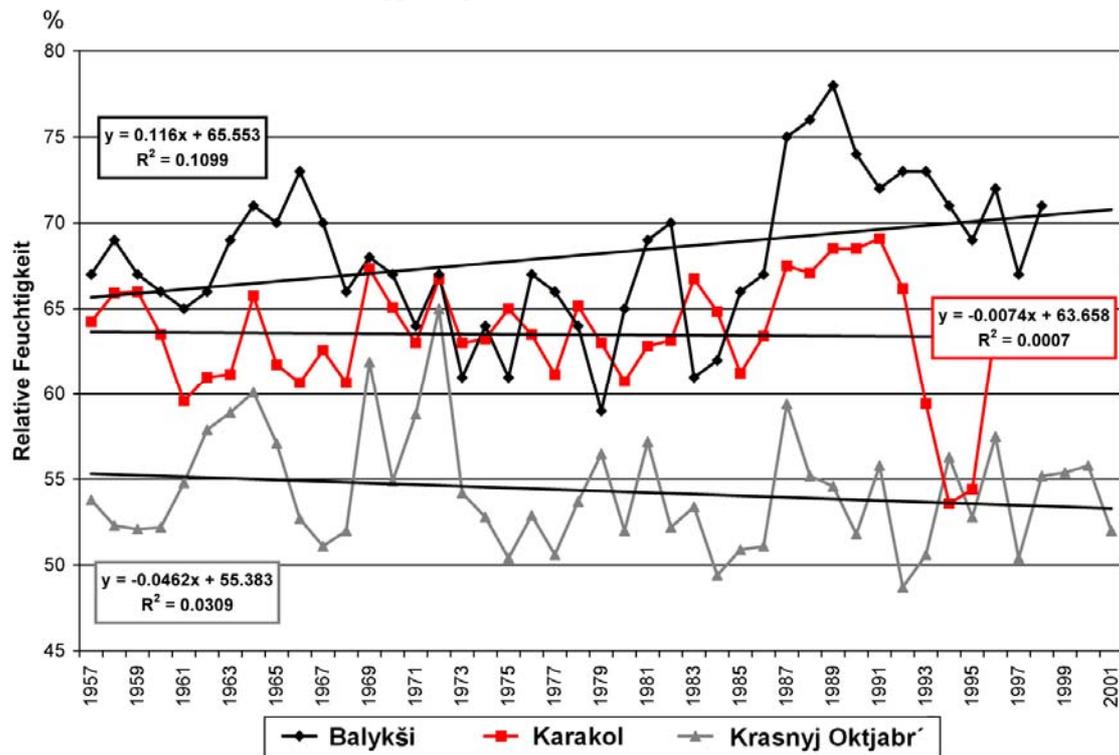


Abb. 16: Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit an den Stationen Balykši , Karakol und Krasnyj Oktjabr´, 1957-1999



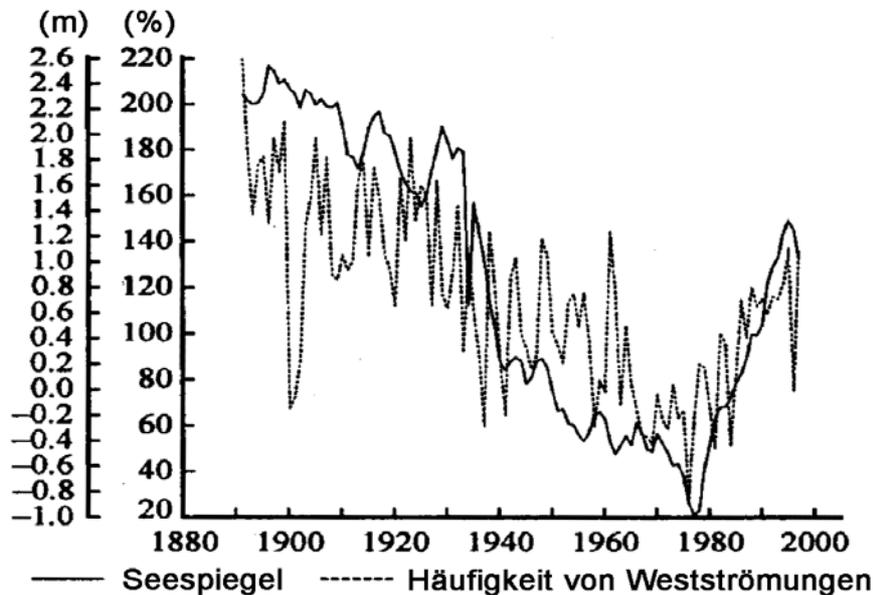
4. Zusammenhang der Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' und der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre

Die gegenwärtige Höhe des Seespiegels wird neben anthropogenen Faktoren vor allem vom Klimawandel beeinflusst. Am Beginn der kausalen Kette ändert sich zunächst die atmosphärische Zirkulation, was sich unmittelbar auf die meteorologischen Bedingungen auswirkt und Veränderungen des Niederschlags, des Abflusses und der Verdunstung nach sich zieht, worauf der Seespiegel mit einer Höhenänderung reagiert. Am wenigsten bekannt in dieser Prozesskette ist der Zusammenhang zwischen atmosphärischer Zirkulation und Witterungsabläufen.

Girs (1974) unterschied auf der Grundlage der Häufigkeit dreier Zirkulationstypen im 20. Jahrhundert 4 Zirkulationsperioden: 1900–1928 mit vorwiegend westlicher Luftströmung, 1929–1939 mit Ostströmung, 1940–1948 mit meridionaler Zirkulation und 1949–1971 mit östlichen und meridionalen Strömungstypen. Aufgrund einer wahrscheinlichen Änderungen der Sonnenaktivität prognostizierte Girs in den Jahren 1972/73 einen Übergang zur westlichen Form der Zirkulation, doch stattdessen trat eine östliche Strömungsperiode ein, die nach Einschätzung der Anhänger von Girs bis 1995 andauerte. Obwohl die Prognose von Girs falsch war und die Ostströmung überwog, kann seit 1978 ein Anstieg der Häufigkeit westlicher Zirkulation beobachtet werden.

Viele Autoren untersuchten den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Seespiegel des Kaspischen Meeres in Abhängigkeit der atmosphärischen Zirkulation. Meščerskaja et al. (2002) stellten fest, dass die Niederschläge im Wolgabecken bei westlicher Zirkulation 110-120%, bei östlicher Zirkulation 70-80% und bei meridionaler Zirkulation 110-130% des langjährigen Mittelwerts betragen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts lag der Seespiegel des Kaspischen Meeres mit –26 m ü. M. relativ hoch. Bis 1930 fiel er langsam ab, in den 30er und 40er Jahren schneller, und 1977 erreichte er mit –29 m ü. M. seinen Minimalstand. Von 1978-1995 stieg der Seespiegel um 2,6 m an und fiel in den beiden folgenden Jahren wieder um 0,4 m ab. Der Anstieg von 1978 bis 1995 kann gut mit der Häufigkeit von westlichen, niederschlagsbringenden Luftmassen erklärt werden (Abb. 17). Die Niederschläge lagen im genannten Zeitraum in der kalten Jahreszeit 2 % und im Sommer 6 % über dem Mittelwert (Meščerskaja et al., 2002).

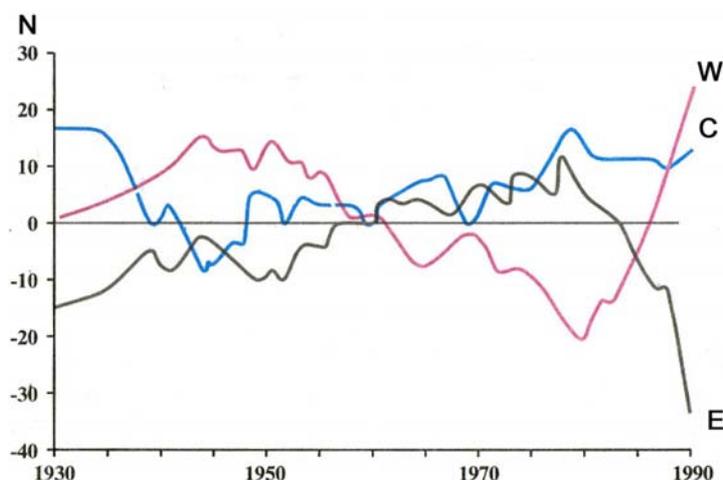
Abb. 17: Entwicklung des Seespiegels des Kaspischen Meeres und Häufigkeit westlicher Luftströmungen von 1891 bis 1998 (Meščerskaja et al., 2002)



Ein wichtiger Hintergrund für die gegenwärtige zyklonale Aktivität ist die Erhöhung des Temperaturgradienten zwischen höheren und niederen Breiten aufgrund der starken Klimaerwärmung in den mittleren Breiten und der unbedeutenden Erwärmung in den hohen Breiten, bedingt durch die große thermische Trägheit der arktischen Wassermassen (Budyko u.a. 1993). Die winterliche Erwärmung in Sibirien in den 80er Jahren ist mit der zunehmenden Häufigkeit atlantischer Zyklonen verbunden (Rogers, Mosley-Tompson, 1995). Diese winterliche Erwärmung wurde auch in Kasachstan und Kirgistan festgestellt.

Die Gegenüberstellung von Niederschlagsanomalien und Häufigkeiten von zonalen und meridionalen Zirkulationstypen im eurasischen Kontinent zeigt, dass meridionale Zirkulation die Bildung eines Niederschlagsüberschusses begünstigt, während zonale Bewegung von Luftmassen zu einem Niederschlagsdefizit führt. In Abbildung 18 wird deutlich, dass sich die allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre seit 1980 verändert. Während die Häufigkeit des östlichen Zirkulationstyps stark rückläufig ist, erhöht sich die Anzahl der Tage mit meridionaler und vor allem mit westlicher Zirkulation.

Abb. 18: Abweichung vom langjährigen durchschnittlichen Auftreten westlicher (W), meridionaler (C) und östlicher (E) Zirkulationsprozesse nach Zahl der Tage (N) (zehnjährige gleitende Mittelwerte)



Im Issyk-Kul'-Becken beträgt der mittlere Jahresniederschlag im Westen (Station Balykši) von 1961-1980 119,5 mm und von 1981–2000 142,5 mm (+23 mm). Im Südwesten (Station Pokrovka) liegen die entsprechenden Werte bei 368,9 mm und 441,5 mm (+72,6 mm). Durch den Niederschlagsanstieg verringert sich die Seespiegelabsenkung in den 20jährigen Bezugsperioden von 1,35 m auf 0,3 m.

Seit 1998 wird ein bedeutender Anstieg des Seespiegels festgestellt, der bis zum Ende des Jahres 2002 50 cm betrug und zweifellos mit den Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation verknüpft ist. Die Ursachen des ungewöhnlichen Anstiegs des Niveaus sollten genau untersucht werden, da das Schadenspotenzial größer ist als bei einem Absinken des Seespiegels. Schon jetzt kann auf niedrig gelegenen Uferbereichen, wie beispielsweise im Gebiet der Gemeinde Anan', ein Anstieg des Grundwassers beobachtet werden.

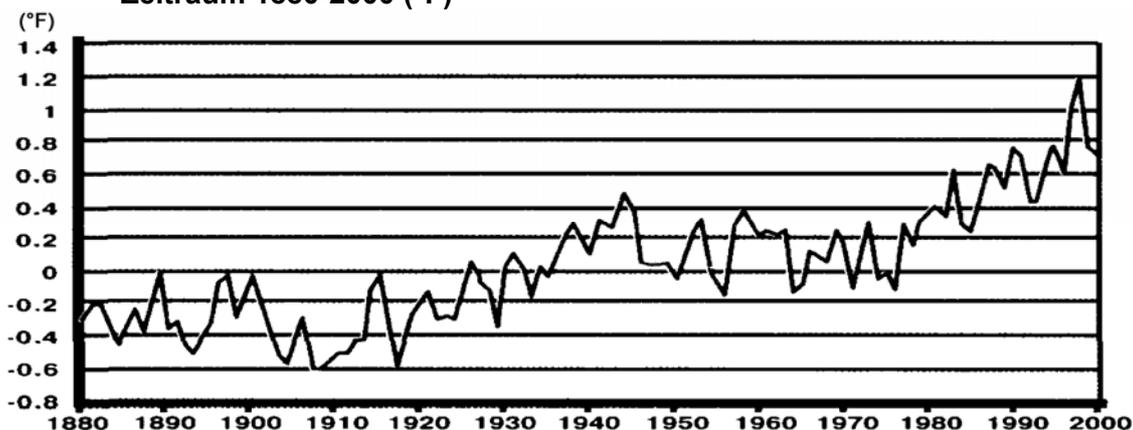
5. Veränderung der Lufttemperatur

Eine traditionelle Methode bei der Analyse von Klimaveränderungen ist die Verwendung von gleitenden Mitteln. Bei langjährigen Filtern ist die Bestimmung des Anfangsjahres einer Schwankung nicht deutlich. In diesem Zusammenhang wurde die Methode der optimalen Strichlinienapproximation verwendet. Die Länge der Linienabschnitte, wie zum Beispiel die Dauer von Zyklen der Sonnenaktivität nach Wolf, beträgt 10 Jahre, an den Enden der Zeitreihen allerdings nur 5 Jahre. Da die Stationen im Issyk-Kul'-Becken mit langjährigen Reihen (Balykši und Čolpon-Ata) Inhomogenitäten wegen

Ortswechselln aufweisen, wurden Daten von Stationen außerhalb des Einzugsgebiets verwendet, um die Wendepunkte in den Temperaturreihen ausfindig zu machen. Die Berechnungen zeigen, dass die aktuelle Klimaerwärmung 1972 einsetzte und sowohl in Kazalinsk, Almaty, Biškek, Džalal-Abad und Talas nachgewiesen werden kann (Anlage 4). An der Station Karakol im Issyk-Kul'-Becken, die nur eine kurze Beobachtungsreihe besitzt, ist kein Trend bei den Jahrestemperaturen festzustellen. Bei der Aufteilung der Reihe in kleinere Zeitabschnitte waren die mittleren quadratischen Abweichungen geringer als bei der gesamten Reihe. (Anlage 4). Die Tatsache, dass die Standardabweichungen im Becken (Stationen Karakol und Pokrovka) deutlich geringer sind als außerhalb des Beckens veranschaulicht in eindrücklicher Weise den ausgleichenden Einfluss des Issyk-Kul' auf das Temperaturregime.

Nach Daten des National Climatic Data Center (Abb. 19), beträgt der lineare Trend der globalen Temperaturerhöhung $0,5^{\circ}\text{F}/100$ Jahre.

Abb. 19: Abweichung der globalen Lufttemperatur vom langjährigen Mittel im Zeitraum 1880-2000 ($^{\circ}\text{F}$)



Die größte Erwärmung fand in den 80er und 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts statt. Das Jahr 1998 war das wärmste im gesamten Beobachtungszeitraum seit 1861. In Abbildung 19 wird deutlich, dass auch in der Periode 1911–1944 eine starke Erwärmung erfolgt ist. Nach Efimova und Strokina (2002) war die Ursache der Erwärmung von 1930–1940 eine Verminderung der atmosphärischen Trübung und damit eine Erhöhung der Sonneneinstrahlung. Die gegenwärtige Erwärmung wird dem entgegen auf die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen zurückgeführt. Damit entspricht der gegenwärtige Temperaturanstieg in Kirgistan der globalen Tendenz.

Der Winter des Jahres 2003 war in der Region sehr warm, der Frühling hingegen (v.a. der April) ungewöhnlich kalt. Mitte April bis Ende Anfang Mai wurde bei anhaltender Invasion nördlicher Zyklonen in Biškek eine Absenkung der Temperaturen auf bis zu -6°C beobachtet. Am 1. und 2. Mai 2003 fiel im Issyk-Kul'-Becken Schnee.

6. Veränderung der Wassertemperatur

Es besteht ein wissenschaftliches Interesse an der Frage, wie sich die Wassertemperatur tiefer Seen wie der Issyk-Kul' durch die globale Erwärmung verändert. In den Jahren 1928, 1930 und 1932 unternahm eine Expedition der Akademie der Wissenschaften der UdSSR unter der Leitung von L.S. Berg Messungen der Wassertemperatur in tiefen Schichten. In Tiefen von 200 und 600 m wurde 1928 4,3°C und 4,2°C, 1930 4,0°C und 3,7°C und 1932 4,2°C und 3,7°C registriert.

Von 1981–1988 wurde die Wassertemperatur in großen Tiefen von der kirgisischen Verwaltung der Hydrometeorologie an Bord des Forschungsschiffes „Multor“ durchgeführt und dabei in der Tiefe von 650 m ein Temperaturspektrum von 3,7° bis 4,1°C registriert. Auch in einer Tiefe von 200 m wurden keine größeren Abweichungen von den Messungen aus den Jahren 1928, 1930 und 1932 festgestellt.

Nach einer langen Periode, in der wegen des ökonomischen Zusammenbruch des Landes jegliche Messung ausblieb, wurden in den Jahren 1997, 1998, 2000, 2001 und 2003 wieder unregelmäßig Untersuchungen der Wassertemperatur in großen Tiefen durchgeführt. In den Jahren 2001 und 2003 wurde in 650 m Tiefe eine noch nie zuvor gemessene Maximaltemperatur von 4,4°C ermittelt. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts kam es im Vergleich mit den 1980er Jahren in 650 m Tiefe zu einer Temperaturerhöhung von 0,4°C, in 200 m um 0,6°C und in 100 m um 0,8°C.

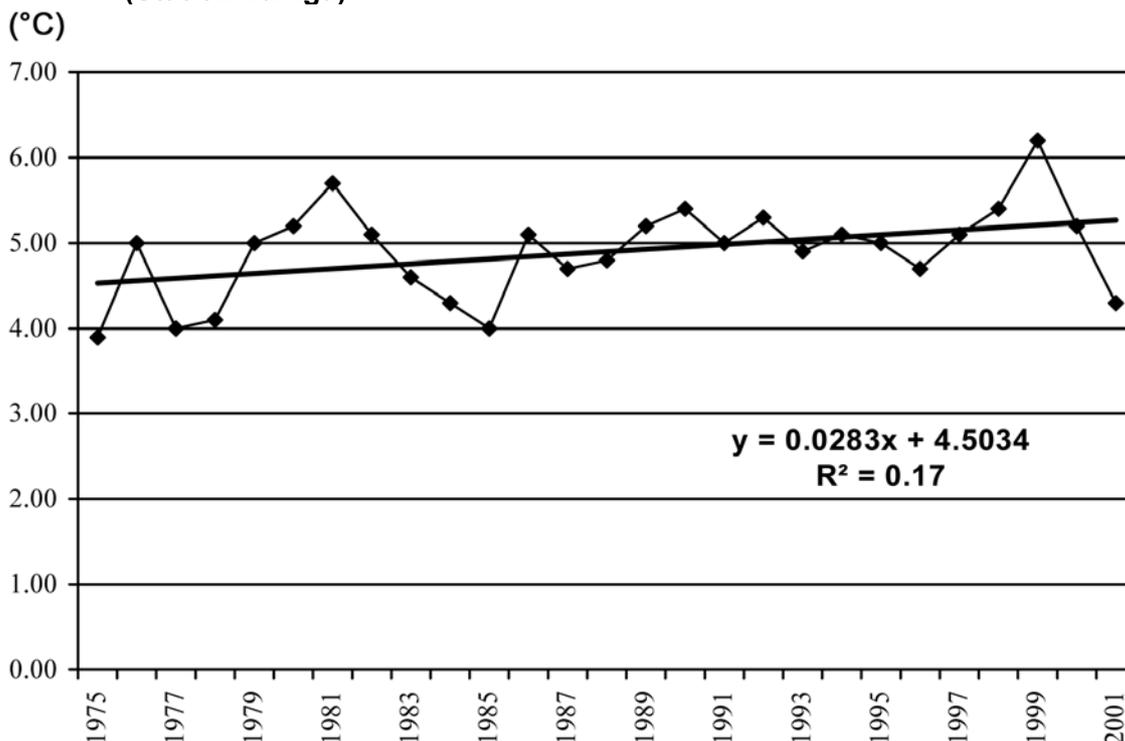
Eine solche Erhöhung der Wassertemperatur in großen Tiefen zeugt von einer Erhöhung des gesamten Wasservorrates. Sie steht zweifellos im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung seit Anfang der 70er Jahre, die in den 90er Jahren ihren Höhepunkt erreichte.

Der vertikale Wasseraustausch im See entsteht durch die Abkühlung im Winter. In milden Wintern kommt es bei niedrigen Temperaturen des Oberflächenwassers zu einem Absinken desselben und zu einer vollständigen Durchmischung der Wassermassen, verbunden mit einer guten Durchlüftung des Tiefenwassers. In warmen Wintern dagegen erfolgt die Durchmischung nur bis zu einer Tiefe von 200 bis 300 m. In Abbildung 20 ist die langjährige Entwicklung der mittleren Wassertemperatur an der Station Tamga im Februar, während des jährlichen Minimums, dargestellt.

Eine Erwärmung des Oberflächenwassers wird in Tamga seit 1975 registriert. Im Jahr 2001 betrug sie 0,8°C. Im Jahr 1985 wurde in der ersten Märzdekade in der Schicht

von der Oberfläche bis zu 200 m Tiefe mit 3,7°C zum ersten Mal eine Temperatur unter 4°C registriert. Es deutet jedoch einiges darauf hin, dass der Winter 1944/45 noch kälter war. Wie in der Monographie „Ozero Issyk-Kul“ berichtet wird, gefror in diesem Jahr die gesamte Bucht von Rybače, obwohl sich hier in normalen Wintern nur entlang eines Küstenstreifens von bis zu 100 m Breite Eis bildet.

Abb. 20: Entwicklung der Wassertemperatur des Issyk-Kul' im Februar 1975-2001 (Station Tamga)



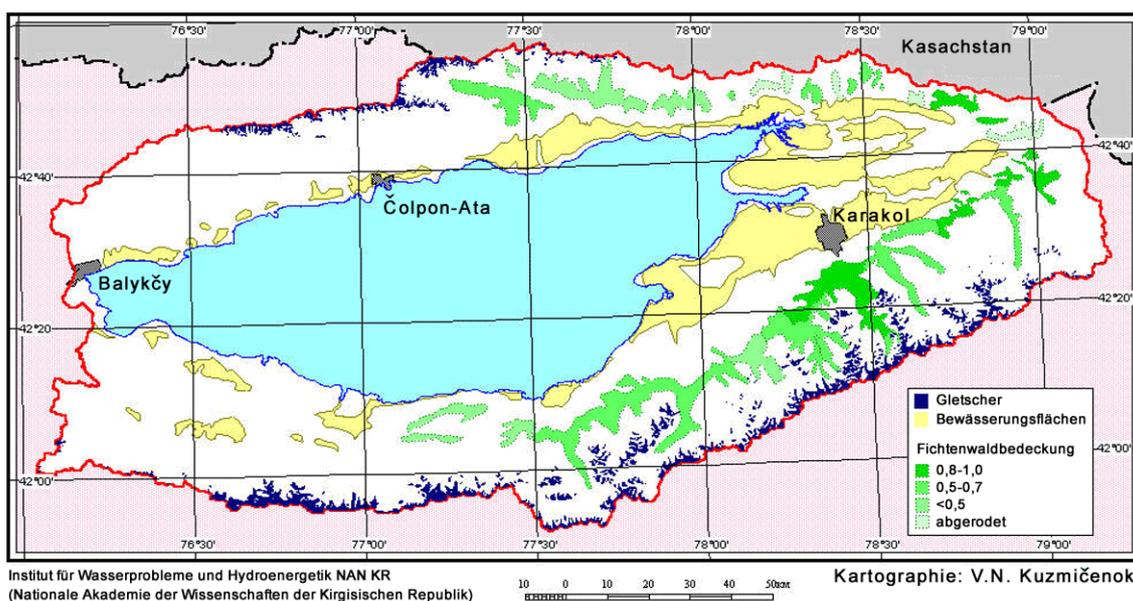
7. Wasserverbrauch durch Bewässerung

Das Issyk-Kul'-Becken erstreckt sich über ca. 250 km in west-östlicher Richtung und über ca. 150 km von Nord nach Süd. Die Gesamtfläche von 22 080 km² lässt sich nach physisch-geographischen Gesichtspunkten in drei Zonen einteilen. Der See bedeckt 6236 km², weitere 3092 km² nehmen die an den See grenzenden Ebenen, die als Zone der Abflussverteilung bezeichnet werden, ein. Das Gebirge, die Zone der Abflussbildung, stellt mit 12752 km² den größten Landschaftsteil dar. Dort, wo die Flüsse vom Gebirge in die Ebene eintreten, beginnt die Grundwasserbildung und die Hauptwasserentnahme für die Bewässerung.

Der Bewässerungsfeldbau ist der größte Wasserverbraucher im Issyk-Kul'-Becken, er stört das natürliche Verhältnis zwischen oberirdischem und dem unterirdischem Zufluss. Landwirtschaftliche Bewässerung begann bereits im 19. Jahrhundert, im Jahr 1930 betrug die Bewässerungsfläche ungefähr 500 km². In den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte sich der Bewässerungsfeldbau besonders intensiv, Mitte der 80er Jahre wurden 1540 km² bewässert. Die aktuelle Verteilung der Bewässerungsflächen ist in Abbildung 21 dargestellt.

Die wichtigsten Bilanzkomponenten im Bewässerungsfeldbau sind die Wasserentnahme und die Verdunstungsverluste, die dem System unwiederbringlich verloren gehen. Gegenwärtig gibt es keine verbindlichen Aussagen über den Umfang dieser unwiederbringlichen Verluste und über ihren Einfluss auf die Höhe des Seespiegels. Die Untersuchung derselben ist von besonderem Interesse, eben weil sie eine mögliche Ursache für Seespiegelabsenkungen des darstellen.

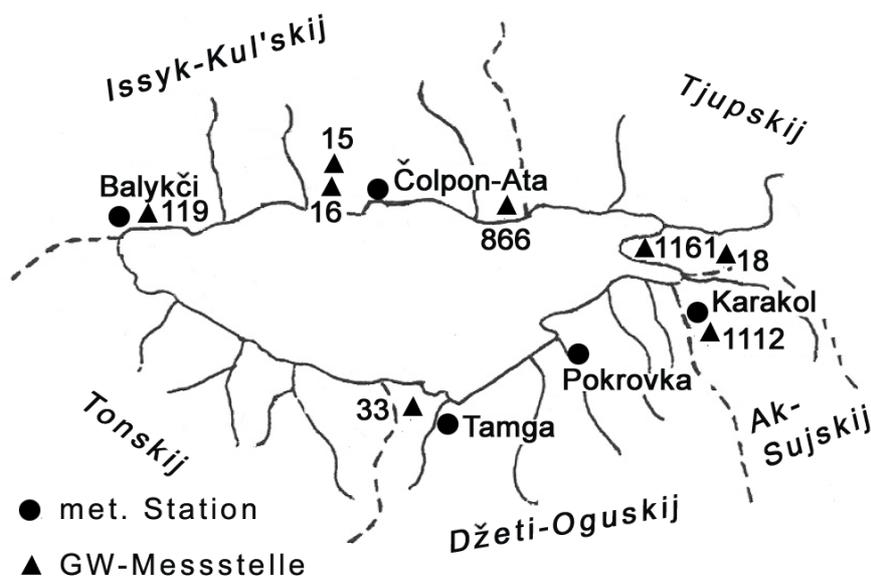
Abb. 21: Gletscher, Fichtenwälder und Bewässerungsflächen im Issyk-Kul'-Becken



In der Regel wurden an den Stellen, wo die Flüsse aus dem Gebirge kommend das Flachland erreichen, Bewässerungskanäle mit Abflusspegeln errichtet, an denen die Verteilung des Wassers erfolgt. Die Information über die tägliche Wasserentnahme aus den Flüssen geht an die Verwaltung des Bewässerungssystems (UOS). Diese UOS gibt es in jedem der fünf administrativen Einheiten (Rajone) des Beckens (Abb. 22).

Die erforderliche Höhe der Wasserentnahme hängt dabei nicht nur von der Menge des oberirdischen Zuflusses, sondern auch von der Niederschlagsmenge und der Bodenbeschaffenheit ab. So ist die Wasserentnahme im Rajon Tjupskij gering, da hier die höchsten Niederschläge im Becken auftreten und Schwarzerden vorherrschen, welche die Feuchtigkeit gut speichern können.

Abb. 22: Verwaltungseinheiten, meteorologische Stationen und Grundwassermessstellen



Die Bewässerungssysteme im Becken sind mehrheitlich einfache, offene Kanäle. In einzelnen Rajonen wurden fortschrittlichere Arten der Bewässerung eingeführt, nämlich Furchenbewässerung und Beregnung. Die Daten in Tabelle 10 belegen den geringen technischen Standard der Hauptbewässerungskanäle, von denen 85% Erdkanäle mit besonders hohen Infiltrationsverlusten sind.

Der Nutzungskoeffizient (KPD) hängt von der Art des Wassertransports von der Hauptwasserentnahme bis zum Bewässerungsfeld und von der Bewässerungstechnik ab. Nach Berechnungen von Kaplinkij und Kosuchina (1974) betrug der KPD der Bewässerungssysteme im Zeitraum 1946–1965 0,32–0,34. In der Arbeit von Ratkovič (1977) ist der KPD gleich 0,43, bei Gronskaja (1983) beträgt er für den Zeitraum 1976–1980 0,48.

Tab. 10: Länge und Art der Bewässerungskanäle im Issyk-Kul'-Becken und die Wasserentnahme für Bewässerung in den einzelnen Rajonen (1971-1983)

Rajon	insgesamt (km)	Erdkanäle (%)	Betonierte Kanäle (%)	Wasserentnahme für Bewässerung (1000 m ³)
Tonskij	650	73	27	0,18
Džeti-Oguskij	864	89	11	0,41
Ak-Suskij	908	93	7	0,39
Tjupskij	413	93	7	0,11
Issyk-Kul'skij	785	77	23	0,28
Gesamtes Becken	3619	85	15	1,37

Das GGI in St. Petersburg berechnete den Wasserverlust in den Kanälen durch Verdunstung und Infiltration (Davydova, 1986). Die Verdunstung wird nach der Ivanov-Formel (S. 14) mit Monatswerten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit berechnet. Infiltrationsverluste Φ_K (m/d) wurden nach folgender Formel berechnet:

$$\Phi_K = \gamma_\phi Q_B / F_B$$

γ_ϕ Infiltrationskoeffizient

Q_B Wasserentnahme

F_B Bewässerungsfläche

Für die Rajone wurden folgende mittlere Infiltrationskoeffizienten festgelegt: Tonskij – 0,40, Džeti-Oguzkij – 0,56, Ak-Suuskij, - 0,0,70, Tjupskij – 0,0,66 und Issyk-Kul' – 0,57. Die somit berechneten Infiltrationsverluste betragen für den Rajon Tonskij 0,9 m/d, für Džeti-Oguzkij 1,5 m/d, für Ak-Suuskij, 1,9 m/d, für Tjupskij 1,0 m/d und für Issyk-Kul' 1,4 m/d.

Die resultierenden Wasserverluste in den Bewässerungskanälen (Infiltrationsverlust + Verdunstungsverlust) sind in Tabelle 11 aufgeführt. Subtrahiert man sie von der Gesamtwasserentnahme Q_g , so erhält man die Wassermenge, die die Felder erreicht (Q_{netto}).

Die Infiltrationsverluste auf den Feldern wurden nach den Infiltrationsraten (m/d) für jeden Rajon berechnet (Tabelle 11). Die Infiltrationsverluste auf den Bewässerungsfeldern schwanken in den einzelnen Rajonen zwischen 34% und 54% der Wasserentnahme. Wenn man die Infiltrationsverluste in den Kanälen mit berücksichtigt, dann liegt die gesamte Infiltration in den Bewässerungssystemen zwischen 40 und 70 %, im Durchschnitt beträgt sie etwa 60%.

Die Verdunstungsverluste von den Bewässerungsfeldern wurden berechnet, nachdem die Verluste in den Kanälen bereits subtrahiert wurden, sie liegen in den einzelnen Rajonen zwischen 20 und 50% der Gesamtwasserentnahme. Wegen der hohen relativen Luftfeuchte und der hohen Niederschlagsmenge ist die Verdunstung im Westen des Beckens, in Tjupskij und in Ak-Suuski, am geringsten. In Tonskij erreicht sie bei einer geringen relativen Luftfeuchte und geringen Jahresniederschlägen die Hälfte der Gesamtwasserentnahme. Unter Berücksichtigung der Verluste in den Kanälen verdunstet im Issyk-Kul'-Becken durchschnittlich 40% des entnommenen Wassers.

Tab. 11: Der Wasserverbrauch in den Bewässerungssystemen des Issyk-Kul'-Beckens

Rajon	Verdunstungsverluste in den Kanälen, E_K		Infiltrationsverluste in den Kanälen, Φ_K		Wasserzufuhr auf die Felder, Q_{netto}	Infiltration auf den Feldern, Φ_F		Verdunstung auf den Feldern, E_F	
	1000 m ³	% von Q_B	1000 m ³	% von Q_B	1000 m ³	1000 m ³	% von Q_B	1000 m ³	% von Q_B
Tonskij	13420	7,6	14450	8,1	148754	59501	33,6	89253	50,5
Džeti-Oguskij	22860	5,5	41825	10,2	345128	207077	50,5	138051	33,6
Ak-Suskij	34940	8,8	98890	25,0	260685	182479	46,2	78206	19,8
Tjupskij	5866	5,5	19100	17,9	81647	57153	53,6	24494	22,9
Issyk-Kul'skij	24270	8,6	34455	12,3	221158	132695	47,4	88463	31,6
gesamt	101356	7,2	20872	14,7	1057372	638905	46,3	418467	31,7

8. Der unterirdische Zufluss in den Issyk-Kul'

Es existieren drei Grundwasserstockwerke, ein oberes, ein mittleres und ein unteres. Das am besten erforschte obere besteht aus quartären Ablagerungen unterschiedlicher Entstehung und Wasserdurchlässigkeit, in denen mächtige Grundwasserleiter ausgebildet sind. Die beiden anderen Stockwerke sind nur wenig erforscht.

Das obere Grundwasserstockwerk wird durch Infiltration des oberirdischen Abflusses,

der Bewässerungskanäle und der Bewässerungsfelder gespeist. Niederschläge und Verdunstung von oberflächennahen Grundwasserkörpern spielen eine unbedeutende Rolle.

Der unterirdische Zufluss in den See beträgt nach Meinung verschiedener Autoren 0 bis 4,2 m³/s. Die Möglichkeit des Einlaufens von tiefem unterirdischem Wassers in das obere Grundwasserstockwerk kann nicht ausgeschlossen werden, allerdings liegt dieser Anteil sicher deutlich unter der Infiltration von der Oberfläche.

Die Menge des unterirdischen Zuflusses wurde durch zwei Methoden abgeschätzt: nach der Darcy-Gleichung und nach der Bilanz des unterirdischen Wassers. Die Berechnung des Zuflusses nach Darcy wurde von der Kirgisischen Hydrogeologischen Expedition durchgeführt. Dabei wurde der natürliche Zufluss des unterirdischen Wassers durch die Grundwasser-Isohypsen in Seenähe bestimmt. Der Grundwasserstrom wurde für 48 einzelne Blöcke berechnet, danach wurden die Ergebnisse summiert. Für jeden Block wurden der Infiltrationskoeffizient des Grundwasserleiters und die Neigung der Grundwasseroberfläche ermittelt. Den Infiltrationskoeffizienten erhält man als arithmetisches Mittel der Einzelwerte. Auf diese Weise wurde der unterirdische Zufluss in den See mit 62,76 m³/s berechnet.

Die Bilanzierungsmethode ist eine Kontrolle der Berechnung des unterirdischen Abflusses.

Für die Berechnung des Koeffizienten der Infiltrationsverluste in den Flussbetten (Tabelle 11) wurde folgende Formel verwendet:

$$K = \frac{Q_g - Q_M - Q_B}{Q_g - Q_B}$$

Q_g = Abfluss am Oberlauf des Flusses (beim Eintritt in die Ebene)

Q_M = Abfluss an der Mündungen in den See

Q_B = Wasserentnahme für Bewässerung

Die benötigten Daten sind teilweise im Nachschlagewerk „Jährliche Daten über das Regime und die Ressourcen des Oberflächenwassers auf dem Festland“ veröffentlicht, leider nicht für alle Flüsse und nur für die Periode 1978 bis 1985.

Auf diese Weise konnten die Koeffizienten der Infiltrationsverluste für die Flüsse Čon-Aksu (Nordufer), Tossor (Südufer), Džergalan, Karakol, Džety-Oguz, Barskaun und Ak-Terek berechnet werden (Tabelle 11). An den südöstlichen Flüssen Karakol und Džety-

Oguz können die Infiltrationskoeffizienten nur bei niedrigem Grundwasserstand im Juni und Juli berechnet werden, in den übrigen Monaten ergibt der Term $Q_g - Q_M - Q_B$ negative Werte, auch im Winter, wenn kein Wasser für Bewässerungszwecke entnommen wird. Dies zeigt, dass in diesem Einzugsgebiet in der seenahen Ebene Abfluss nicht nur transformiert, sondern durch Niederschlag auch gebildet wird. An den Flüssen Barskaun und Ak-Terek sind die Koeffizienten der Infiltrationsverluste nur in den Wintermonaten berechenbar. Am Barskaun betragen sie im Dezember 0,76, im Januar 0,78 und im Februar 0,81, am Ak-Terek in den gleichen Monaten entsprechend 0,1, 0,25 und 0,22.

Tab. 12: Infiltrationskoeffizienten

Čon-Aksu													
Jahr	Monate												Jahr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1978	0,41	0,28	0,36	1,00	1,00	0,89	0,55	0,70	1,00	0,96	0,93	0,46	0,69
1979	0,42	0,40	0,46	1,00	1,00	1,00	0,92	0,73	0,91	0,95	0,86	0,73	0,77
1980	0,68	0,62	0,84	1,00	1,00	1,00	0,79	0,55	0,85	0,62	0,56	0,58	0,69
1982	0,34	0,44	0,57	0,83	1,00	1,00	0,83	0,39	0,64	0,46	0,29	0,62	0,51
1985	0,57	0,56	0,53	0,94	0,99	1,00	0,83	0,57	0,88	0,97	0,75	0,17	0,71
Mittel	0,48	0,46	0,55	0,95	1,00	0,98	0,78	0,59	0,86	0,79	0,68	0,51	0,67
Tossor													
1978													0,45
1979	0,39	0,17	0,36	0,3,4	0,46	0,44	0,03	0,53	0,04	0,62	0,93	0,05	0,35
1980	0,15	0,23	0,17	0,24	0,58	0,53	0,60	0,63	0,30	0,36	0,71	0,56	0,48
1981	0,47	0,15	0,39	0,56	0,02	0,18	0,28	0,02	0,44	0,38	0,41	0,40	0,28
1982	0,39	0,37	0,46	0,40	0,42	0,12	0,09	0,71	0,45	0,45	0,51	0,57	0,42
1984	0,33	0,37	0,31	0,61	0,53	0,33	0,22	0,46	0,71	0,59	0,50	0,46	0,45
1985													0,19
Mittel	0,35	0,26	0,34	0,66	0,40	0,32	0,24	0,51	0,39	0,48	0,61	0,41	0,37

Die Werte der Infiltrationskoeffizienten (K) stimmen gut mit der Karte des unterirdischen Abflusses (Hydrogeologie der UdSSR) überein. Die größten Verluste treten im Westen und Norden auf. Im Osten des Beckens liegt K weit unter 0, weil diese Region den engsten Zusammenhang zwischen Grund- und Oberflächenwassers aufweist.

Wenn man den Infiltrationskoeffizienten, den Wasserzufluss aus der Zone der Abfluss-

bildung und die Höhe der Wasserentnahme kennt, kann man mit großer Genauigkeit den oberflächlichen Zufluss in den See und die Infiltration berechnen.

Nach Berechnungen des GGI betragen die durchschnittlichen Infiltrationsverluste in den Flüssen im Zeitraum 1935–1978 $1,33 \pm 0,20 \text{ km}^3/\text{a}$, in den Bewässerungssystemen $0,61 \pm 0,20 \text{ km}^3/\text{a}$. Die Infiltration der Niederschläge in den Boden war mit $0,08 \pm 0,05 \text{ km}^3$ eher gering. Grundwasseraufstieg durch Kapillarsog ist auf einen engen Gürtel um den See mit geringem Grundwasser-Flurabstand (bis 3 m) beschränkt und wird mit $0,13 \pm 0,03 \text{ km}^3$ angegeben. Tabelle 13 zeigt die Bilanz des unterirdischen Wassers im Issyk-Kul'-Becken ist nach verschiedenen Autoren.

Tab. 13: Bilanz des unterirdischen Wassers im Issyk-Kul'-Becken nach verschiedenen Autoren

Bilanzposten	Kaplinskij (1974)	Verwaltung der Geologie der Kirgisischen SSR	GGI-1	GGI-2
eingehend:				
Flusswasserinfiltration	46,93	47,25	42,3	42,3
Infiltration in Bewässerungssysteme	15,82	17,01	19,3	19,3
Infiltration der Niederschläge	3,16	8,75	2,5	2,5
Zufluss des unterirdischen Wassers	0	0	0	4,2
Ergebnis	65,91	73,01	63,8	68,3
ausgehend:				
„Verdunstung“ des Grundwassers	4,06	4,40	4,00	4,00
Zufluss in den See	61,85	68,61	59,8	64,3
Ergebnis	65,91	73,01	63,8	68,3
Fehler			$\pm 8,7$	$\pm 8,7$

9. Schwankungen des Grundwasserspiegels

Über die Dynamik des unterirdischen Zuflusses kann man sich anhand der Aufzeichnungen von Grundwassermessstellen, deren Lage in Abbildung 22 gezeigt wird, ein Urteil bilden. In der Zone der Grundwasserneubildung, im oberen Bereich des Flachlandes (1112), ist der Jahresgang des Grundwasserstandes im Vergleich zum oberirdischen Abfluss um einen Monat verschoben und fällt in den September (Abb. 23)

Am Nord- und Südufer des Issyk-Kul' wird der maximale Grundwasserstand im Oktober-November erreicht (Abb. 24), während er am nordwestlichen Ufer (119) im März auftritt und im Osten, auf den holozänen Terrassen der Halbinsel Suchoj Chrebet (1161), den Jahresgang des oberirdischen Abflusses mit Maximum im Juli nachzeichnet (Abb. 25).

Abb. 23: Jahresgang des Grundwasserspiegels an der Messstelle 1112

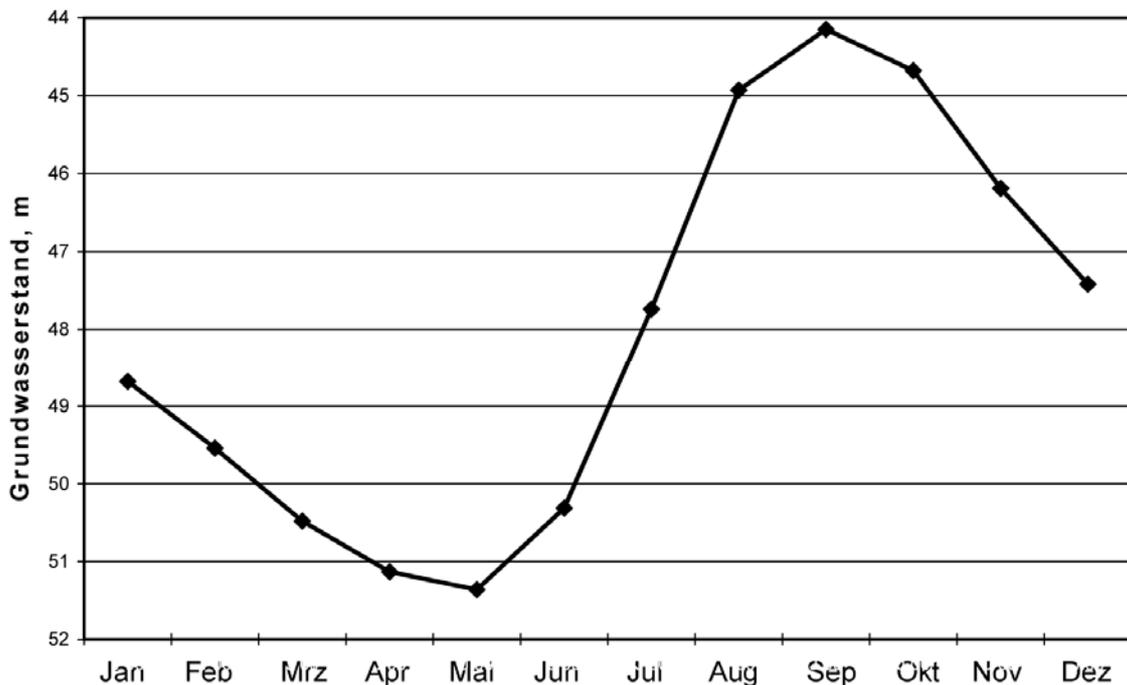


Abb. 24: Jahrgang des Grundwasserspiegels an den Messstellen 866, 16 und 15

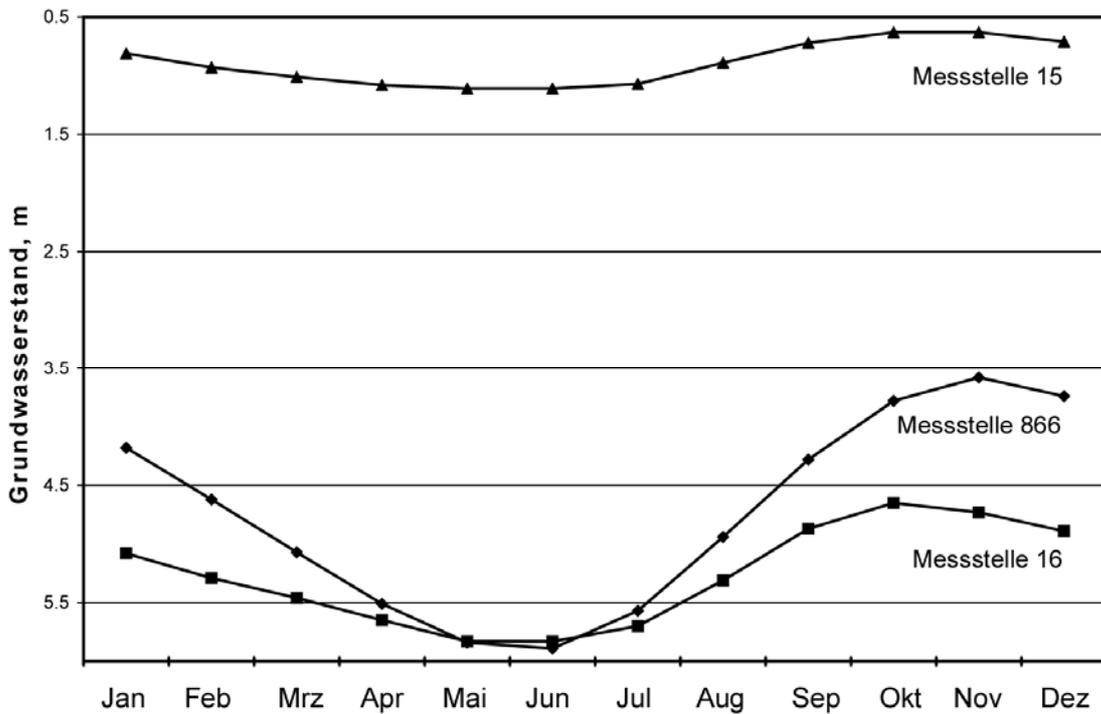
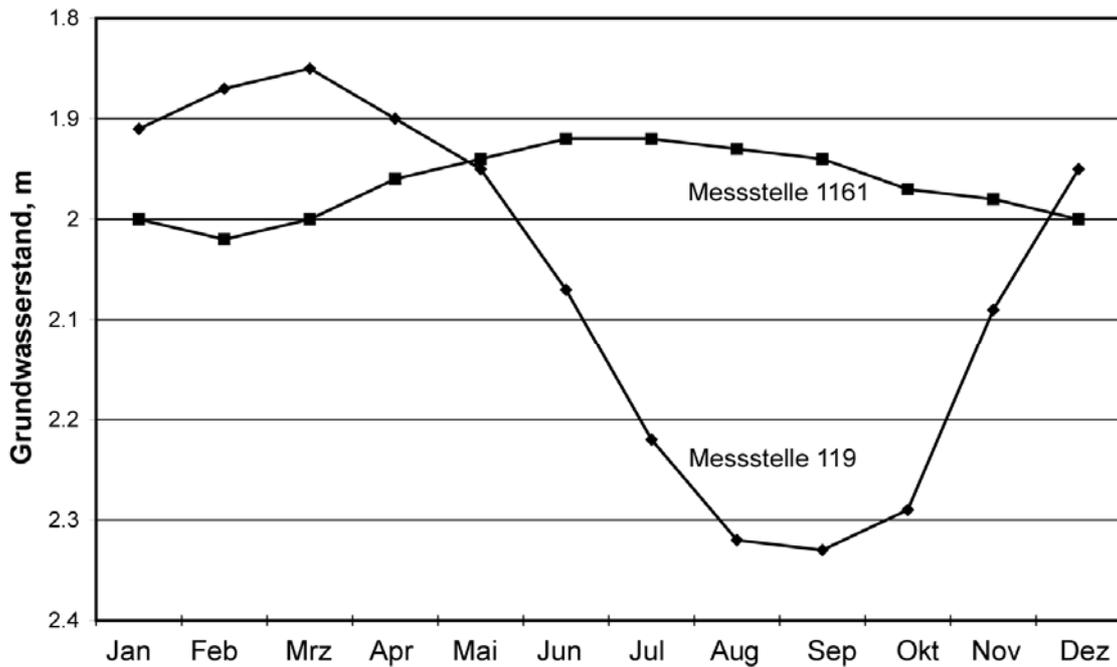


Abb. 25: Jahrgang des Grundwasserspiegels an den Messstellen 119 und 1161



Die saisonale Schwankungsbreite der Grundwasserstände erhöht sich mit zunehmender Entfernung vom See. So beträgt die durchschnittliche Amplitude des Wasserstan-

des an der Messstelle 15 (1609,1 m ü. M.) 0,48 m, an der Messstelle 16 (1615,0 m ü. M.) 1,18 m, an der Messstelle 866 (1630,3 m ü. M.) 2,31 m und an der Messstelle 1112 (1743,0 m ü. M.) 7,21 m. An der Messstelle 866 betrug die Amplitude im Jahr 2002 5,02 m mit einem Minimum von 5,09 m am 25. Mai und einem Maximum von 0,07 m am 1. November. Dieser geringe Flurabstand spiegelt den gegenwärtig hohen Grundwasserstand im Gebiet des Ortes Anan'evu wieder, wo derzeit sowohl Privatbesitz als auch Industrie und Landwirtschaft zu Schaden kommen.

Abbildung 26 verdeutlicht den synchronen Gang der Grundwasserstände an den Messstellen 15, 16 und 866. Die Trendänderung um 1980 fällt dabei zeitlich mit der Verlangsamung der Seespiegelabsenkung zusammen. Vor allem die Schwankungen an der seenahen Messstelle 15 korrelieren stark mit den Seespiegelschwankungen (Abb. 27).

Der lineare Trend der Seespiegelhöhe beträgt im Zeitraum 1980-2002 -1,6 cm/a und am Pegel 15 -1,5 cm/a. Die Messstellen 16 und 866 verzeichneten im selben Zeitraum einen Trend von -2,6 cm/a bzw. -0,8 cm/a (Abb. 28).

Abb. 26: Jahresmittel des Grundwasserspiegels an den Messstellen 15, 866 und 16, 1962-2002

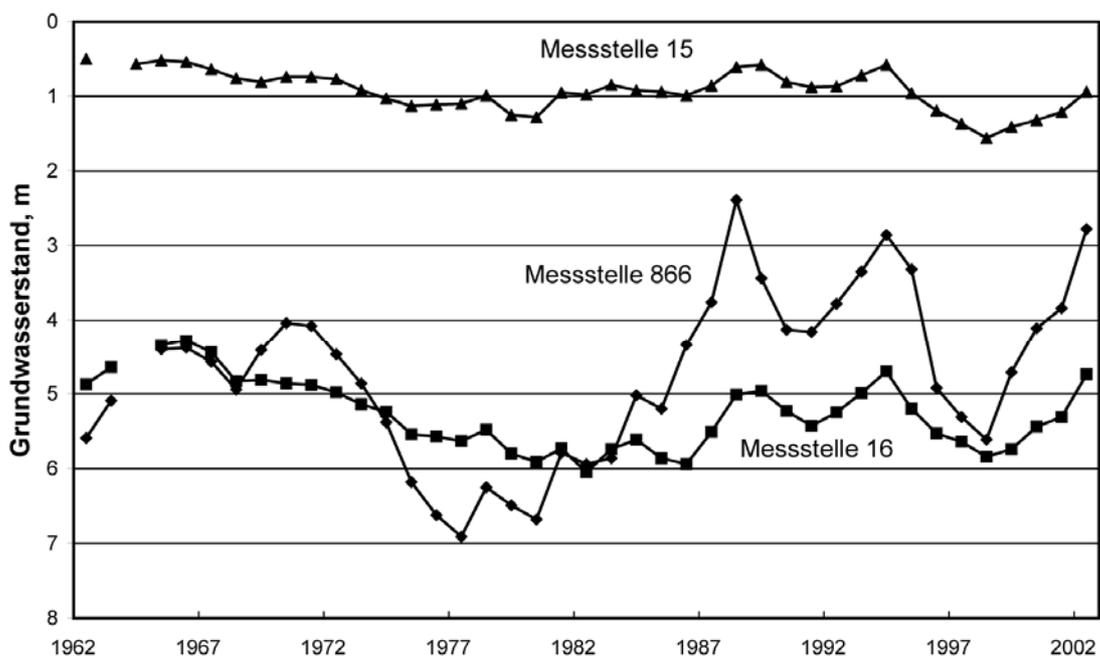
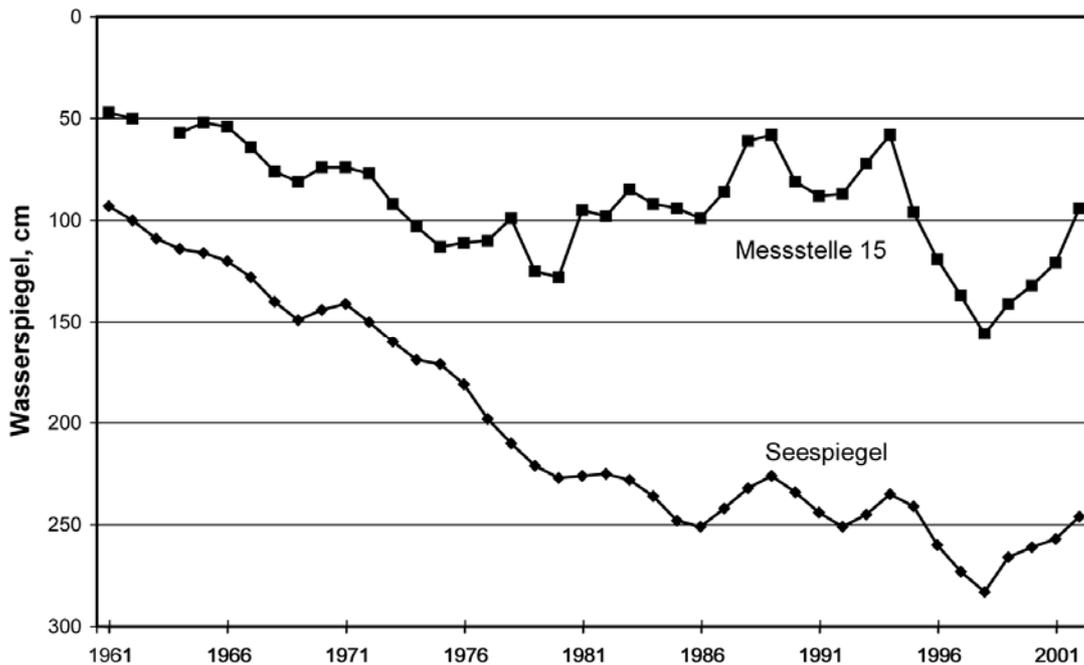
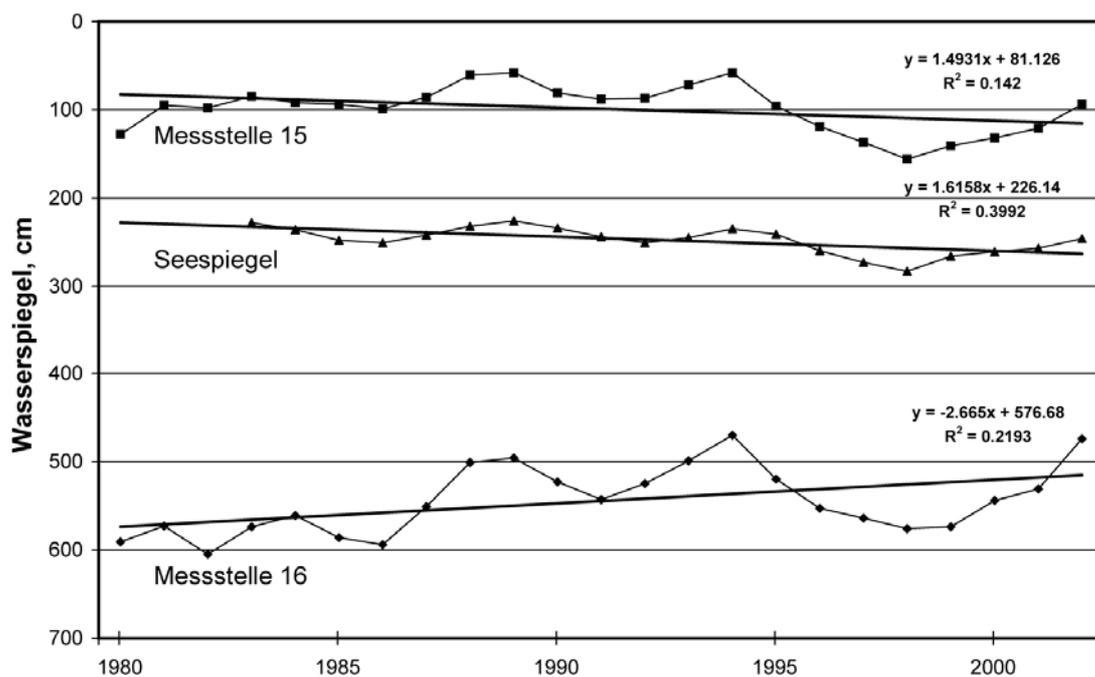


Abb. 27: Entwicklung des Seespiegels des Issyk-Kul' und des Grundwasserspiegels an der Messstelle 15



Auf diese Weise kam es am Nordufer des Issyk-Kul' mit zunehmender Entfernung vom See zu einer Erhöhung der Grundwasservorräte, die zeitlich mit einer Verlangsamung der Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' zusammenfällt.

Abb. 28: Trend des Grundwasserspiegels an den Messstellen 16, 15 und des Seespiegels des Issyk-Kul', 1980-2002



Das Bestimmtheitsmaß im Zusammenhang zwischen Seespiegelhöhe und Wasserstand beträgt im Zeitraum 1962–2002 am Pegel 15 (Abb. 29) 0,42 und am Pegel 16 (Abb. 30) 0,44. Von 1983 bis 2002 erhöht es sich am Pegel 15 bis auf 0,84 (Abb. 31).

Abb. 29: Zusammenhang zwischen dem Seespiegel des Issyk-Kul' und dem Grundwasserstand an der Messstelle 15, 1962–2002

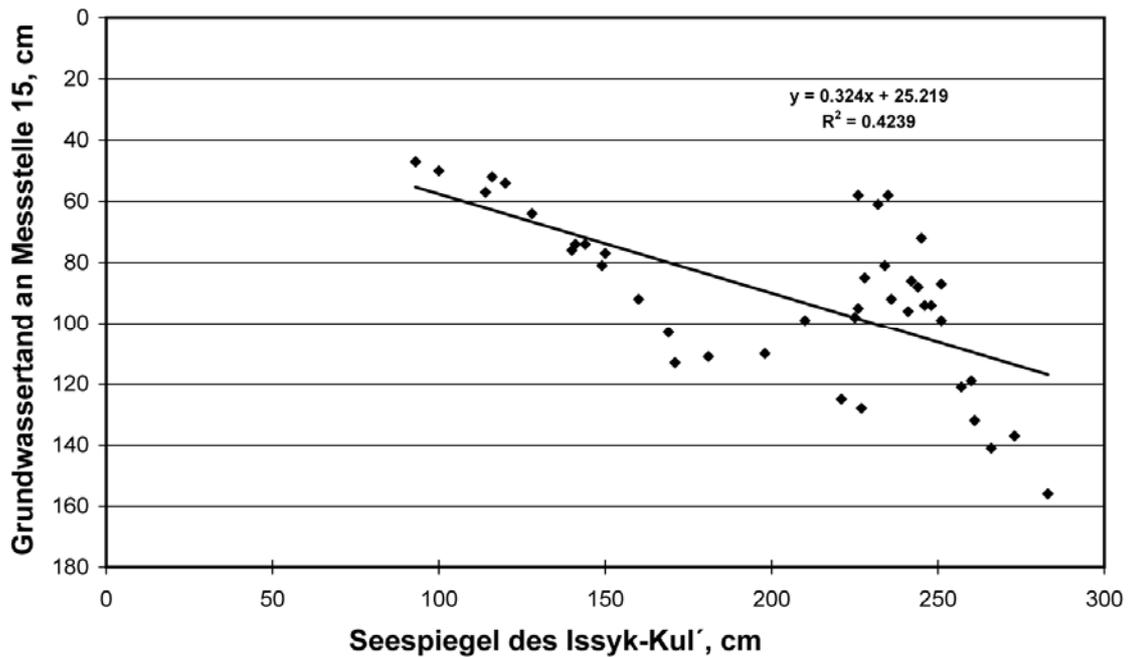


Abb. 30: Zusammenhang zwischen dem Seespiegel des Issyk-Kul' und dem Grundwasserstand an der Messstelle 16, 1962–2002

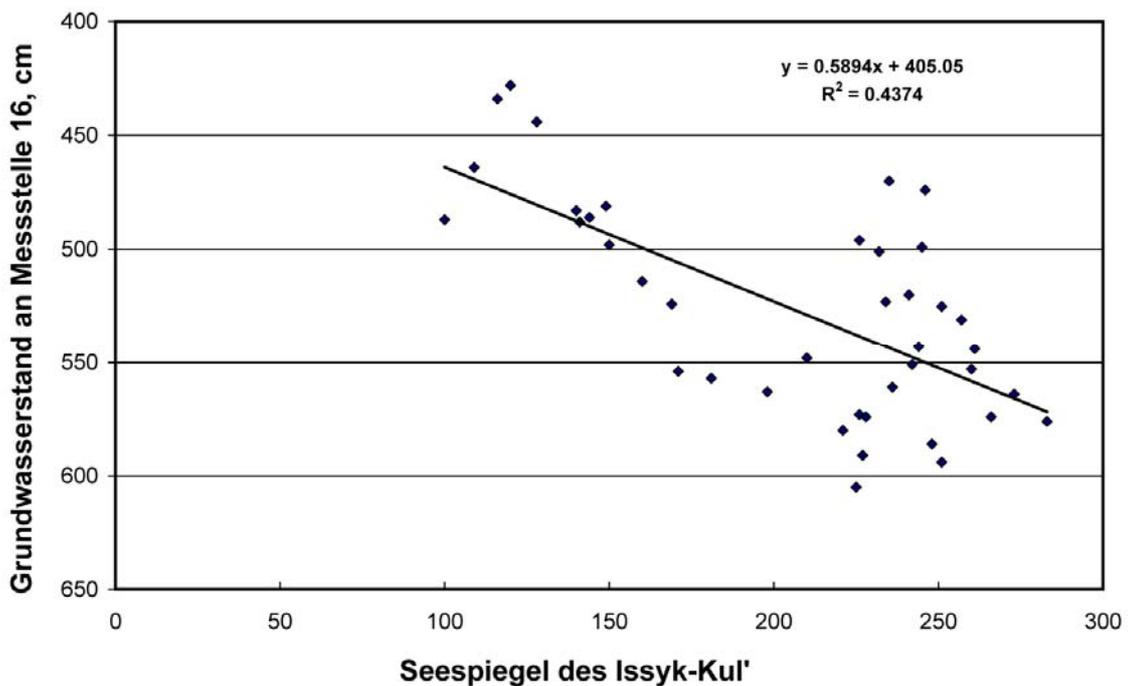
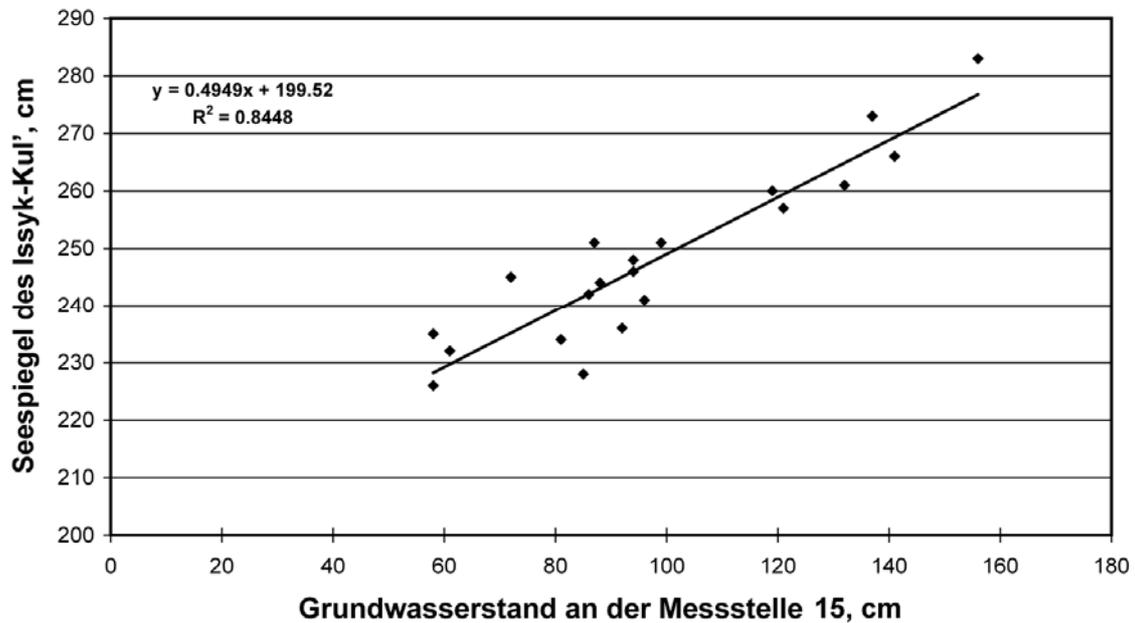


Abb. 31: Zusammenhang zwischen Seespiegels des Issyk-Kul' und dem Wasserstand an der Grundwassermessstelle 15 im Zeitraum 1983 – 2002



Ebenfalls hoch ist die Korrelation zwischen den Messstellen 15 und 16 ($R^2 = 0,55$, Abb. 32). Zwischen den Pegeln 16 und 866 ist der Zusammenhang im Zeitraum 1962–2002 (Abb.33) relativ niedrig ($R^2 = 0,29$), während der letzten beiden Jahrzehnte (1980–2002) erhöht sich das Bestimmtheitsmaß allerdings auf $R^2 = 0,77$ (Abb. 34).

Abb. 32: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 15 und 16, 1964 - 2002

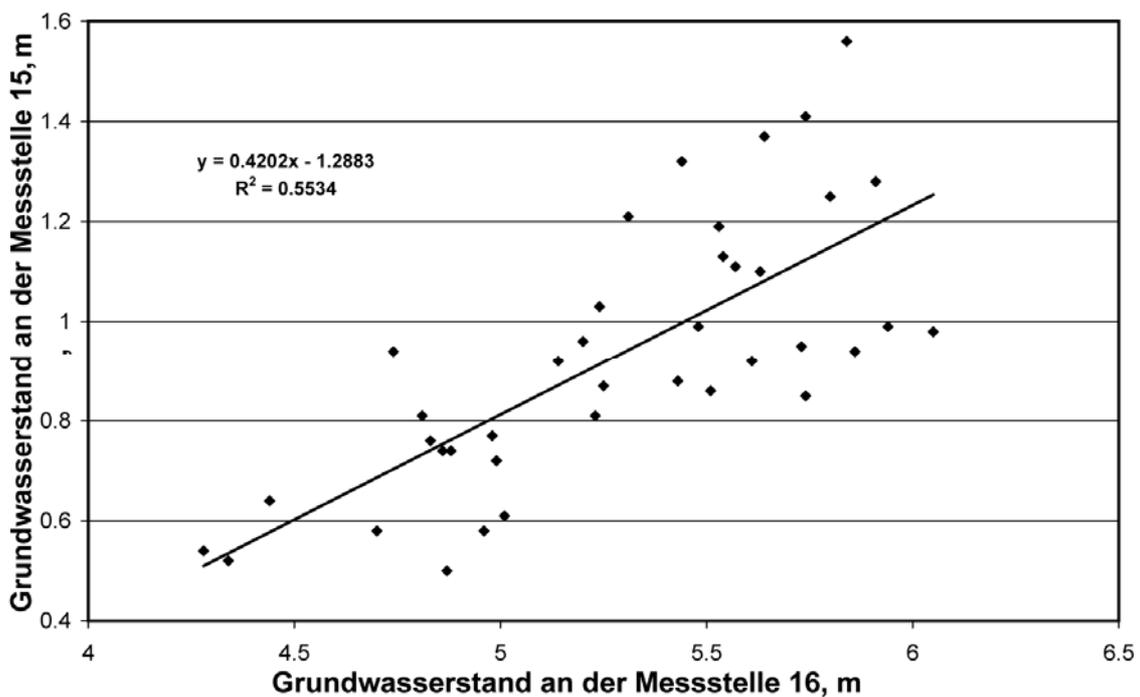


Abb. 33: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 16 und 866, 1962–2002

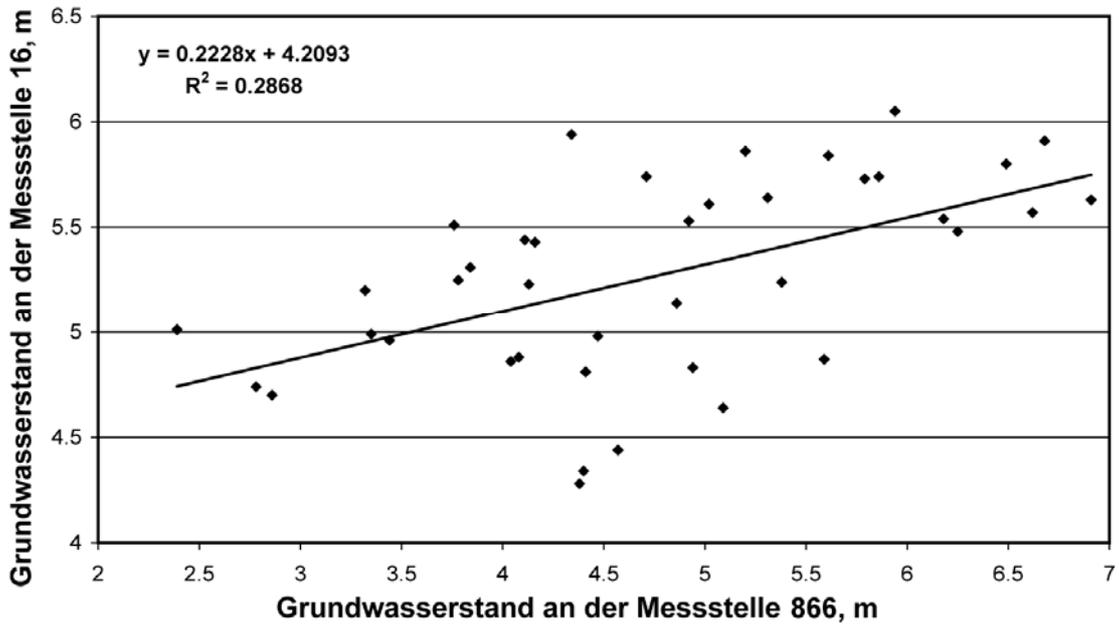
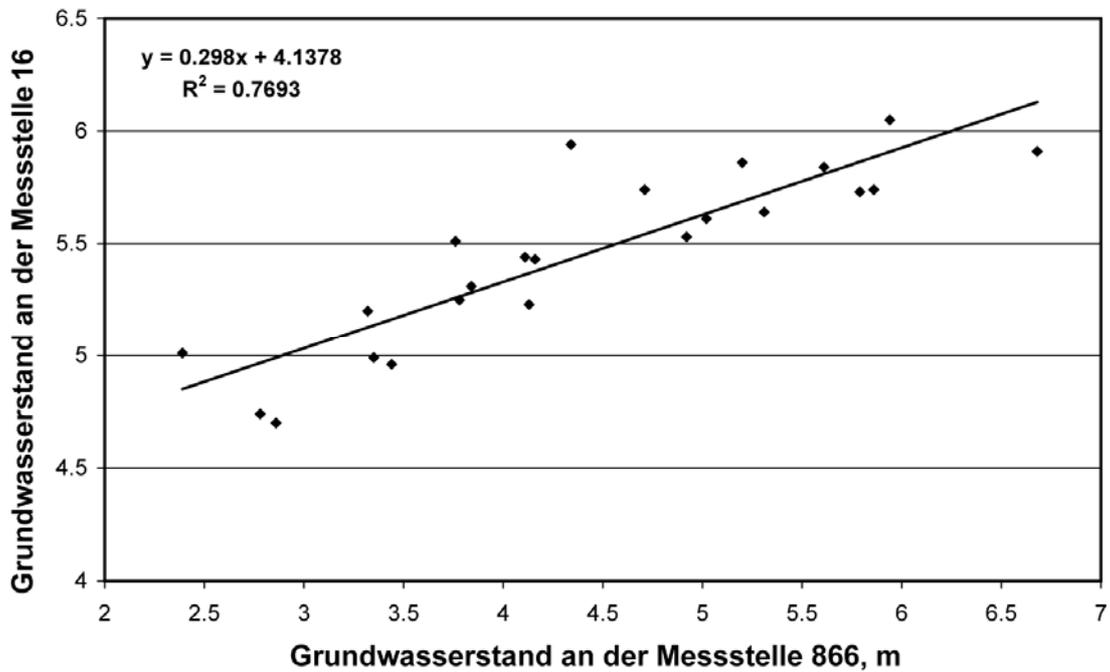


Abb. 34: Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand an den Messstellen 16 und 866 (1980–2002)



In Abb. 35 wird deutlich, dass die Kurven des Jahresniederschlags der Station Čolpon-Ata und des Grundwasserstands an der Messstelle 866 eine Parallelität aufweisen, aber zeitlich um ein Jahr versetzt sind. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang im Zeitraum 1985–2001 (Abb. 36).

Abb. 35: Grundwasserstand an der Messstelle 866 und Jahresniederschlag an der Station Čolpon-Ata

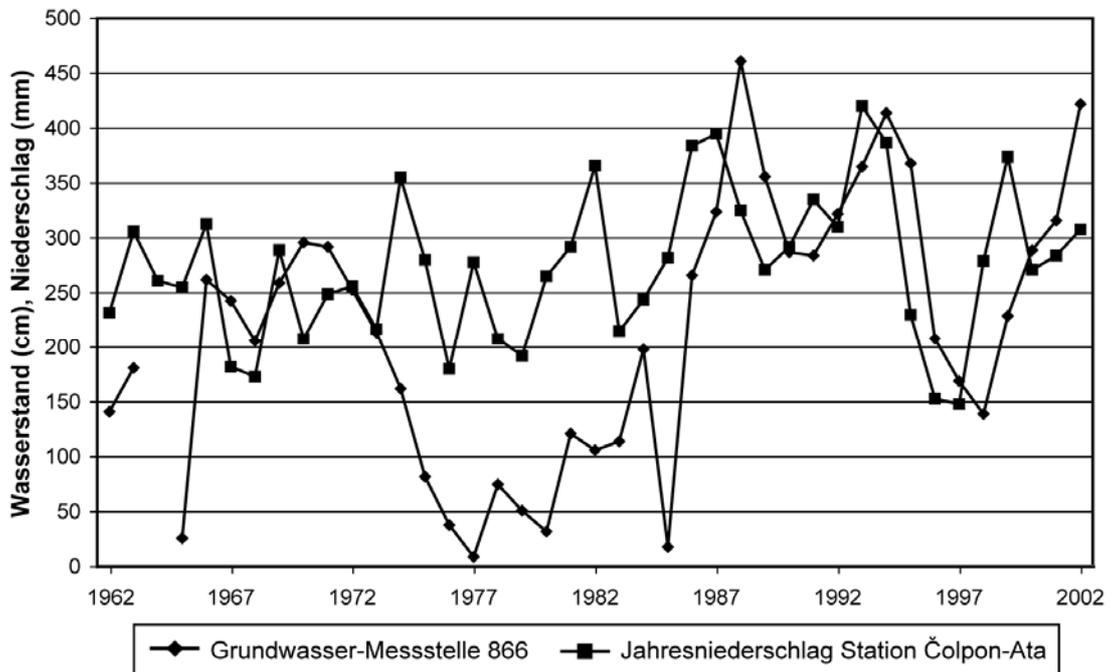
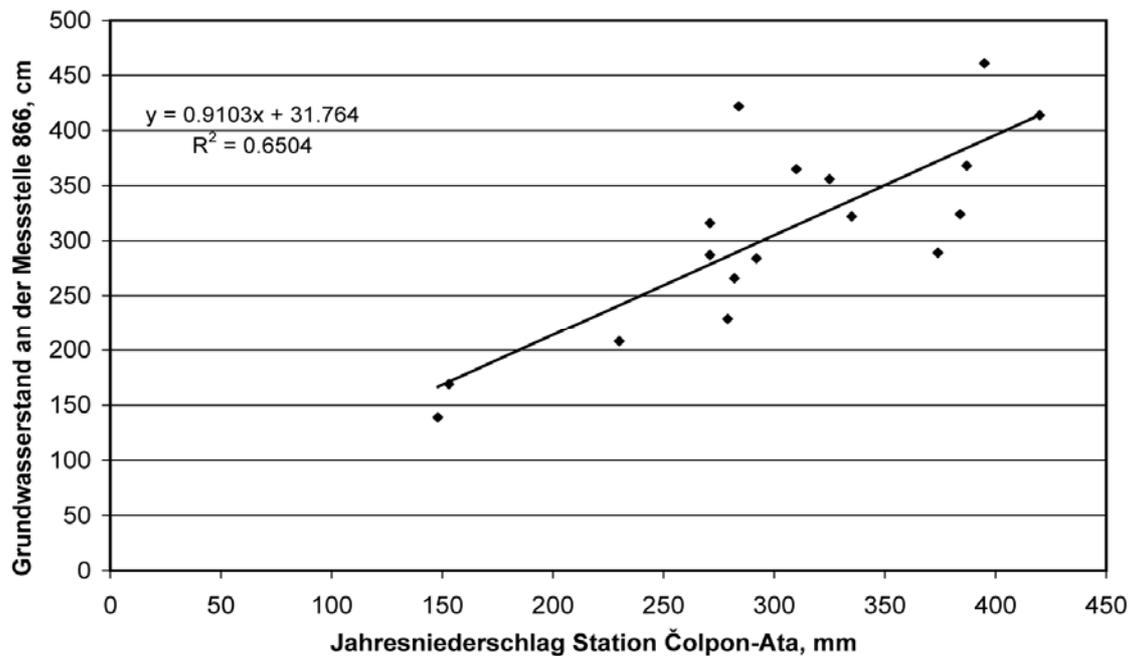


Abb. 36: Grundwasserstand an Messstelle 866 und Jahresniederschlag an der Station Čolpon-Ata. Zeitraum 1985 – 2001, um ein Jahr gegeneinander verschoben.



Der aktuelle Grundwasseranstieg an den Messstellen 866 und 16 ist demnach mit einem Anstieg der Niederschläge verbunden, der sowohl eine Erhöhung der Grundwasservorräte als auch eine Verlangsamung der Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' zur Folge hat. Die enge Korrelation zwischen Grundwasser und Niederschlag in der seenahen Ebene beweist, dass der infiltrierende Anteil der Niederschläge enorm groß ist. Nach Daten des GGI betrug der mittlere jährliche Zufluss aus der Gebirgszone im Zeitraum 1935–1978 $117,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Davon erreichten $40,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (34,7%) den See als oberflächlichen und $59,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (50,0%) als unterirdischen Zufluss, $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (14,8%) gingen für Bewässerung verloren. Wenn der unterirdische Abfluss den oberirdischen stark übersteigt (wie es in der Wasserbilanz des GGI und bei Kaplinskij und Timcenko 1977 dargestellt wurde), müssen Seespiegelschwankungen stark mit dem Grundwasserzustrom korrelieren. Weiterhin müsste das saisonale Maximum des Seespiegels im Oktober-November zu beobachten sein. Der Jahresgang des Seespiegels ist jedoch durch ein Minimum im Februar-März und einen Maximalstand im Juli-August charakterisiert und korreliert daher gut mit dem oberirdischen Abfluss. Das Maximum der Verdunstung von der Seeoberfläche und von der seenahen Ebene fällt in die Zeit von Juli bis September. Im November sinkt dann die Verdunstung auf dem See ab und geht auf den Bewässerungsflächen gegen Null, gleichzeitig erreicht der unterirdische Zufluss sein Maximum.

10. Die hydrologische Bilanz des Džergalan

Im Zeitraum 1981-1984 wurden am Unterlauf des Džergalan (Tabelle 14), Wasserhaushaltsuntersuchungen durchgeführt. In diesem Rahmen wurden der Abfluss aller Zuflüsse aus der Zone der Abflussbildung (Džergalan, Sovetskoe, Turgen'aksu, Aksu, Božučuk und Džerges) gemessen, wodurch sich nun Aussagen über den Zusammenhang zwischen Fluss- und Grundwasser machen lassen.

Im niederschlagsreichen Jahr 1981 (565 mm an der Station Karakol) betrug der Gesamtabfluss aller Zuflüsse aus der Gebirgszone $23,78 \text{ m}^3/\text{s}$ und am Messpegel Džergalan–Michajlovka $26,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Nach der Wasserentnahme für die Bewässerung verblieben nur noch $12,6 \text{ m}^3/\text{s}$. In den Jahren 1982 und 1983 war die Niederschlagsmenge durchschnittlich (432 und 428 mm), 1984 lag sie mit 404 mm etwas unter dem

Mittel. In diesen Jahren wurde an der untersten Station weniger Abfluss registriert als an den oberen Messstellen, die sich in der Zone der Abflussbildung befinden.

Das Einzugsgebiet des Džergalan in der seenahen Ebene unterhalb der Abflusspegel, die den Zufluss aus der Zone der Abflussbildung erfassen, nimmt eine Fläche von 1009 km² ein. Das Niederschlagsvolumen auf diese Fläche betrug 1981 0,57 km³ bzw. 18,1 m³/s, 1982 13,8 m³/s, 1983 13,7 m³/s und 1984 12,9 m³/s.

Die Wasserbilanzgleichung des Flusses besitzt im Bereich der Ebene folgende Form:

$$Q_g - Q_B + Q_B \alpha + P \beta = Q_M$$

α = Koeffizient der Abflussbildung durch Bewässerungswasser

β – Koeffizient der Abflussbildung durch Niederschläge.

Die Gleichungen für den Džergalan im feuchten Jahr 1981 und im trockenen Jahr 1984 lauten:

$$9,88 \alpha + 18,1 \beta = 12,6$$

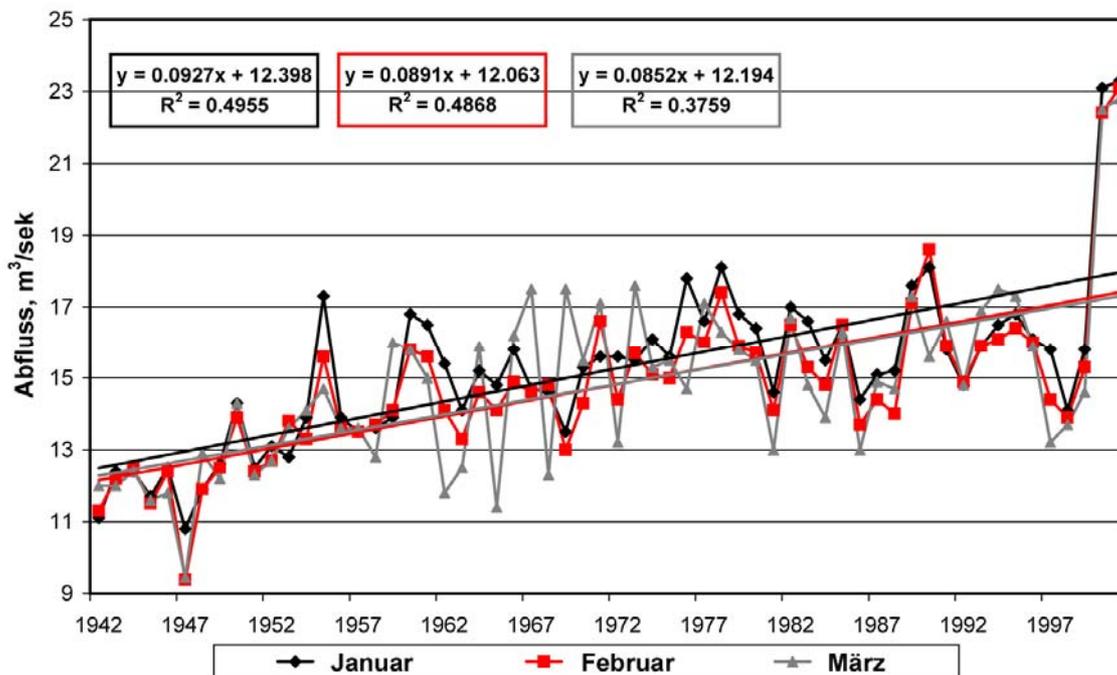
$$11,2 \alpha + 12,9 \beta = 9,51$$

Die Werte der Koeffizienten sind $\alpha = 0,13$ und $\beta = 0,63$.

Die Abflussbildung in der Ebene des Džergalan-Einzugsgebiets erfolgt demnach im wesentlichen durch Niederschläge, die sowohl unterirdische als auch oberirdische Speicher füllen. Der unterirdischen Komponente kommt offensichtlich die wichtigere Bedeutung zu. Die Ergebnisse bestätigen weiterhin, dass maximale Monatsabflüsse von Oktober bis März im Džergalan in den Jahren 1999–2000 und 2000–2002 zu beobachten sind, als die Wasserentnahme für die Bewässerung minimal war und die Niederschlagsmenge höher als im Mittel (Abb. 37).

Zu unbedeutenden Infiltrationsverlusten kommt es im Flussbett des Džergalan nur in der Zeit des niedrigen Grundwasserstands, wenn von Mai bis Juni die Grundwasserspeicher aufgefüllt werden. Der maximale Grundwasserzustrom in den See wird bei hohem Grundwasserstand im November beobachtet, gleichzeitig mit den höchsten negativen Abflusswerten ($Q_g - Q_M$).

Abb. 37: Langjährige Monatsmittel des Abflusses des Džergalan für Januar, Februar und März



Tab. 14: Die hydrologische Bilanz des Džergalan

Zuflüsse	Monate												Jahr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1981													
Dž. Sovet.	1,37	1,29	1,88	6,33	11,6	12	11,3	6,89	4,58	3,9	2,63	2,17	5,5
Turgen'	2,39	2,16	2,02	2,88	10,9	16,6	23,5	13,2	6,04	3,89	2,75	2,83	7,43
Aksu	2,35	2,16	2,39	3,19	10,1	14,4	19,4	13,4	6,31	4,3	3,79	3,23	7,08
Bozučuk	0,49	0,57	0,57	0,81	2,52	3,16	2,25	2,96	1,81	1,15	0,64	0,64	1,46
Džerges	0,55	0,62	0,73	1,88	3,91	4,26	4,11	3,88	2,4	2,11	1,9	1,41	2,31
Summe Q _g	7,15	6,8	7,59	15,09	39,03	50,42	60,56	40,33	21,14	15,35	11,71	10,28	23,78
Dž.Mich.Q _M	14,6	14,1	13	12	23	38,5	56,1	46,5	29,7	27,6	24,1	18,3	26,5
Q _g - Q _M	-7,45	-7,3	-5,41	3,09	16,03	11,92	4,46	-6,17	-8,56	-12,25	-12,39	-8,02	-2,72
Q _B	-	-	1,57	11,2	26,6	23,9	24,9	16,2	11,8	2,39	-	-	9,88
Q _g - Q _M - Q _B	-7,45	-7,3	-6,98	-8,11	-10,57	-11,98	-20,44	-22,37	-20,36	-14,64	-12,39	-8,02	-12,6
Q _g - Q _B	7,15	6,8	6,02	3,89	12,43	26,52	35,66	24,13	9,34	12,96	11,71	10,28	13,9
1982													
Dž. Sovet.	1,72	1,48	1,71	7,68	8,44	7,09	7,71	5,06	3,36	2,62	2	1,63	4,21
Turgen'	2,44	2,27	2,07	3,47	8	9,51	14,1	15,2	5,69	3,58	2,65	2,34	5,94
Aksu	2,71	2,42	2,49	3,64	7,59	9,22	15,6	15,6	5,49	3,81	3,35	3,12	6,25
Bozučuk	0,39	0,51	0,58	0,74	1,57	3,5	2,23	2,68	1,92	1,15	0,58	0,37	1,35
Džerges	1,25	1,25	1,36	1,8	2,57	2,54	2,92	3,31	2,26	1,76	1,37	1,34	1,98
Summe Q _g	8,51	7,93	8,21	17,33	28,17	31,86	42,56	41,85	18,72	12,92	9,95	8,8	19,73
Dž.Mich.Q _M	17	16,5	16,7	14,3	9,42	9,18	25	35,2	24,3	20,4	19,4	16,9	18,7
Q _g - Q _M	-8,49	-8,57	-8,49	3,03	18,75	22,68	17,56	6,65	-5,58	-7,48	-9,45	-8,1	1,03
Q _B	-	-	0,06	6,68	20,6	21,8	28	17,2	5,99	2,57	1,45	-	8,7
Q _g - Q _M - Q _B	-8,49	-8,57	-8,55	-3,65	-1,85	0,88	-10,44	-10,55	-11,57	-10,05	-10,9	-8,1	-7,67
Q _g - Q _B						10,06							
K						0,09							

(Q_g = Abfluss beim Eintritt in die Ebene; Q_M = Abfluss an der Mündungen in den See; Q_B = Wasserentnahme für Bewässerung)

Zuflüsse	Monate												Jahr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1983													
Dž. Sovet.	1,42	1,32	1,4	4,55	12	13,2	11,7	6,47	3,94	2,66	2,11	1,6	5,2
Turgen'	2,08	2,01	1,9	2,39	5,57	12,4	17,7	19	7,49	3,49	2,57	2,55	6,6
Aksu	2,47	2,16	1,99	2,55	5,48	10,6	14,8	17,2	7,08	4,19	3,75	3,29	6,3
Bozučuk	0,34	0,52	0,58	0,69	1,52	3,51	2,27	2,87	1,94	1,03	0,55	0,36	1,35
Džerges	1,32	1,23	1,25	1,24	1,22	2,54	2,83	2,72	2,23	2,18	1,84	1,41	1,83
Summe Q _g	7,63	7,24	7,12	11,42	25,79	42,25	49,3	48,26	22,68	13,55	10,82	9,21	21,28
Dž.Mich.Q _M	16,6	15,3	14,8	10,5	9,41	15,6	26,3	40,4	20,9	18,9	19,2	17,3	18,8
Q _g - Q _M	-8,97	-8,06	-7,68	0,92	16,38	26,65	23	7,86	1,78	-5,35	-8,38	-8,09	2,48
Q _B	-	-	0,44	7,53	16	24,7	29,6	19,3	12,8	7,17	1,63	-	9,93
Q _g - Q _M - Q _B	-8,94	-8,06	-8,12	-6,61	0,38	1,95	-6,6	-11,44	-11,02	-12,52	-10,01	-8,09	-7,45
Q _g - Q _B					9,79	17,55							
K					0,04	0,11							
1984													
Dž. Sovet.	1,22	1,19	1,89	5,3	12,7	10,5	6,86	4,27	2,75	2,03	1,8	1,35	4,32
Turgen'	2,04	1,92	1,93	2,86	6,29	14,9	14,1	15,9	5,73	2,49	2,02	2,01	6,01
Aksu	2,33	2,12	2,13	2,72	6,43	13,2	13,7	16,5	6,19	3,73	2,85	1,93	6,15
Bozučuk	0,3	0,5	0,56	0,68	1,29	3,54	2,28	2,45	1,94	1,09	0,57	0,27	1,29
Džerges	1,18	1,18	1,2	1,44	2,85	4,36	2,78	1,73	1,37	1,3	1,23	1,18	1,82
Summe Q _g	7,07	6,91	7,71	13	29,56	46,5	39,72	40,85	17,98	10,64	8,47	6,74	19,59
Dž.Mich.Q _M	15,5	14,8	13,9	12,4	11,3	22	19	33,5	17,8	18,3	19,4	16,5	17,9
Q _g - Q _M	-8,43	-7,89	-6,19	0,6	18,26	24,5	20,72	7,35	0,18	-7,66	-10,93	-9,76	1,69
Q _B	-	-	0,18	5,69	16,7	30,7	33,5	27,8	15	4,99	-	-	11,2
Q _g - Q _M - Q _B	-8,43	-7,89	-6,37	-5,09	1,56	-6,2	-12,78	-20,45	-14,82	-12,65	-10,93	-9,76	-9,51
Q _g - Q _B					12,86								
K					0,12								

(Q_g = Abfluss beim Eintritt in die Ebene; Q_M = Abfluss an der Mündungen in den See; Q_B = Wasserentnahme für Bewässerung)

11. Verdunstungsverluste

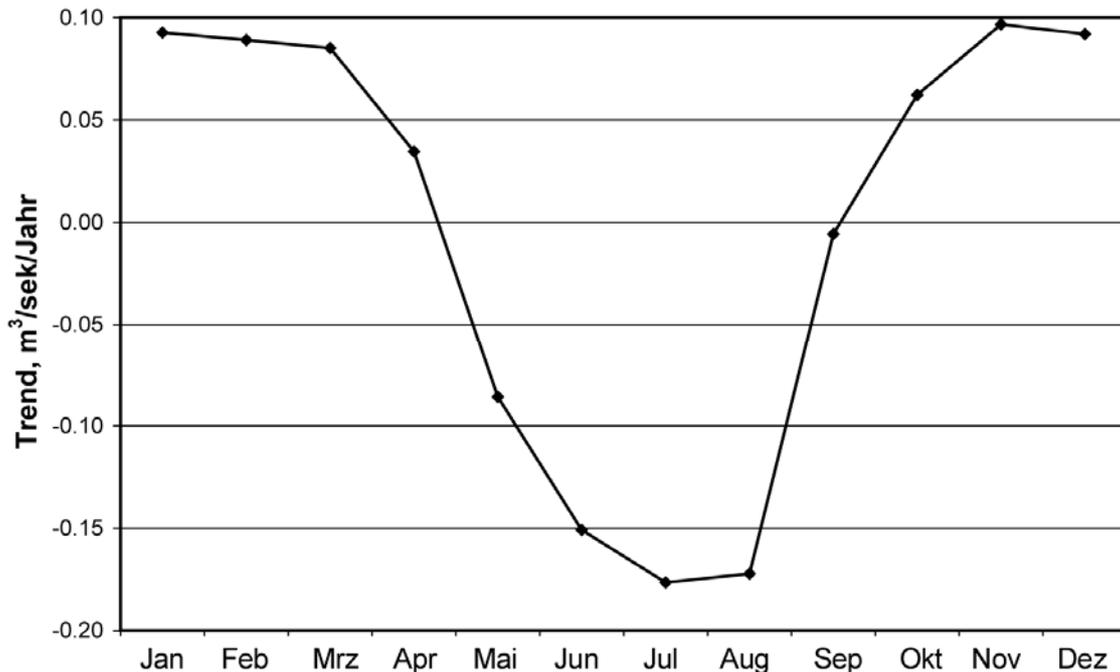
Der Jahresniederschlag in der Ebene beträgt im langjährigen Mittel 326 mm und variiert zwischen 258 mm (1967) und 443 mm (1981). Die Niederschläge fallen hauptsächlich von Mai bis August.

Der Aridität des Gebietes, also das Verhältnis des Niederschlags zur potenziellen Verdunstung, verringert sich von Osten, wo er noch zwischen 0,63 und 0,12 beträgt, in Richtung Westen. In allen Bereichen des Beckens übertrifft die potenzielle Verdunstung die Niederschlagsmenge bei weitem. Im trockeneren Westteil wird der gesamte Niederschlag schnell verdunstet, im Osten können die Niederschläge den oberirdischen Abfluss ergänzen oder zur Grundwasserneubildung beitragen. Insgesamt sind die Niederschläge in der Zone der Abflussverteilung aufgrund der Entwicklung des Bewässerungsfeldbaus jedoch nicht ausreichend.

Die Verdunstung von den Bewässerungsfeldern unterscheidet sich erheblich von der Verdunstung natürlicher, nicht bewässerter Flächen. Die Wasserhaushaltsgleichungen des GGI gehen davon aus, dass die Verdunstung von Bewässerungsflächen höher ist als diejenige von unbewässerten. Im Issyk-Kul'-Becken muss man die unwiederbringlichen Verdunstungsverluste von denen unterscheiden, die dem System erhalten bleiben. Wegen der hohen Gebirgsumrahmung wird nämlich ein Großteil des verdunsteten Wassers innerhalb des Beckens wieder kondensiert und als Niederschlag erneut in den Wasserhaushalt eingespeist, nur ein kleiner, schwer zu bestimmender Anteil wird advektiv aus dem Einzugsgebiet hinaus transportiert und geht somit dem Kreislauf verloren.

Nach Berechnungen von Bol'sakov (1982) betragen die unwiederbringlichen Verdunstungsverluste des gesamten Beckens im Zeitraum 1946–1974 nicht mehr als 3%, wovon nicht mehr als 2% auf den Bewässerungsfeldbau entfallen. Nach unseren Berechnungen betragen die unwiederbringlichen Verdunstungsverluste im Zeitraum 1979–2000 1,5%, diejenigen von Bewässerungsfeldern 0,6%. Laut GGI betragen die unwiederbringlichen Verluste von den Bewässerungsfeldern im gleichen Zeitraum 36% (Krivošej 1980, Gronskaja 1983), was offensichtlich deutlich überhöht ist. Im Džergalan, dem größten Fluss des Issyk-Kul'-Beckens, wurde im Zusammenhang mit der intensiven Wasserentnahme für die Bewässerung lediglich eine saisonale Verlagerung des Abflusses festgestellt. Von Mai bis August wurden ausschließlich negative Abweichungen beobachtet, von Oktober bis April jedoch positive (Abb. 38).

Abb. 38: Trend der mittleren Monatsabflüsse des Džergalan



Die maximalen Zugwinne wurden im November festgestellt und fallen damit zeitlich mit dem maximalen Grundwasserstand zusammen. Dem Abflusstrend des Džergalan zufolge erhöhte die Wasserentnahme von Mai bis August seit dem Jahr 1937 um 90 Mio. m³, von Oktober bis April erhöhte sich jedoch der Abfluss um 105 Mio. m³. Daraus resultiert eine leichte Erhöhung des Jahresabflusses, wodurch bewiesen wird, dass die Intensivierung des Bewässerungsfeldbaus in der Sowjetzeit nicht zu einer Erhöhung der unwiederbringlichen Verdunstungsverluste führte.

Die zunehmende Wasserentnahme bewirkte einen Anstieg des Grundwasserstandes auf den Bewässerungsflächen. An der Messstelle 18, in einer Höhe von 1650,56 m ü. M. nahe der Ortschaft Michajlovka, stieg der Grundwasserspiegel von 1962 bis 1995 um 13,4 m an.

Nach Daten des GGI hängt der Wassernutzungskoeffizient, also das Verhältnis aus zusätzlichem Verdunstungsverlust und Wasserentnahme, vom Jahresniederschlag ab.

$$K\delta\beta = \frac{\Delta E}{B}$$

In trockenen Jahren (80-130 mm) liegt der Wassernutzungskoeffizient bei 0,91-0,97, bei einer Niederschlagsmenge von 250-300 mm fällt er auf 0,48-0,63 ab und in außergewöhnlich feuchten Jahren (650 mm) geht er gegen Null. Es lässt sich indirekt nachweisen, dass die Verdunstung von den Bewässerungsflächen bei starken Niederschlägen geringer ist als von nicht bewässerten Flächen.

Anhänger der anthropogenen Hypothese der Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' (Kaplinskij, 1974, Ratkovič, 1977, Krivošej, 1980) sind der Meinung, dass die unwiederbringlichen Verluste durch Bewässerung zwischen 36 und 80% der Wasserentnahmen betragen. Die hydrologische Bilanz des Issyk-Kul' wird von diesen Autoren ohne Berücksichtigung der Wasserdampfzirkulation innerhalb des Becken und des An- oder Abtransportes von Luftmassen über die Kammlagen hinweg, bewertet. Diese methodischen Fehler und der Umstand, dass die durchschnittliche Verdunstung von den Bewässerungsfeldern ungefähr der Seespiegelabsenkung entspricht, führten die genannten Autoren zu der Schlussfolgerung, dass die Ausweitung der Bewässerung im 20. Jahrhundert die Hauptursache für die Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' ist.

Da die Verdunstungsverluste aus dem Issyk-Kul'-Becken nur beim Abtransport der Feuchtigkeit aus dem Becken heraus als unwiederbringlich betrachtet werden können, muss der externe Luftmassenaustausch als wichtigste Komponente der hydrologischen Bilanz und als eine Ursache für die Seespiegelabsenkung betrachtet werden.

Die Existenz eines solchen Austauschs wird von den Befürwortern der anthropogenen Hypothese zwar bestätigt (Kaplinskij 1974, 1978, Ratkovič 1977, Šninikov 1977, Krivošej 1980), aber quantitativ nicht berücksichtigt. Diese Arbeiten lassen den Schluss zu, dass dieser Prozess trotz der orographischen Geschlossenheit des Beckens stattfindet und dass er bei der Analyse des Wasserhaushalts des Beckens und des Sees beachtet werden muss.

Es ist bekannt, dass in Höhen von 3-5 km westliche Luftmassen vorherrschen. In den erdnahen Schichten der Atmosphäre, wo der Einfluss des Reliefs besonders stark ist, findet der externe Luftmassenaustausch im wesentlichen über niedrige Gebirgspartien statt, im Westen über den Boordu-Pass und im Osten über den Santaš-Pass. Dabei ist die Luftmassen von außen weniger wasserdampfgesättigt als diejenigen, die aus dem Becken heraus transportiert werden und lokale mit Feuchtigkeit angereichert wurden.

Die durchschnittliche jährliche Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' betrug im Zeitraum 1979-2000 1,8 cm/a, was einer Verringerung des Wasservolumens bzw. unwiederbringlichen Verdunstungsverlusten von und vergleichsweise gering ist. Beim externen Austausch von Wasserdampf geht man davon aus, dass der Antransport vernachlässigbar klein ist und die Bilanz von 0,14 km³/a dem Abtransport entspricht. Beim komplizierten Prozess des Abtransportes von Wasserdampf aus dem Becken spielt die lokale Luftfeuchtigkeit, die sich durch die Verdunstung von allen Oberflächen ergibt und die in Tabelle 15 aufgelistet sind, eine entscheidende Rolle.

Tab. 15: Verdunstung über verschiedenen Oberflächen im Issyk-Kul'-Becken

	Fläche, km ²	Verdunstung		
		mm	km ³	%
Seeoberfläche	6236	910	5,67	59,6
Flachland ohne Bewässerung	1552	350	0,54	5,7
Bewässerungsflächen	1540	450	0,69	7,3
Gebirge	12752	205	2,61	27,4
Gesamt	22080	-	9,51	100

Aus Tabelle 15 kann man entnehmen, dass die gesamte jährliche Wasserdampfmenge, die sich durch die Verdunstung bildet, 9,5 km³ beträgt. Der Anteil des Wassers aus Bewässerungsflächen beträgt nur 7,3% und ist für den gesamten Wasserdampfhaushalt nur von geringer Bedeutung.

Die gesamten unwiederbringlichen Verdunstungsverluste von durchschnittlich 0,14 km³ entsprechen 1,5% des gesamten Wasserdampfgehalts des Issyk-Kul'-Beckens, der Anteil von den Bewässerungsfeldern beträgt etwa 0,01 km³. Von der gesamten Wasserentnahme für Bewässerung Mitte der 1980er Jahre (1,54 km³) gingen nur 0,6% unwiederbringlich durch advektiven Abtransport verloren.

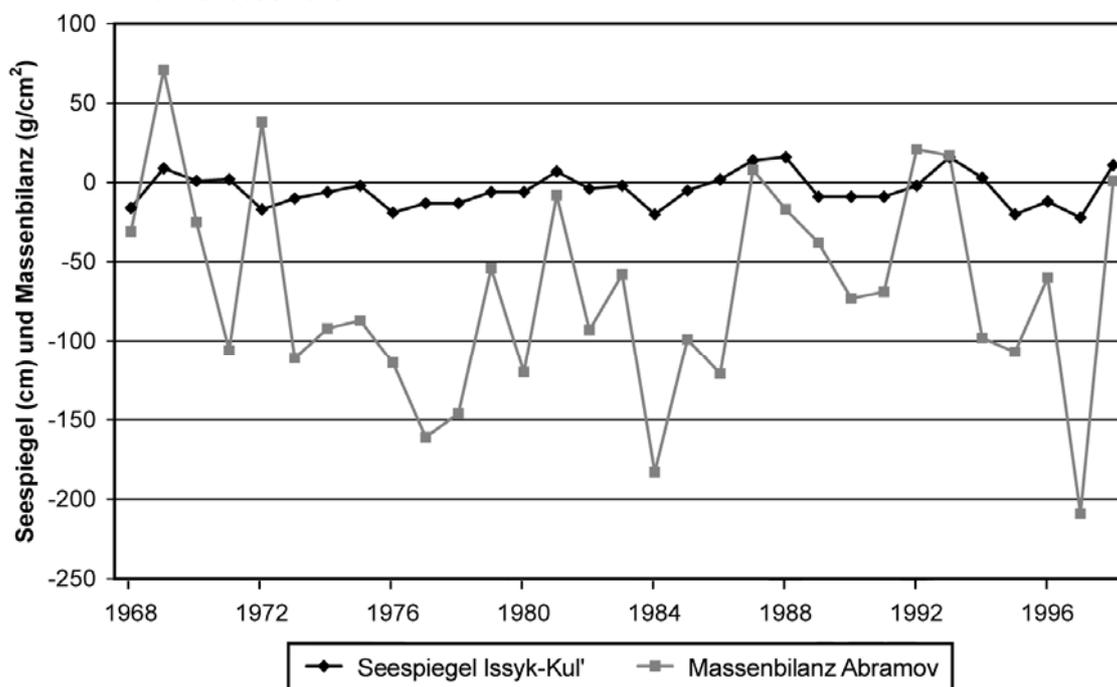
Die meisten Flüsse des Issyk-Kul'-Beckens werden von Schnee- und Gletscherschmelzwasser gespeist. Eine Ausnahme bildet der zweitgrößte Fluss, der Tjup, der ausschließlich nival gespeist wird. Sein Einzugsgebiet liegt im niedrigsten und feuchtesten Teil des östlichen Issyk-Kul'-Beckens und grenzt an den Santaš-Pass, über den der Großteil der Abtransports von Wasserdampf aus dem Becken heraus erfolgt. Der Jahresniederschlag beträgt hier etwa 880 mm. Die Pegelstation Sarytologoj registrierte bis 1993 den Abfluss eines 513 km² großen Gebiets oberhalb der Entnahmestelle für die Bewässerung. Langjährige Daten belegen einen negativen Trend des Abflusses. Für den gleichen Zeitraum wurde an der meteorologischen Station Santaš ein positiver Trend des Jahresniederschlags beobachtet. Die Verminderung des Abflusses kann demnach nur auf eine Zunahme der Verdunstung zurückzuführen sein.

Die Gegenüberstellung der Abflussmenge des Tjup und des Seespiegels zeigen einen parallelen Verlauf der beiden Kurven. Ab einer durchschnittlichen Abflussmenge von 8,2 m³/s, die einem Abflussvolumen von 9 km³/a entspricht, kommt es zu einem Seespiegelanstieg. Dies lässt den Schluss zu, dass bei einer Erhöhung des mittleren Abflusses des Tjup um 0,8 m³/s der Seespiegel ein annähernd stabiles Niveau annimmt. Diese Erhöhung entspricht einer Niederschlagszunahme um 50 mm. Die Korrelation zwischen der Seespiegelhöhe und der Summe der Modulationskoeffizienten des virtuellen Abflusses des Tjup (9 m³/s) besitzt in verschiedenen Zeitabschnitten ein Be-

stimmtheitsmaß zwischen 0,99 und 0,92 (Romanovskij, 1999).

Folglich gibt es im Einzugsgebiet des Tjup in der Gebirgszone der Abflussbildung bis 1993 ein Feuchtigkeitsdefizit. Flüsse mit glazialem Regime weisen kein Abflussdefizit auf, da die Klimaerwärmung von einer Zunahme der Gletscherschmelze begleitet wird. Demnach kann die hydrologische Bilanz des unvergletscherten Tjup-Einzugsgebiets als Indikator für den Feuchtigkeitsaustausch (An- und Abtransport) des gesamten Issyk-Kul'-Beckens mit seiner Umgebung dienen.

Abb. 39: Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' und Massenbilanz des Abramov-Gletschers



In Abb. 39 wird den Seespiegelschwankungen des Issyk-Kul' die Massenbilanz des Abramov-Gletschers, südwestlich des Issyk-Kul' im Alaj-Gebirge gelegen, gegenübergestellt. Bei fast allen Jahren mit einem Seespiegelanstieg (1969, 1981, 1987, 1993, 1998) handelt es sich um feuchte Jahre mit einer positiven Gletschermassenbilanz. Eine Ausnahme bildet das Jahr 1972, in dem der Seespiegel wegen der geringen Niederschläge stark abfiel, die Massenbilanz aber wegen dem kalten Sommer trotzdem positiv war. Demnach stehen Seespiegelanstiege in Zusammenhang mit Perioden erhöhter Niederschläge in der gesamten Gebirgsregion Zentralasiens.

Folglich sind Seespiegelschwankungen im 20. Jahrhundert hauptsächlich klimatische verursacht, wobei der Austausch mit externen Luftmassen von außerhalb des Beckens eine wesentliche Rolle spielt. In diesem Prozess dominiert der Abtransport von Was-

serdampf über den Antransport. Die Intensität dieses Prozesses ändert sich natürlich im Laufe eines längeren Zeitraums und steht mit anderen Termen der hydrologischen Bilanz des Issyk-Kul' in Wechselwirkung.

12. Räumliche und jahrezeitliche Verteilung des Niederschlags

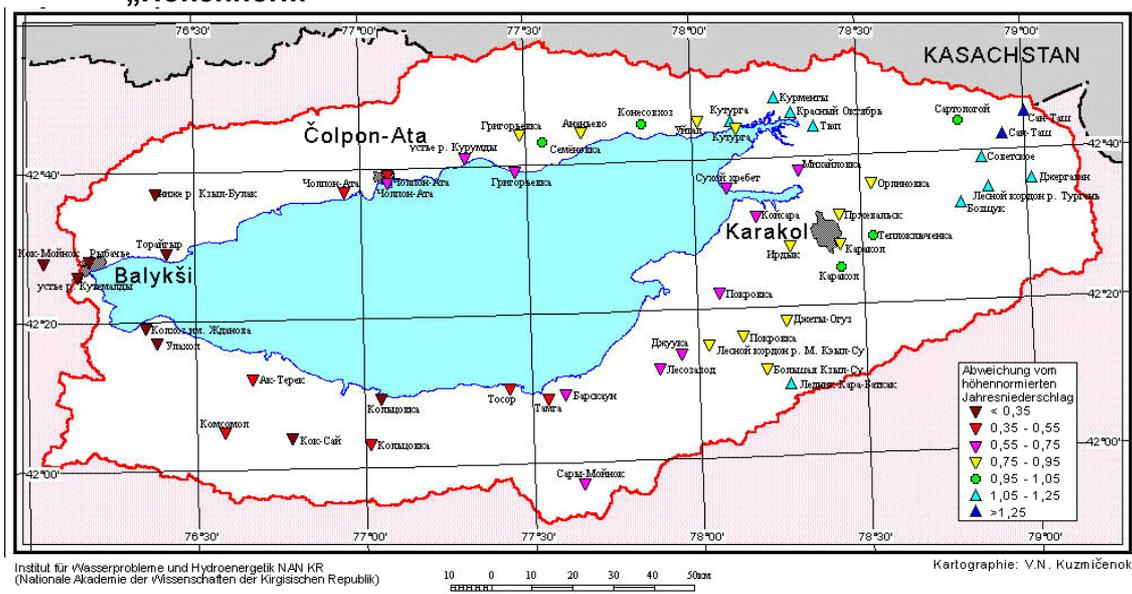
Die räumliche Verteilung der Niederschläge im Issyk-Kul'-Becken und ganz Kirgistan ist in den Abbildungen 40-43 dargestellt. Die Besonderheiten der Niederschlagsverteilung werden in Abbildung 40 ersichtlich, wo Abweichungen der Niederschlagssummen von der „Höhennorm“ dargestellt sind. Diese Höhennorm ist die empirisch abgeleitete Niederschlagssumme für die jeweilige Meereshöhe und wird mit folgender Formel nach Kuz'mičenok berechnet:

$$P = 279,5 + 0,139 H$$

mit P = Jahresniederschlag in mm

H = Meereshöhe in m

Abb. 40: Abweichung der Jahresniederschläge im Issyk-Kul'-Becken von der „Höhennorm“



Die Abbildung macht deutlich, dass sich die Niederschlagssummen im Becken von

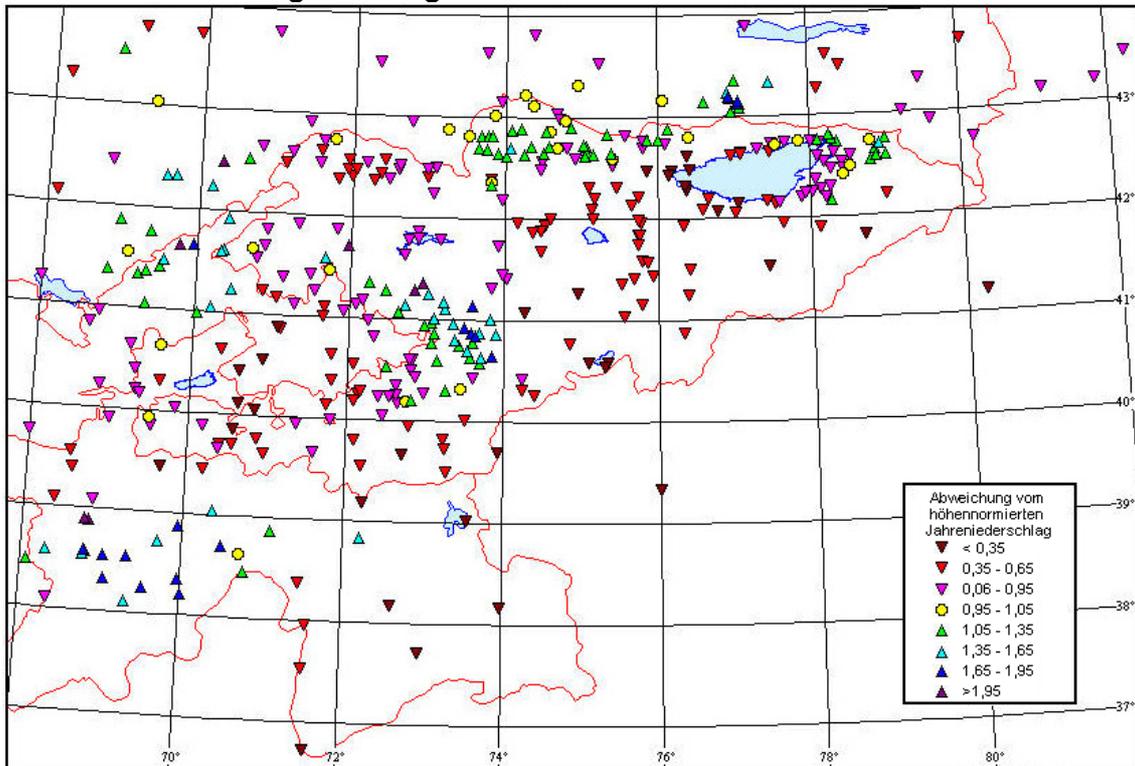
Westen nach Osten von einem Anteil von 0,35 in der Region Balykši auf 1,25 im Gebiet des Santaš-Passes erhöhen. Auch mit zunehmender Entfernung vom See zu den Bergen nehmen die Niederschläge zu. An der Station Pokrovka fällt ein Anteil von 0,55-0,75, in der Waldzone sind die Anteile nur noch geringfügig unter der Norm und in der nivalen Zone am Gletscher Karabatkak liegen sie darüber. Auch am nordöstlichen Ufer (Kuturga, Kurmenty, Kracnyj Oktjabr', Tjup), wo die Hänge des Kungej-Alatau dicht an das Ufer heranreichen, fallen große Niederschlagsmengen.

Gvozdeckij und Michajlov lehnen eine Rolle des Sees bei der Niederschlagsentstehung ab: „Der östliche Teil des Issyk-Kul'-Beckens ist bedeutend feuchter als der westliche Teil, wo sich eine Wüstenlandschaft erstreckt. Dieses Phänomen wird oft mit Wasserdampf, der vom See verdunstet und von Westwinden in den Osten transportiert wird, erklärt. Die landschaftlichen Besonderheiten des Ferganatales zeigen, dass dies nicht der Hauptgrund sein kann: auch hier ist der östliche Teil erheblich feuchter, obwohl in seinem Zentrum kein See, sondern eine Wüste liegt. Im westlichen Teil des Fergana-Beckens befindet sich die Wüste nicht nur in der Ebene, sondern auch im Gebirge, gleichzeitig wachsen an der östlichen Umrahmung des Beckens schöne Walnusswälder und wilde Obstbäume. Der Grund ist in beiden Becken, dass Luftmassen von Westen und Südwesten her an den östlichen Gebirgsbarrieren zum Aufstieg gezwungen werden.“

In Abbildung 41 wird ersichtlich, dass im östlichen Gebirgstiel des Fergana-Beckens tatsächlich eine Niederschlagsmenge fällt, die an einigen Stellen die Höhennorm, also die gemittelte Niederschlagssumme für den jeweiligen Höhenbereich um das 2-fache übersteigt.

Abbildung 42 wurde auf der Grundlage von Monatsmitteln langjähriger Niederschlagsaufzeichnungen in Kirgistan und angrenzenden Gebieten erstellt. Dabei wurden anhand der saisonalen Verteilung 7 charakteristische Typen unterschieden. Im südwestlichen (Fergana-Rücken) und im nördlichen (kirgisischer Alatau) Kirgistan sowie im Flachland des südlichen Kasachstan ist der Niederschlagsjahresgang durch zwei Maxima im Frühjahr-Sommer (März–Juni) und im Herbst-Winter (Oktober–November) gekennzeichnet. Die Niederschlagsminima fallen auf die Monate August–September, und Januar–Februar.

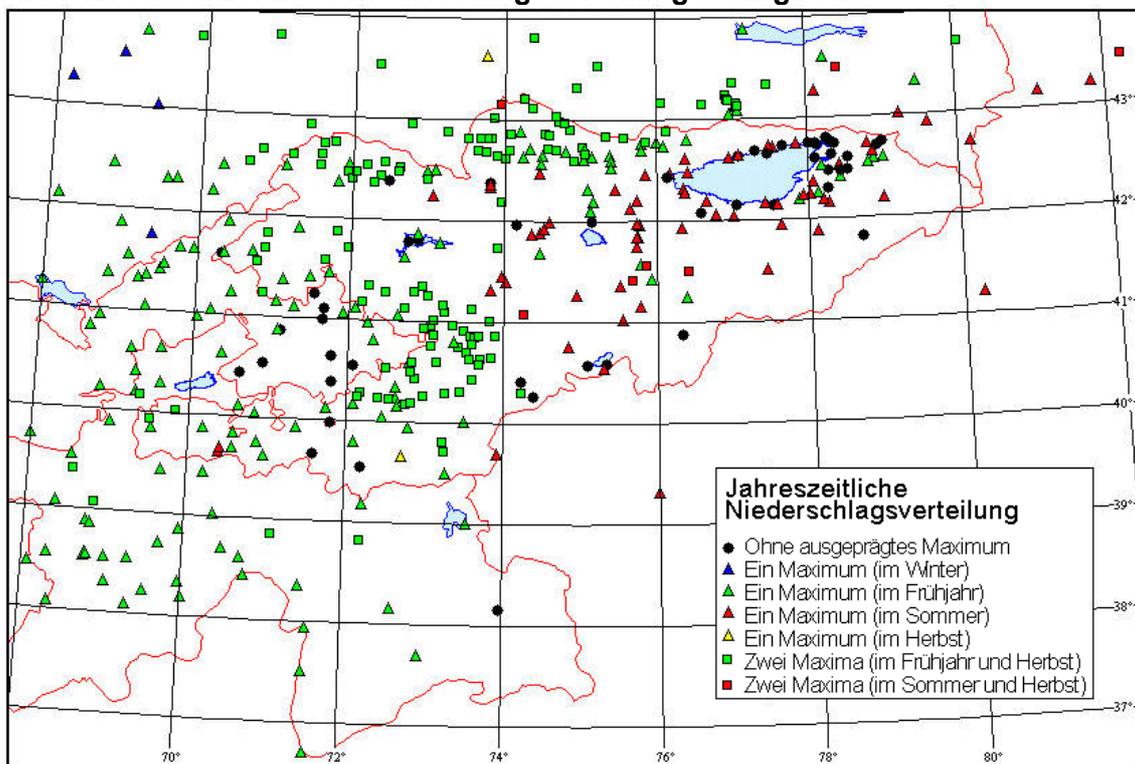
Abb. 41: Abweichung der Jahresniederschläge von höhennormierten Jahresniederschlägen in Kirgistan



Institut für Wasserprobleme und Hydroenergetik NAN KR
(Nationale Akademie der Wissenschaften der Kirgisischen Republik)

Kartographie: V.N. Kuzmičėnok

Abb. 42: Jahreszeitliche Niederschlagsverteilung in Kirgistan



Institut für Wasserprobleme und Hydroenergetik NAN KR
(Nationale Akademie der Wissenschaften der Kirgisischen Republik)

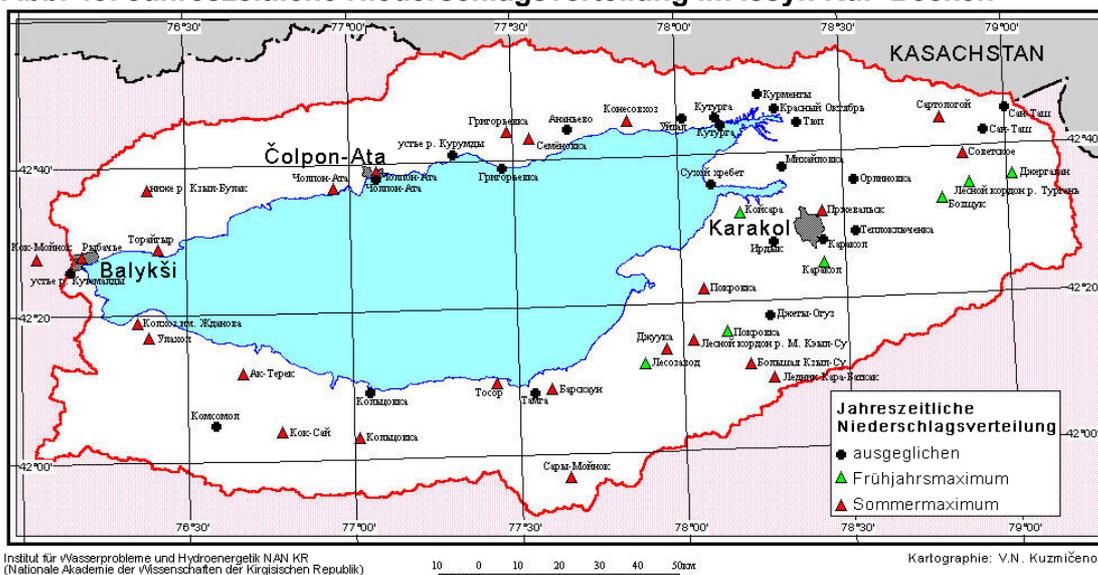
Kartographie: V.N. Kuzmičėnok

In der kalten Jahreszeit herrscht in weiten Teilen Kirgistans eine Invasion arktisch-kontinentaler Luftmassen vor, die nur wenig Niederschlag mit sich bringt. Darum ist das Kondensationsniveau in dieser Zeit sehr niedrig. Die meisten Niederschläge fallen deswegen in den unteren Höhenbereichen und der Vorgebirgszone, das Issyk-Kul'-Becken und der innere Tjan'-Šan' werden im Winter nur selten von feuchten Luftmassen erreicht. Deshalb wird im inneren Tjan'-Šan' eine eingipflige Niederschlagsverteilung mit einem Maximum im Juli und einem Minimum im Februar beobachtet.

Im Winter herrscht im südwestlichen Kirgistan wegen der orographischen Isolierung ein Mittelmeerklima mit einem nur schwachen Einfluss der sibirischen Antizyklone vor. Aus diesem Grund fallen hier im Winter mehr Niederschläge als in anderen Regionen der Republik, allerdings mit einer starken vertikalen Differenzierung: 50 mm und weniger fallen in der unteren Höhenzone und bis zu 400 mm an den südöstlichen Hängen des Čatkal'-Alatau sowie an den südwestlichen Hängen des Fergana-Rückens (450 mm im Ort Demidovka). In Uzbekistan und Tadžikistan herrschen auf den Gebieten westlich und südwestlich des Fergana-Rückens eingipflige Niederschlagsverteilungen mit einem Frühjahrsmaximum vor, die in Kirgistan auch in den Becken des Issyk-Kul', Sonkul', Čatyrkul' sowie an den Stauseen Toktogulsk und Kajrakum auftreten. Ein Zusammenhang mit der Verdunstung von den Seeoberflächen ist dabei offensichtlich. Auch im Süden Kirgistans treten durch den Einfluss des indischen Monsuns unimodale Niederschlagsverteilungen auf .

Im Issyk-Kul'-Becken (Abb. 43) sind unimodale Niederschläge mit einem schwachen sommerlichen Maximum auf die Uferzone des Sees und den östlichen Teil des Beckens bis zum Santaš-Pass feststellbar. Die Entstehung solcher lokalen Niederschläge ist vor allem am nordöstlichen Uferbereich im Ort Kuturga sehr gut nachvollziehbar, wo im Sommer fast täglich zur gleichen Zeit Regen aus den Wolken fällt, die entlang des südlichen Terskej Alatau in Richtung Osten ziehen. An den meteorologischen Stationen Grigor'evka und Tjup, die in unmittelbarer Seenähe liegen, wird die maximale Niederschlagsmenge im September beobachtet, wenn auf dem restlichen Territorium Kirgistans ein Niederschlagsminimum feststellbar ist.

Abb. 43: Jahreszeitliche Niederschlagsverteilung im Issyk-Kul'-Becken



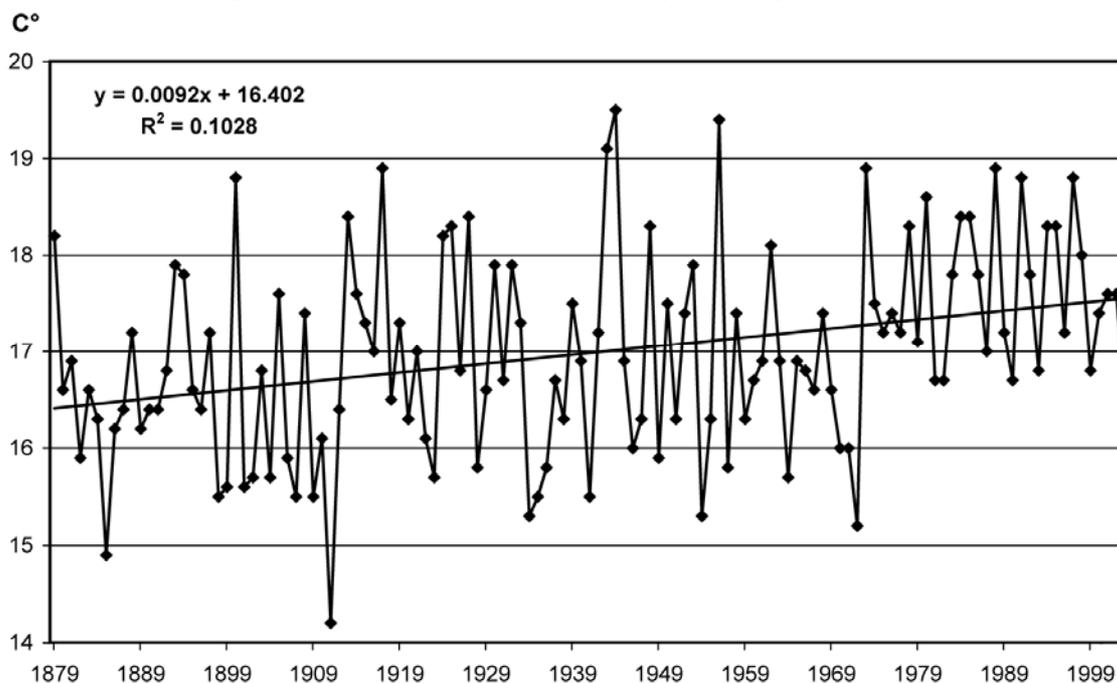
Der Anteil lokaler Feuchtigkeit in den Niederschlägen des Issyk-Kul'-Beckens wurde vom Institut für Wasserprobleme in Moskau nach der Isotopenmethode bestimmt (Romanov u.a. 1989). Demnach beträgt der Anteil des von der Seeoberfläche verdunsteten Wasserdampfs am Gesamtniederschlag des Beckens zwischen 22 und 52%. Im vertikalen Profil wurden an den meteorologischen Stationen Pokrovka (1840 m ü. M.), Čon-Kysyl-Su (2700 m ü. M.) und Karabatkak (3400m ü. M) autochthone Seewasser-Anteile im Niederschlag von 35%, 38% und 6% gemessen. Dieser Anteil erhöht sich demnach bis in mittlere Höhengürtel, wo Nadelwälder dominieren und nimmt in der nivalen Zone wieder drastisch ab. Außerdem weisen die Niederschläge im Osten des Beckens nur einen geringen Anteil lokaler Feuchtigkeitsquellen auf.

13. Zu erwartende Entwicklung des Seespiegels des Issyk-Kul'

In der Arbeit von Mamatkanov et al. (1997) wurde festgestellt, dass in der langen meteorologischen Messreihe der Station Prževalsk' (Karakol) seit 1879 zyklische Schwankungen in der Julitemperatur vorhanden sind. Während Perioden von etwa 31 Jahren (1879 bis 1911, von 1912 bis 1941 und von 1942 bis 1972) treten negative Trends auf, die durch starke Temperatursprünge (1912, 1942, 1973) um 1,3-1,5°C unterbrochen werden. Ohne diese Sprünge wäre die Julitemperatur im Beobachtungszeit-

raum um 3,1°C gesunken, tatsächlich hat sie sich jedoch um 1,1°C erhöht. Um die Temperaturreihe nach der Schließung der Station 1996 zu verlängern, wurden Julitemperaturen der Stationen Čolpon-Ata und Karakol extrapoliert (Abb. 44).

Abb. 44: Julitemperatur der Station Prževalsk' (Karakol), 1879-2002



Die 31-jährige Periodizität ließ eine Zunahme der Julitemperaturen im Jahr 2003 erwarten, die auch tatsächlich eintrat. Die Abnahme der Julitemperaturen beträgt im Zeitraum 1973-2003 in Karakol 0,2°C und in Čolpon-Ata 0,7°C.

Der Trend der Monatsmittel von Čolpon-Ata innerhalb der letzten 31 jährigen Periode sind in Abb. 45 dargestellt, er steigt vom Frühjahr zum Winter an und erreicht seinen höchsten Wert im Februar.

An der Station Tjuja-Ašu in der nivalen Zone wurde im Zeitraum 1973-2003 ebenso wie an der Station Čolpon-Ata ein negativer Trend im April (Abb. 46) und im Juli (Abb. 47) festgestellt, die übrigen Monate zeichnen sich weitgehend durch einen Temperaturanstieg aus (Abb. 48). Dabei sind die Trends im Gebirge deutlich stärker als in der Ebene, was beweist, dass die Ursachen der Abkühlung in den höheren atmosphärischen Schichten zu finden sind. Monatliche Trends von Luftfeuchtigkeit und Verdunstung sind in den Abbildungen 49 und 50 dargestellt. Die Temperaturabnahme gegen Ende der 31-jährigen Perioden wird von einer Abnahme der Verdunstung, einer Niederschlagszunahme und einem Seespiegelanstieg begleitet.

Abb. 45: Trends der Monatstemperaturen der Station Čolpon-Ata, 1973-2003

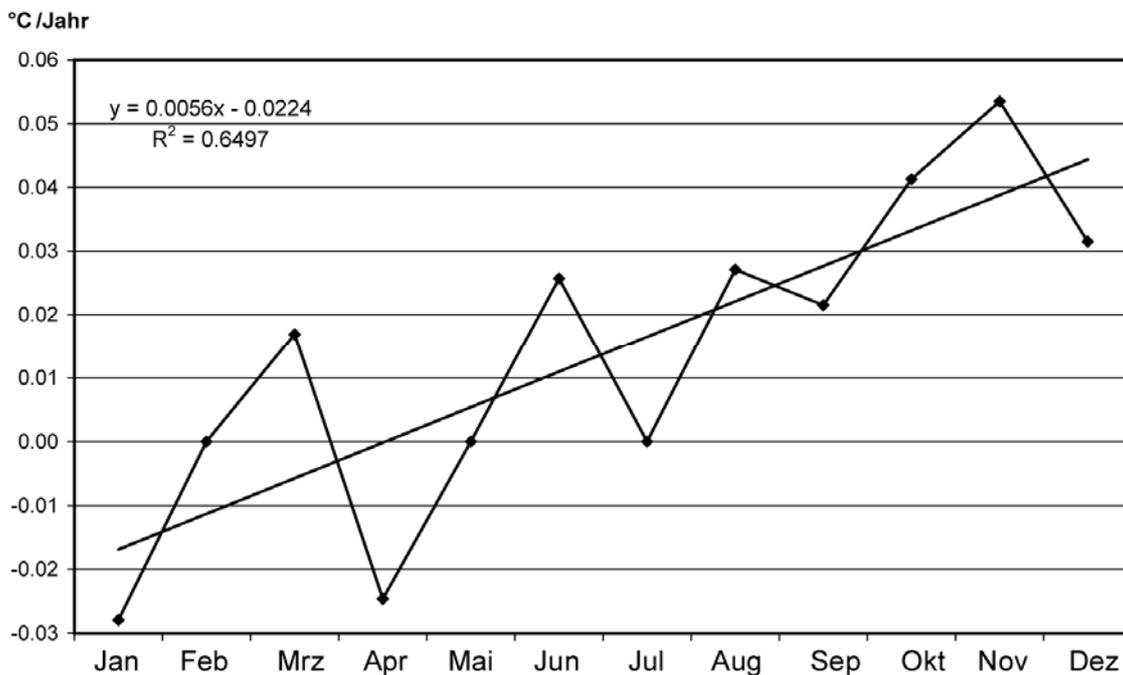


Abb. 46: Mittlere Lufttemperatur im April auf den Stationen Čolpon-Ata und Tjuja-Ašu, 1973-2003

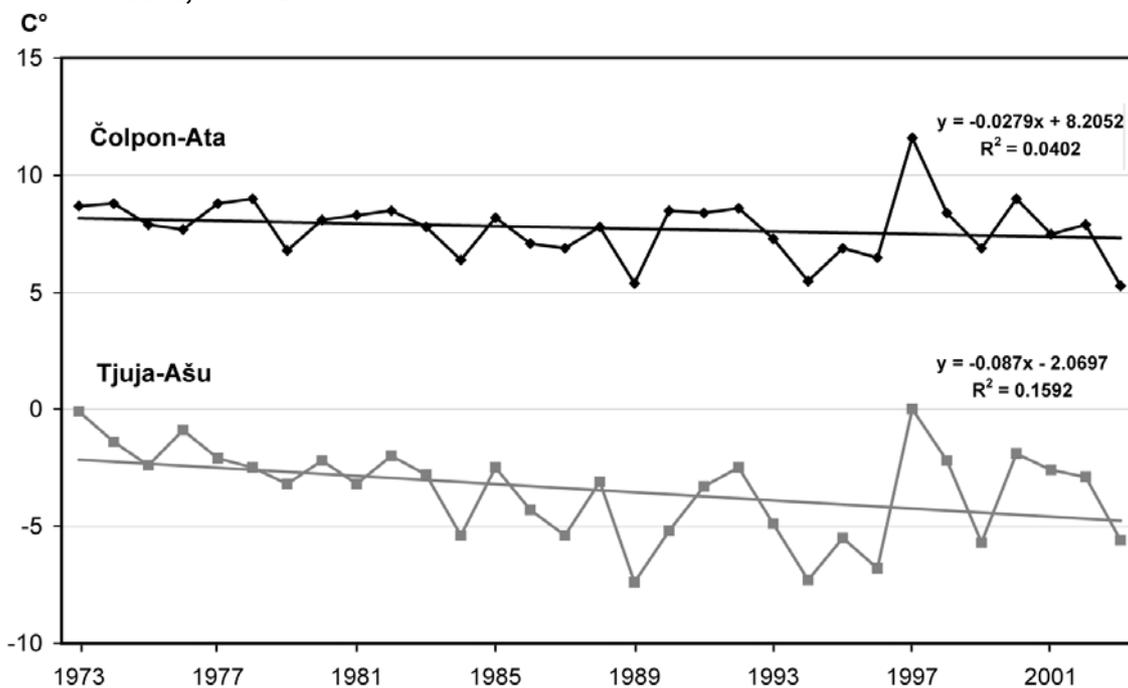


Abb. 47: Mittlere Lufttemperatur im Juli auf den Stationen Čol-pon-Ata und Tjuja-Ašu, 1973-2003

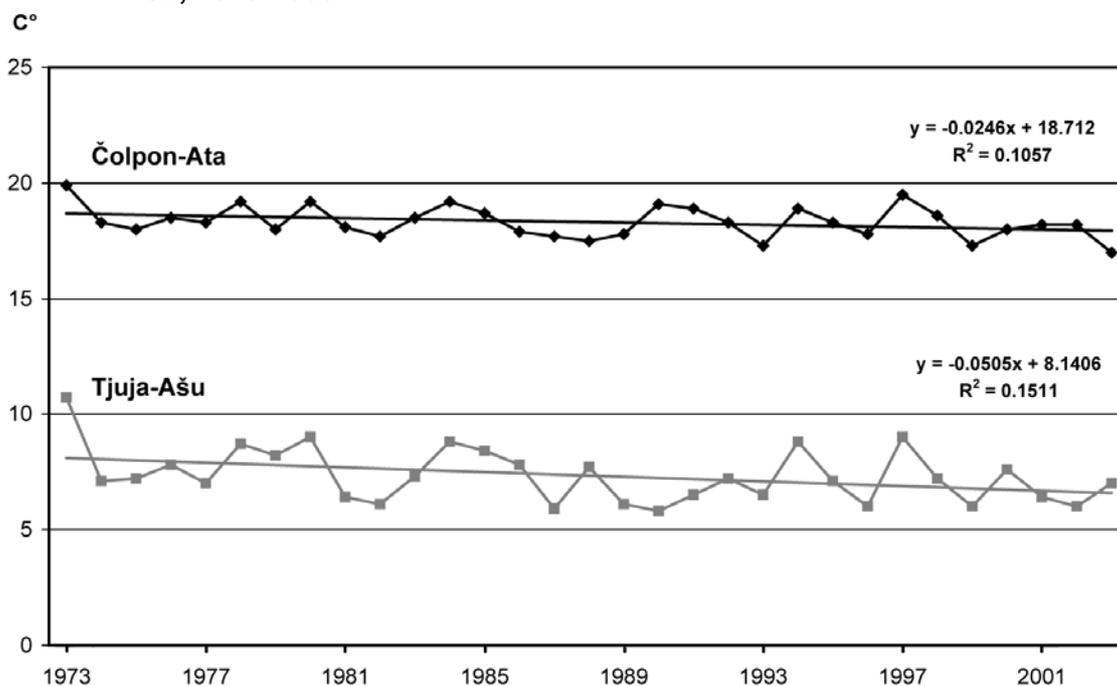


Abb. 48: Monatliche Trends von Temperatur und Niederschlag an der Station Čolpon-Ata, 1973-2003.

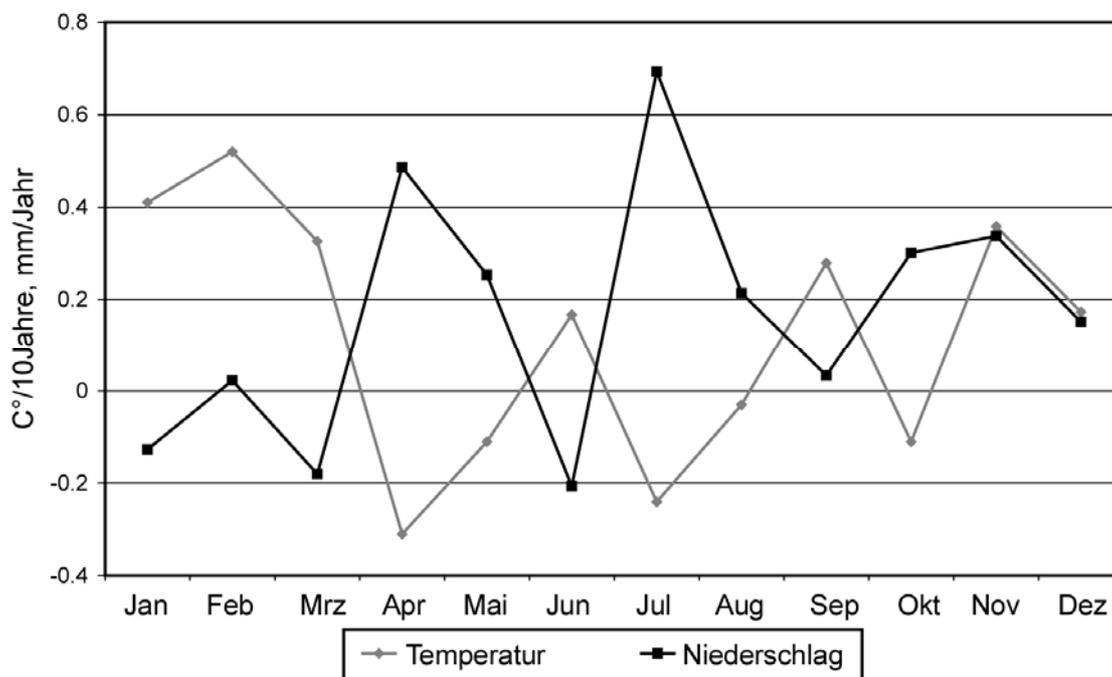


Abb. 49: Monatliche Trends der relativen Luftfeuchtigkeit an der Station Balykši, 1973-2003.

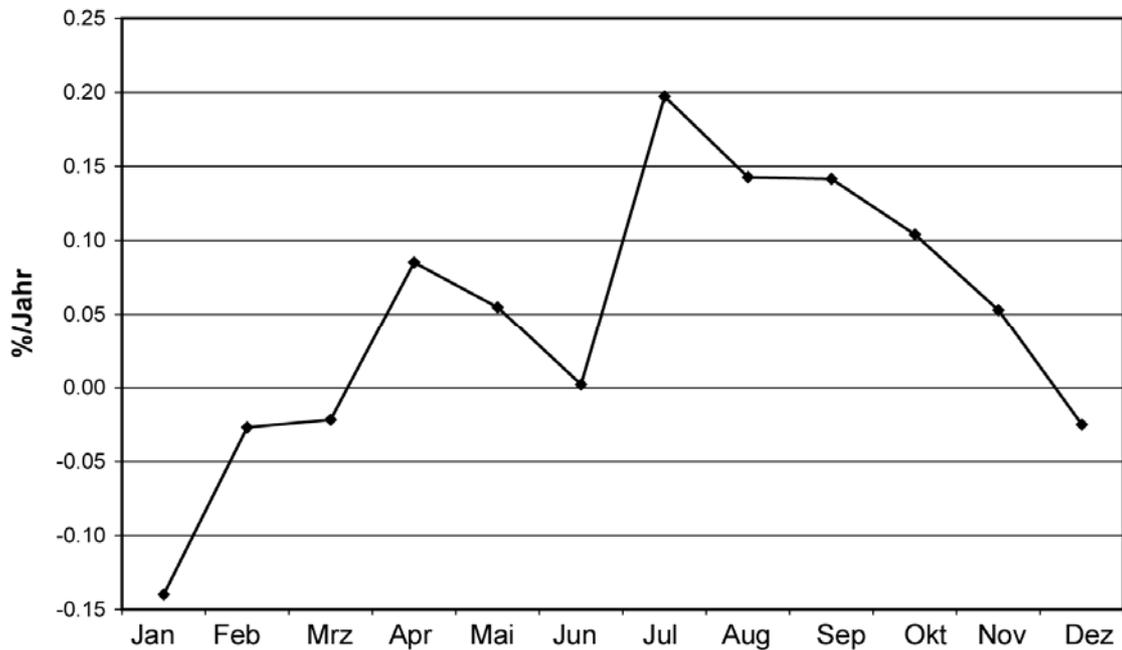
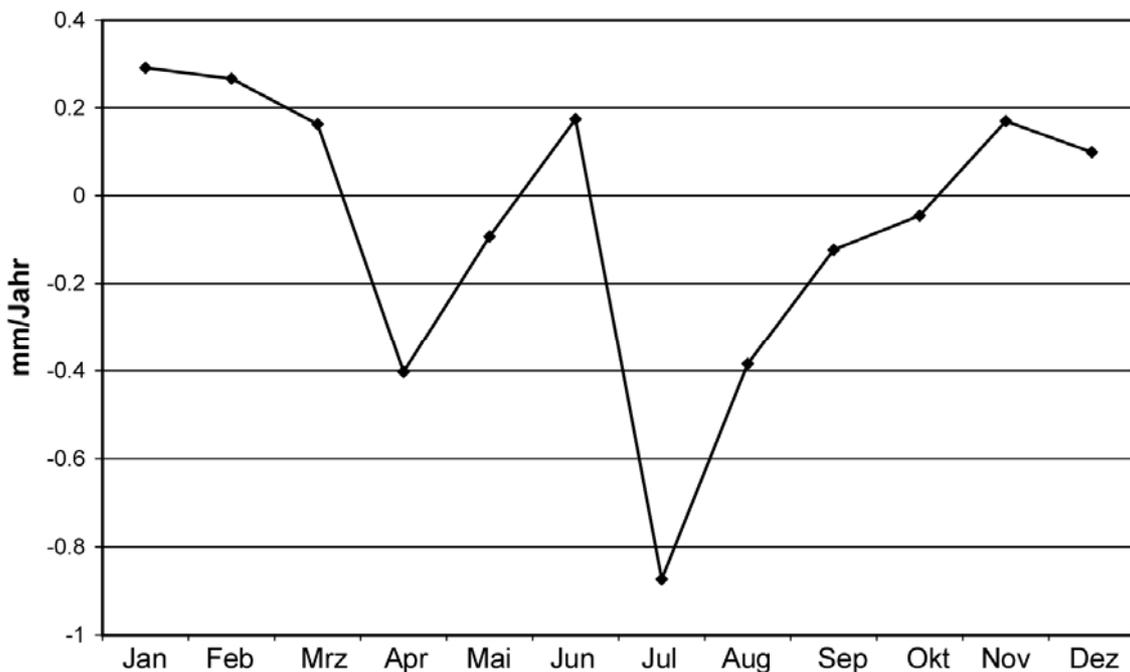


Abb. 50: Monatliche Trends der Verdunstung an der Station Balykši, 1973-2003.



Zu Beginn des 20. Jahrhunderts kam es während einer kühlen und feuchten Phase zu einem Vorstoß der Gletscher. Im Jahre 1908 schrieb der deutsche Forschungsreisende Merzbacher in einem Brief an die Russische Geographische Gesellschaft: „Von den 4 Jahren, die ich im Tjan'-Šan' verbracht habe, war das Letzte das Unangenehmste. Während der letzten 6 Monate hatten wir nur 9 Tage ohne Niederschlag hatten. Bei

vorherrschenden Westwinden fiel fast jeden Tag Regen oder Schnee. Die Gletscherschmelze dauerte nur 6 Wochen an. Anfang Juli konnte man die meisten Gletscherbäche noch zu Fuß überqueren und bereits Mitte August stellte das Schmelzwasser ebenfalls kein großes Reisehindernis mehr dar. Dafür sahen wir während des Sommer oft eine Schneelandschaft und schon Mitte September begann die strenge Herrschaft des Winters... .“ Die Winter waren zu Beginn des 20. Jahrhunderts außergewöhnlich. Die Höhe der Schneedecke überstieg 1,5 m und die Temperaturen sanken auf -20 bis -30°C. Merzbacher kam zu der Feststellung: „Noch einige ähnliche Jahre und es kommt zu einem allgemeinen Gletschervorstoß“. Die Vorhersage des deutschen Wissenschaftlers bewahrheitete sich, viele Endmoränen bildeten sich in den Jahren 1911-1915.

Die Abkühlung und die Niederschlagszunahme zu Beginn des letzten Jahrhunderts verursachten einen Seespiegelanstieg des Issyk-Kul'. Nach Einschätzung von Trofimov und Grinina (1979) betrug dieser Anstieg im Zeitraum 1900–1919 etwa 2 m. 1941–1942 betrug der Anstieg des Seespiegels 12 cm, 1970–1971 8 cm. Am 1. September 2003 erreichte der Seespiegel eine Höhe von 1606,87 m, was dem Stand am Ende 1977 entspricht. Der gegenwärtige Anstieg (1998-2003) beträgt 80 cm.

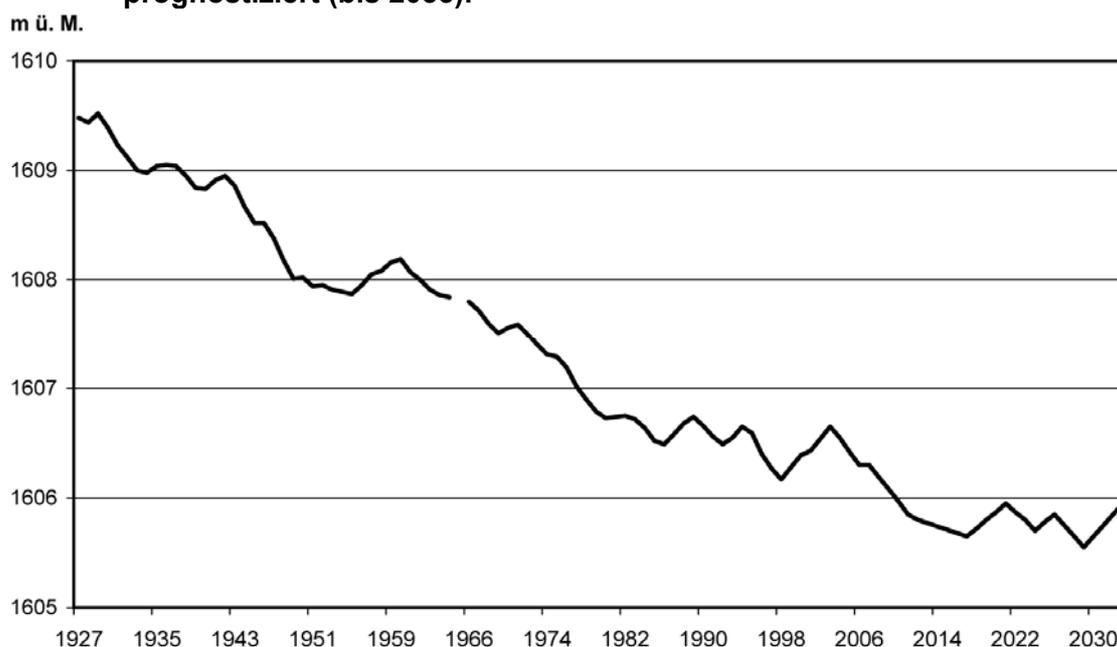
Die Analyse des Seespiegels zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf während der beiden letzten 31 jährigen Perioden (Tab. 16) und erlaubt Prognosen für den Zeitraum 2003-2033 (Tab. 17, Abb. 51).

Tab. 16: Periodizität des Seespiegels des Issyk-Kul' von 1942-2003 und Projektion für 2003-2033

1942-1971			1971-2003			2003-2033	
Jahr	Extremwert	Zyklusdauer	Jahr	Extremwert	Zyklusdauer	Jahr	Extremwert
1942	Max		1971	Max		2003	Max
		4			4		
1946	Max		1975	Max		2007	Max
		3			5		
1949	Min		1980	Min		2011	Min
		6			6		
1955	Min		1986	Min		2017	Min
		3			3		
1960	Max		1989	Max		2021	Max
		9			9		
1969	Min		1998	Min		2030	Min
		2			5		
1971	Max		2003	Max		2033	Max

Aus den Zyklen errechnet sich eine Seespiegelabsenkung für den Issyk-Kul' für den Zeitraum 2003-2033 von ungefähr 60 cm. Die erste Hälfte dieser Periode wird heiß und trocken, mit einem Abfall des Seespiegels bis zum Jahr 2017 um einen Meter. Danach kommt es aufgrund einer Niederschlagszunahme zu einem leichten Anstieg.

Abb. 51: Mittlere Seespiegelhöhe des Issyk-Kul', tatsächlich (1927-2003) und prognostiziert (bis 2033).



Es muss angemerkt werden, dass Mamatkanov (1973) einen 31-jährigen Zyklus im Abfluss des Naryn festgestellt hat. Dies deutet darauf hin, dass diese periodischen Schwankungen der hydrologischen Prozesse nicht nur für das Issyk-Kul'-Becken charakteristisch sind, sondern für den gesamten inneren Tjan'-Šan'.

Tab. 17: Mittlere jährliche Seespiegelhöhe des Issyk-Kul', gemessen und prognostiziert

Jahr	Höhe, m	Jahr	Höhe, m	Jahr	Höhe, m
1927	1609,48	1964	1607,86	1998	1606,17
1928	1609,44	1965	1607,84	1999	1606,28
1929	1609,52	1966	1607,80	2000	1606,39
1930	1609,39	1967	1607,72	2001	1606,43
1931	1609,23	1968	1607,60	2002	1606,54
1932	1609,12	1969	1607,51	2003	1606,72
1933	1609,00	1970	1607,56	2004	1606,62
1934	1608,98	1971	1607,59	2005	1606,49
1935	1609,04	1972	1607,50	2006	1606,37
1936	1609,05	1973	1607,40	2007	1606,37
1937	1609,04	1974	1607,31	2008	1606,26
1938	1608,95	1975	1607,29	2009	1606,15
1939	1608,84	1976	1607,19	2010	1606,04
1940	1608,83	1977	1607,02	2011	1605,92
1941	1608,91	1978	1606,90	2012	1605,87
1942	1608,95	1979	1606,79	2013	1605,84
1943	1608,86	1980	1606,73	2014	1605,81
1944	1608,67	1981	1606,74	2015	1605,78
1945	1608,52	1982	1606,75	2016	1605,75
1946	1608,52	1983	1606,72	2017	1605,72
1947	1608,38	1984	1606,64	2018	1605,79
1948	1608,18	1985	1606,52	2019	1605,87
1949	1608,01	1986	1606,49	2020	1605,94
1950	1608,02	1987	1606,58	2021	1606,02
1951	1607,94	1988	1606,68	2022	1605,94
1952	1607,95	1989	1606,74	2023	1605,87
1953	1607,91	1990	1606,66	2024	1605,77
1954	1607,89	1991	1606,56	2025	1605,85
1955	1607,87	1992	1606,49	2026	1605,92
1956	1607,95	1993	1606,55	2027	1605,82
1957	1608,05	1994	1606,65	2028	1605,72
1958	1608,08	1995	1606,59	2029	1605,62
1959	1608,16	1996	1606,40	2030	1605,72
1960	1608,19	1995	1606,59	2031	1605,82
1961	1608,07	1996	1606,40	2032	1605,92
1962	1608,00	1997	1606,27	2033	1606,02
1963	1607,91				

14. Auswirkungen der Seespiegelabsenkung

In einem dynamischen Gleichgewicht führt eine beliebige Änderung einer Zustandsgröße unausweichlich zur Entstehung einer natürlichen Kettenreaktion (Rejmers 1990). Eine leichte Veränderung einer Systemkomponente kann dabei eine starke Veränderung bei einer anderen auslösen.

Am Issyk-Kul' treten solche Kettenreaktionen im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung und Seespiegelabsenkung auf. Die deutlichsten Veränderungen vollziehen sich in der Uferzone. In den westlichen und östlichen Rajonen sowie im offenen Teil der Tjupbucht entstehen neue Uferflächen sowohl aktiv durch Sedimentation als auch passiv durch die Absenkung des Seespiegels. Wegen der geringen Geländeneigungen von bis zu 0,01 verlagert sich die Uferlinie im Westen und Osten am schnellsten. In der Bucht von Rybač'e wuchs das Ufer von 1957 bis 1978 wegen der geringen Geländeneigung von 0,002 allein durch die Seespiegelabsenkung manchen Stellen um 800 m seewärts. Die trockengefallene Fläche betrug im Zeitraum 1957-1983 10 km² und überstieg in den letzten 150 Jahren 80 km² (Venus 1986). Im südöstlichen Teil der Tjupbucht betrug die Verlagerung des Ufers von 1957 bis 1980 1200 m. Das passive Vorschreiten der Uferlinie kann bei einer jährlichen Absenkung des Seespiegels von 5 cm 40-50 m erreichen. Gleichzeitig vollzieht sich das aktive Anwachsen durch Sandsedimentation an den Stirnseiten der Halbinseln Suchoj Chrebet und Kara Bulun bei gleichen Neigungen mit einer Geschwindigkeit von 5-7 m/Jahr.

Das Südufer weist etwas höhere Neigungen zwischen 0,031 und 0,200 auf. Gewöhnlich entwickeln sich solche Ufer durch Abrasion (Brandungserosion), da die Wellen das Ufer ungebrochen erreichen. Am südlichen Issyk-Kul' finden aber kaum Abrasionsprozesse statt, da den Ufern Sandbänke mit einer Breite von 100-200 m und einer Tiefe von 2-3 m vorgelagert sind, an denen sich die Wellen bei Sturm brechen. Für die Sandbänke sind Strandwälle charakteristisch. Das Trockenfallen des Südufers vollzieht sich von der Tamga-Bucht bis zur Station Čičkan, wo Gerölle mit Kalk zu Konglomeraten verbacken sind. Hier beträgt die Geschwindigkeit der Uferverlagerung 0,2-1,0 m/Jahr.

Das nördliche Ufer nimmt eine Zwischenstellung zwischen den sandigen Ufern im Westen und Osten und den steileren Ufern im Süden des Sees ein, die Geländeneigung beträgt hier 0,011 bis 0,030. Für das Ufer sind sedimentative Halbinseln charakteristisch (Čokltal, Dolinka, Čolpon-Ata, Bozteri). Während des Seespiegelanstiegs, der 1981, 1982 und 1987-1989 beobachtet wurde, bildeten sich an den akkumulativen U-

fern Strandwälle. Auf den trockengelegten Schlammufern und an Riasufern (ertrunkene Quertäler) bildeten sich Abrasionsstufen. Der Seespiegelanstieg im Zeitraum 1987-89 um 24 cm verstärkte auch hier die Abrasion und führte zum Abtrag der Landzungen im nordöstlichen Rajon um 50-60 m. Der ungewöhnlich hohe Anstieg des Seespiegels im Frühjahr-Sommer des Jahres 1981 führte zu einer ersten Unterspülung der Strände auf den Halbinseln Kara Bulun und Dolinka. Der aktuelle Anstieg, der von 1997 bis 2003 80 cm betrug, führte diesen Prozess in katastrophaler Weise fort. Die Stirnseite Halbinsel Suchoj Chrebet bildeten in den 1980er Jahren und in der ersten Hälfte der 1990er Jahre 100-250 m breite Sandstrände, auf denen dichte Sanddornsträucher wuchsen. Diese werden gegenwärtig vollständig zerstört.

Die oberen Horizonte aus historischer Zeit wurden auf der Holozänterrasse durch Strandwälle, Abrasionsstufen und Barren festgelegt. Auf der Halbinsel Kara Bulun formte der Seespiegelanstieg um 1,5 m im Zeitraum 1900-1910 eine Abrasionsstufe auf dem vorderen Teil der Halbinsel sowie eine mächtige Nehrung, die ein riesiges Haff abgliederte. Die Seespiegelanstiege 1938-1942, 1955-1960 und 1987-1989 spiegeln sich ebenfalls durch Strandwälle und Barren ebenfalls im Relief der Halbinsel wieder. Strandwälle bilden sich zu Beginn der Transgression, Barren eher zum Ende hin. Petrographische Analysen des Sandes aus verschiedenen Uferformen (Tabelle 18) helfen, die Entstehungszeit zu bestimmen.

Tab. 18: Sedimentologische Kenngrößen der unterschiedlichen Reliefformen auf der Halbinsel Kara-Bulun

Form	Zeit der Bildung	Korngröße nach 50% und 95% Siebdurchgang		Sortierung	Asymmetrie
		ϕ_{50}	ϕ_{95}		
		ϕ_{50}	ϕ_{95}	Σ	S_k
Welle	1900	0,37	0,94	0,24	0,52
Barre	1910	0,35	0,95	0,26	0,52
Welle	1938	0,51	0,99	0,26	0,33
Barre	1942	0,55	0,97	0,26	0,33
Welle	1955	0,81	1,59	0,38	0,29
Barre	1960	0,76	1,51	0,35	0,24

Die Wellen und Barren beispielsweise, die während der Transgression von 1900-1910 entstanden, zeigen allesamt sehr ähnliche Korngrößenverteilungen, Sortierungs- und Asymmetriegrade. Gleichfalls ähnlich sind die Werte dieser Kenngrößen für Sedimente, die während des Seespiegelanstiege von 1938-1942 und 1955-1960 entstanden. Die Uferformen der beiden ersten Transgressionsphasen wurden durch Seesediment aufgeschichtet, das durch die maximale Korngröße von etwa 1,0 mm und eine Sortie-

nung von 0,25 charakterisiert wird. Die Welle und die Barre der Transgression von 1955-1960 bestehen dagegen aus gröberem und schlechter sortiertem Sand. Während der Seespiegelabsenkungen kam es demzufolge zu einer Verschlechterung der qualitativen Merkmale des terrigenen Strandmaterials. Eine weitere Seespiegelabsenkung um 2-3 m, wo eine Sandbankstufe mit einer Neigung von 0,05 liegt, verursacht keine generelle Veränderung in der Art der Uferprozesse. Das hängt damit zusammen, dass sich eine Sandbank durch den Wellengang bei einem stabilen Seespiegel ausbildet und eine allmählichen Absenkung eine entsprechende sukzessive Lageveränderung der Sandbank bewirkt.

Da das grobe Verwitterungsmaterial mit Kalk als Kristallisationskern an die Sedimentationskegel der Flüsse gebunden ist, führt eine weitere Seespiegelabsenkung zur Verringerung der Karbonatablagerungen in Form von Biolithen. Da diese organogenen Gesteine jedoch Laichplätze einheimischer Fische sind, verursacht die abnehmende Karbonatansammlung am Seeboden eine Verschlechterung der Laichbedingungen. Nach Aussagen von Ichthyologen gingen die Fischfangerträge seit den 1970er Jahren um mehr als das Vierfache zurück, wobei die Seespiegelabsenkung zwar nicht die einzige, aber durchaus die Hauptursache ist.

Eine negative hydrologische Bilanz bewirkt nicht nur eine Absenkung des Seespiegels, sondern auch eine zunehmende Versalzung. Der Salzgehalt des Issyk-Kul' betrug 1932 5,82 g/l (Ozero Issyk-Kul', 1946), 1965 5,968 g/l (Kadyrov, 1968), 1984 5,99 g/l (Romanovskij, 1990) und 2001 6,06 g/l (Vollmer et al. 2002).

Eine nachhaltige Nutzung des Issyk-Kul' muss die Erhaltung der Wasserqualität und den Schutz vor anthropogener Eutrophierung zum Ziel haben.

Makrophytische Armelechteralgen, die in der Uferzone des Issyk-Kul' in einer Tiefe von bis zu 45 m wachsen und den sogenannten „Armelechteralgengürtel“ bilden, sind natürliche Filter für den organischen Eintrag in den See. Nach dem Absterben und biologischen Abbauprozessen bilden die biogenen Substanzen den Uferschlamm aus. In diesem Zusammenhang leitete Štrom (zit. in: Chatžinson, 1967) die allgemeine Annahme ab, dass sich die Produktivität von Binnengewässern durch das Verhältnis des Wasservolumens zur Schlammfläche der Uferzone ausdrückt.

Die Primärproduktion des Sees, also der Aufbau von Biomasse, wird durch den Eintrag organischer Substanz und durch Temperatur- und Lichtverhältnisse im Wasser kontrolliert. In nährstoffarmen Gewässern wie dem Issyk-Kul' halten sich Primärproduktion und biologischer Abbau annähernd die Waage, so dass die Phosphorkonzentration konstant bleibt. Das hängt damit zusammen, dass die mineralisierten organischen

Substanzen am Seeboden von einer Schutzschicht aus dreiwertigen Eisenverbindungen und kolloidalen organischen Komplexen bedeckt werden (Kondrat'ev et al. 1987), welche die Mobilisierung und damit die Verfügbarkeit dieser Nährstoffe verhindern.

Aus diesem Grund verfügt der Issyk-Kul' in allen Schichten über ausreichend Sauerstoff. Bei einer Klimaerwärmung kommt es jedoch zur Beschleunigung biochemischer Reaktionen und als Folge zu einer höheren Akkumulation organischer Substanz und einem höheren Sauerstoffbedarf für die Mineralisierung derselben. Außerdem wird bei einer Seespiegelabsenkung die Schutzschicht zerstört. Wenn man bedenkt, dass die höchste Biomassenproduktion der Algenmakrophyten in einem Tiefenbereich von 10 bis 20 m stattfindet, dann wird deutlich, dass durch die gegenwärtige Seespiegelabsenkung die Wellenwirkung dort wirksam ist, wo sich im 19. Jahrhundert bei einem Seespiegel von 1620 m ü. M. eine mächtige Schicht organischer Sedimente gebildet hat. Derzeit besteht demnach die Gefahr des Aufbrechens einer mächtigen Nährstoffquelle aus den Sedimenten der Uferzone. Auf diese Weise kann die Entwicklung von Phytoplankton unabhängig vom Phosphoreintrag in den See beschleunigt und die Eutrophie irreversibel vorangetrieben werden.

Die natürliche Seenalterung eines so großen Gewässers bedarf in der Regel eines relativ langen Zeitraums. Es ist nicht bekannt, wie sich die Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' um 110 m in der Mitte des Holozän auf den Nährstoffreichtum des Sees auswirkte. Seit dem nachfolgenden Anstieg kann man den See jedoch als nährstoffarmes, oligotrophes Gewässer einstufen. Die Eutrophierung des Prä-Issyk-Kul' war wahrscheinlich gering, was noch einmal beweist, dass die holozäne Seespiegelabsenkung nicht durch trockeneres und wärmeres Klima, das zwangsläufig zu einer stärkeren Eutrophierung geführt hätte, verursacht wurde. Während der nachfolgenden Transgression ist keine Reduzierung des Nährstoffgehalts durch Verdünnung denkbar, da dieser Vorgang von einer Auswaschung des organischen Materials aus dem Uferschlamm begleitet wurde. Durch anthropogenen Einflüsse wie Düngemittteleintrag, Industrieabwässer oder Verschmutzungen, die über den Niederschlag ins Seewasser gelangen, kann die Eutrophierung um einige Jahrzehnte verkürzt werden.

Besondere Besorgnis ruft die Verschmutzung in stillen, geschlossenen Buchten hervor, wo die Durchmischung stark herabgesetzt ist. In den Buchten von Pokrovka, Tjup und Rybaž'e stellte man in den 80er Jahren einen um das 39 fache erhöhten Gehalt an Ölprodukten fest, der Phenolgehalt war doppelt so hoch wie im offenen Wasser. Die Lage in den östlichen und westlichen Bereichen des Sees begünstigt im Winter eine thermische Barriere, die den Austausch mit dem offenen See behindert.

Die anwachsende Muschelkrebspopulation in der Rybaž'e-Bucht belegt die derzeitige Zunahme der biologischen Produktivität des Sees. Im offenen Teil der Tjup-Bucht in einer Tiefe von 40 m wurde ein starker Rückgang von Muscheln in den oberen 10 cm der Sedimente beobachtet. Hier verursachte die erhöhte biologische Produktivität in geringerer Tiefe wahrscheinlich eine Abnahme des Sauerstoffgehalts tieferen Bereichen, was sich in einer Verringerung der Muschelpopulation äußert.

Die Aufrechterhaltung eines biologischen Monitorings ist für Kontrolle des „Gesundheitszustands“ des Sees unabdingbar.

Neben den ökologischen Folgen führt die Seespiegelabsenkung des Issyk-Kul' auch zu ökonomischen Verlusten, die nach Prognosen im Jahr 2002 mehr als eine Milliarde Rubel betragen (Mamatkanov et al. 1990) und sich auf die Bereiche Erholung (800 Mio. Rubel), Landwirtschaft (200 Mio. Rubel), Wassertransport (90 Mio. Rubel) und Fischwirtschaft (3 Mio. Rubel) verteilen.

15. Zusammenfassung

1. Der Umfang des filtrierenden Wassers in den Bewässerungssystemen variiert in den Teilregionen zwischen 40-70% von der Gesamtwasserentnahme. Im Durchschnitt beträgt er im Becken 60%.
2. Unter Berücksichtigung der Verluste in den Kanälen (durchschnittlich 7,4%) betragen die gesamten Verdunstungsverluste durch Bewässerung 40% der Gesamtwasserentnahme.
3. Nach Berechnungen verschiedener Autoren beträgt der Grundwasserzustrom in den See 63,8-73,0 m³/s.
4. Der gegenwärtige Grundwasseranstieg ist mit der Niederschlagszunahme und einer Verlangsamung der Seespiegelabsenkung verbunden. Die enge Korrelation zwischen Grundwasserstand und Niederschlag in Seenähe beweist, dass der Anteil des in den Boden infiltrierenden Wassers enorm hoch ist.
5. Der Abfluss in der Ebene des Džergalan bildet sich hauptsächlich durch Grundwasserzustrom und, quantitativ weniger bedeutsam, oberflächlich abfließendem Niederschlag.
6. Im Frühjahr werden Fronten aus nördlichen Richtungen im Issyk-Kul'-Becken durch die westliche Gebirgsumrahmung abgeschwächt und verschärfen sich im Osten des Becken unter dem Einfluss der östlichen Gebirgsbarriere erneut. Im Sommer wird bei maximaler Verdunstung von der Seeoberfläche ein großer Teil der Niederschläge im Einzugsgebiet gebildet.
7. Julitemperaturen der Station Prževal'sk (Karakol), die für den Zeitraum 1879-1996 vorliegen, zeigen Zyklen von 31 Jahren Dauer. Im Laufe dieser 31 Jahre nimmt die Temperatur ab, begleitet von einer Verringerung der Verdunstung, einer Niederschlagszunahme und einem Anstieg des Seespiegels. Szenarien auf Grundlage dieser Periodizität prognostizieren für den Zeitraum 2003-2033 eine Seespiegelabsenkung um 60 cm.
8. Die Seespiegelabsenkung ist mit einer ganzen Reihe von miteinander gekoppelten Veränderungen des gesamten Ökosystems verbunden. Neben der Verringerung der Seefläche und des Wasservolumens kommt es zu einer Veränderung der Sedimentationsbedingungen, zu einer Verlagerung terrigener Sedimente vom Wasser ans Ufer, zu einer Zunahme des biologischen Abbaus und des Nährstoffgehalts sowie zu einer Erhöhung der Wassertemperatur.
9. Der aktuelle Seespiegelanstieg um 80 cm (1997-2003) verursachte eine katastrophale Unterspülung und Abtragung der Strände.

Anlage 1: Wasserentnahme für Bewässerung im Issyk-Kul'-Becken

Jahr	km³	Jahr	km³
1946	0,79	1974	1,33
1947	0,79	1975	1,37
1948	0,76	1976	1,32
1949	0,73	1977	1,57
1950	0,7	1978	1,49
1951	0,81	1979	1,43
1952	0,82	1980	1,5
1953	0,64	1981	1,42
1954	0,82	1982	1,38
1955	0,61	1983	1,47
1956	0,56	1984	1,5
1957	0,66	1985	1,52
1958	0,45	1986	1,53
1959	0,76	1987	1,49
1960	0,75	1988	1,53
1961	0,91	1989	1,47
1962	0,9	1990	1,33
1963	0,94	1991	1,43
1964	0,95	1992	1,38
1965	0,97	1993	1,28
1966	0,92	1994	1,22
1967	1,01	1995	1,12
1968	1,03	1996	1,03
1969	0,98	1997	1,04
1970	1,06	1998	0,82
1971	1,2	1999	0,56
1972	1,23	2000	0,62
1973	1,36	2001	0,75

16. Anhang

Anlage 2: Verdunstung nach der Formel von Ivanov

Anlage 2.1 Verdunstung (mm) Station Rybače

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1936	26,3	36,6	41,4	89,2	90,7	136,8	135,9	134,4	124,0	88,4	57,7	31,7	964,6
1937	27,7	33,7	52,0	67,6	91,5	131,6	128,0	117,8	128,7	85,6	42,8	32,1	939,0
1938	24,0	32,8	40,0	93,8	107,7	130,5	126,2	127,0	111,8	95,5	51,5	40,4	981,2
1939	35,1	34,4	42,5	63,8	105,4	110,3	123,7	175,5	118,8	89,6	56,0	40,4	995,5
1940	34,0	37,8	47,0	89,6	91,2	110,5	122,0	113,6	105,7	70,7	46,1	27,8	896,1
1941	32,2	40,5	48,0	63,5	105,6	120,1	113,2	129,2	115,3	124,9	51,2	34,4	978,1
1942	33,4	41,6	33,1	66,9	99,1	117,8	144,4	132,7	150,5	97,4	57,0	39,7	1013,7
1943	32,2	32,2	46,5	67,9	119,0	129,8	165,3	158,3	137,6	94,7	47,3	34,3	1064,9
1944	29,9	31,3	48,3	93,8	123,5	96,5	159,7	192,5	132,0	71,4	48,8	28,5	1056,2
1945	26,0	32,4	32,6	60,8	84,9	85,1	118,7	107,0	100,8	79,5	56,0	33,4	817,2
1946	29,6	26,6	50,3	74,9	101,3	109,5	104,4	133,4	131,3	82,3	50,8	34,2	928,5
1947	30,5	38,1	50,5	93,5	87,8	97,3	131,4	153,3	111,5	70,0	51,9	31,3	947,0
1948	29,9	33,6	44,5	69,6	97,8	135,1	166,0	182,0	131,2	72,8	43,5	29,7	1035,7
1949	25,3	31,9	43,0	71,9	96,1	99,8	140,4	125,6	109,7	76,1	47,9	36,2	903,9
1950	25,0	27,0	44,9	74,2	104,5	113,3	136,9	149,9	123,4	79,3	44,9	31,1	954,2
1951	29,4	33,8	44,0	69,7	96,2	105,6	136,6	144,4	131,2	61,0	46,7	34,5	933,0
1952	31,0	41,1	50,4	61,2	96,4	112,3	119,3	134,1	109,4	86,1	51,0	30,7	923,0
1953	28,5	29,3	34,6	65,7	106,8	115,5	165,3	139,8	122,0	63,5	41,1	31,6	943,8
1954	31,6	36,8	46,8	71,2	98,7	99,1	115,3	110,6	118,3	94,2	53,9	37,8	914,2
1955	33,9	37,1	50,0	68,9	90,1	125,2	130,1	136,9	105,6	101,9	47,3	43,4	970,5
1956	31,0	34,6	42,7	77,8	85,1	105,6	176,0	130,1	120,8	94,7	55,2	37,1	990,6
1957	36,4	33,7	55,2	75,1	104,2	156,5	147,1	167,4	120,1	93,5	55,2	41,0	1085,5
1958	39,4	41,8	68,2	99,0	112,8	176,4	174,2	133,9	150,9	100,7	43,9	41,1	1182,3
1959	31,3	32,1	45,6	110,4	130,6	182,4	164,1	130,1	189,7	101,1	61,8	36,8	1216,0
1960	33,8	34,3	42,5	94,5	95,9	158,1	179,7	223,0	136,2	111,7	57,6	37,8	1205,1
1961	31,5	35,7	49,9	96,7	167,9	151,9	152,6	158,6	141,8	91,7	47,3	28,6	1154,2
1962	29,8	31,3	76,6	90,7	71,5	125,8	188,7	183,7	130,7	78,9	43,6	29,8	1081,2
1963	27,3	31,6	52,9	95,2	99,6	148,2	156,7	146,3	150,9	96,3	52,7	35,5	1093,1
1964	28,0	36,2	54,8	68,4	100,9	116,9	82,2	94,1	126,1	106,9	47,3	33,3	895,0
1965	34,0	37,3	41,5	92,0	121,5	149,7	143,1	169,5	105,1	93,5	52,9	40,0	1079,9
1966	40,7	44,6	51,4	85,0	121,8	169,9	170,3	155,4	136,2	89,6	60,3	42,4	1167,6
1967	35,6	35,9	58,6	113,1	123,4	152,8	178,9	173,1	145,8	93,5	65,2	41,8	1217,8
1968	39,8	41,8	64,0	76,8	88,7	133,8	182,2	198,5	144,1	95,1	59,0	47,7	1171,5
1969	25,4	26,8	33,0	72,2	106,9	123,4	122,1	135,0	91,9	72,1	52,5	38,3	899,6
1970	30,4	33,5	55,9	85,3	131,6	157,3	147,0	153,8	144,0	90,4	66,8	51,7	1147,6
1971	33,8	34,0	55,0	95,5	117,7	139,0	151,2	175,5	116,2	74,0	34,3	35,3	1061,5
1972	26,6	26,5	38,0	76,0	69,4	83,9	111,6	114,3	80,0	49,9	52,1	39,7	768,2
1973	25,3	32,5	45,3	89,5	125,2	148,1	208,7	205,8	138,0	92,4	59,1	42,8	1212,7
1974	29,2	31,2	58,1	95,7	121,5	143,8	154,7	160,4	129,4	93,7	59,0	33,9	1110,6
1975	29,3	35,6	56,0	125,4	126,0	151,3	188,2	178,9	147,8	100,1	51,8	36,3	1226,7

1976	39,4	39,2	62,1	106,5	114,4	160,4	175,4	189,8	116,8	84,0	48,6	30,7	1167,3
1977	27,1	36,9	64,9	127,1	138,9	186,4	195,1	181,2	165,3	91,4	59,9	41,9	1316,2
1978	34,1	33,6	55,5	99,1	123,8	154,8	183,9	227,5	170,0	90,0	51,5	26,9	1250,9
1979	33,1	33,9	54,2	67,2	121,6	123,8	161,0	176,9	140,2	109,5	54,6	37,4	1113,4
1980	35,6	37,6	54,8	107,7	129,4	146,8	204,1	162,0	162,9	105,2	68,7	51,9	1266,7
1981	42,8	43,2	70,2	82,8	87,0	106,3	149,2	148,2	127,4	82,9	54,8	36,5	1031,3
1982	31,0	36,3	55,1	125,0	155,3	159,7	172,9	157,5	138,0	87,7	54,6	37,6	1210,7
1983	34,9	44,5	56,5	104,9	118,3	137,4	194,2	191,7	143,2	93,5	54,0	37,8	1210,9
1984	33,2	29,8	52,7	82,2	115,8	165,9	239,5	243,4	138,7	88,3	59,5	34,0	1282,9
1985	32,5	38,4	46,1	113,0	121,2	184,2	179,0	157,9	167,0	102,5	60,4	50,8	1253,1
1986	46,6	47,7	57,4	108,4	120,7	140,3	162,3	151,9	151,3	103,6	58,6	30,7	1179,6
1987	27,1	29,3	48,2	73,7	115,2	121,1	145,1	217,1	135,5	74,0	58,1	27,5	1071,9
1988	34,0	37,0	38,6	113,5	115,3	182,1	175,7	150,5	121,1	96,8	64,4	47,6	1176,7
1989	34,9	35,3	57,2	76,7	84,4	129,6	171,9	164,9	125,9	95,7	56,0	42,1	1074,6
1990	45,2	51,3	65,9	111,1	143,6	219,7	140,4	161,0	187,3	84,3	48,3	32,1	1290,4
1991	25,1	31,0	45,4	102,6	131,2	135,7	159,0	163,1	152,1	95,2	64,3	49,1	1153,7
1992	45,0	41,8	54,2	115,0	125,0	122,2	184,8	198,8	172,5	106,5	69,2	49,4	1284,2
1993	42,1	63,2	68,8	107,6	99,2	155,8	163,5	168,3	158,6	79,3	55,2	36,3	1197,9
1994	33,8	31,3	53,6	70,5	117,6	143,7	169,9	186,7	118,3	113,7	59,1	38,1	1136,4
1995	41,2	46,5	63,1	122,5	138,0	144,2	167,5	179,8	120,5	80,9	60,3	38,0	1202,5
1996	37,0	27,7	47,0	78,3	115,8	122,2	142,2	160,1	146,8	75,4	51,9	45,0	1049,5
1997	43,2	50,6	77,6	143,9	125,2	188,8	195,1	205,0	156,6	112,6	40,6	30,7	1370,0
1998	36,8	37,4	56,0	90,4	107,9	154,1	164,7	156,1	144,0	105,9	64,9	45,4	1163,5
1999	40,8	44,9	59,3	88,6	138,7	143,8	118,7	161,8	134,5	89,5	48,9	39,4	1108,9
2000	34,2	31,5	56,0	100,3	120,5	119,9	164,5	180,2	129,8	73,9	59,0	41,8	1111,4
Mittel.	33	36,3	51,6	89,2	111,4	137	156	160,4	133,7	89,6	53,8	37,4	1089,3

Anlage 2.2 Verdunstung (mm) Station Karakol

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1940	21,5	26,7	44,8	105,9	83,9	111,1	116,9	101,3	82,6	52,9	34,4	23,9	805,9
1941	20,8	30,8	44,6	76,3	111,5	120,3	103,3	119,5	115,8	90,5	34,3	26,9	894,7
1942	19,9	21,0	28,8	64,5	85,9	123,4	118,6	123,4	116,4	85,0	40,4	26,5	853,8
1943	18,3	21,2	32,1	78,8	122,1	101,9	154,0	96,1	108,8	63,2	29,5	23,3	849,4
1944	19,7	24,6	52,5	78,4	108,0	85,7	139,0	120,4	92,7	52,5	19,7	11,3	804,7
1945	8,9	9,9	30,8	80,8	74,7	105,1	98,0	104,9	82,3	49,4	34,9	23,1	702,9
1946	16,0	13,0	34,9	67,1	59,1	63,0	63,5	77,1	126,1	76,0	26,0	17,0	638,8
1947	16,7	22,3	49,7	88,4	97,1	103,0	132,0	146,8	104,3	54,6	29,3	17,9	862,1
1948	15,1	19,4	29,7	65,9	96,7	120,4	158,6	157,5	114,0	72,3	34,0	18,4	902,0
1949	12,5	23,3	25,5	72,7	99,1	99,6	114,4	108,0	65,4	57,7	24,6	21,2	723,8
1950	10,8	13,7	31,9	84,2	108,3	107,8	110,5	135,3	100,7	68,3	25,7	13,9	811,1
1951	11,0	11,7	23,7	64,4	111,8	96,5	122,8	116,9	124,5	51,3	31,8	25,2	791,6
1952	24,0	28,0	41,4	83,8	106,1	104,0	129,4	121,2	96,7	61,1	31,8	12,7	840,2
1953	12,5	10,6	23,6	56,6	110,5	93,1	139,1	110,3	111,1	42,9	19,2	16,6	746,1
1954	16,2	15,1	29,3	68,3	80,2	83,6	93,5	82,3	83,5	66,8	42,4	21,1	682,2
1955	15,9	23,6	36,1	67,1	104,4	124,6	122,8	124,4	85,9	73,6	32,9	25,7	837,0
1956	14,3	17,8	32,7	86,2	82,9	85,3	145,5	90,6	91,0	77,9	45,5	21,7	791,5
1957	16,3	16,4	39,2	61,1	87,9	115,8	110,9	111,6	80,2	61,1	35,7	26,6	762,7
1958	23,0	26,4	46,6	62,7	82,4	117,4	123,0	87,9	84,0	54,0	35,1	25,0	767,5
1959	17,6	17,5	30,3	88,9	107,7	132,2	107,5	83,5	112,7	58,5	27,6	18,3	802,3
1960	14,4	19,9	30,3	75,6	72,4	120,4	118,9	141,1	94,1	78,3	41,8	26,9	834,2
1961	22,7	25,6	46,1	97,0	151,7	153,6	126,4	98,4	90,2	62,0	35,5	24,0	933,1
1962	20,3	24,6	65,3	91,3	91,7	112,9	147,1	149,6	101,0	67,0	33,7	22,1	926,6
1963	17,2	26,9	50,6	91,6	106,0	140,8	132,7	104,7	123,5	76,1	43,1	28,1	941,2
1964	18,5	25,0	43,3	62,3	93,0	118,6	101,4	107,3	71,5	61,1	33,8	19,3	755,1
1965	24,1	25,7	40,8	83,8	117,1	127,4	113,8	130,8	87,8	72,2	38,3	34,8	896,6
1966	30,6	34,6	43,1	79,9	93,7	140,2	132,1	116,9	101,4	70,9	34,9	22,7	901,0
1967	16,1	17,6	38,3	92,4	95,1	104,2	127,7	111,1	93,2	66,2	41,8	38,4	841,9
1968	27,7	28,1	49,4	67,3	101,0	121,1	139,1	140,2	107,7	74,1	37,7	26,9	920,2
1969	12,7	12,8	24,1	63,1	95,2	95,8	118,4	122,2	98,9	67,2	37,7	25,2	773,2
1970	16,0	18,4	34,4	71,0	101,0	139,6	105,9	108,0	97,7	61,5	43,6	26,0	823,1
1971	24,1	26,7	44,1	82,8	102,4	112,7	105,9	131,5	93,8	69,9	34,9	30,6	859,4
1972	17,4	17,8	38,9	77,8	97,2	103,2	107,6	97,0	73,1	56,1	37,4	21,6	745,0
1973	16,9	18,3	34,2	78,6	97,0	127,1	149,2	142,4	90,2	66,2	46,5	32,5	899,1
1974	16,5	25,8	43,9	80,5	96,2	112,9	133,3	118,1	89,7	60,7	35,9	13,9	827,4
1975	13,4	16,7	41,4	86,2	87,0	110,6	128,2	106,9	84,2	69,2	35,5	17,7	797,1
1976	21,8	24,4	43,0	87,3	96,7	111,2	116,5	132,7	82,2	64,8	33,0	24,7	838,4
1977	14,6	22,4	48,7	99,6	113,4	138,5	141,0	134,6	110,0	62,7	43,6	22,7	951,6
1978	17,7	18,7	39,2	74,6	99,7	101,9	128,2	145,6	116,5	71,7	31,6	20,6	866,0

1979	16,3	22,7	73,1	60,1	93,5	102,3	134,0	138,5	101,8	85,7	49,2	32,9	910,1
1980	20,8	26,4	38,9	86,9	113,2	121,0	160,8	140,9	110,6	77,2	51,1	36,5	984,2
1981	30,5	33,4	54,0	84,8	83,1	103,9	112,7	114,6	94,6	57,2	41,3	25,7	835,7
1982	25,8	31,3	41,5	108,6	125,4	122,2	115,8	108,9	90,2	64,5	29,6	16,8	880,6
1983	14,3	22,2	35,4	76,9	85,9	100,1	122,0	146,8	90,5	64,9	52,9	22,2	834,1
1984	17,9	18,9	35,4	62,1	86,3	113,3	142,4	176,5	93,6	59,8	35,7	17,3	859,2
1985	18,2	23,1	29,8	86,9	108,5	144,5	156,0	128,3	127,4	74,7	33,6	30,5	961,5
1986	21,7	25,2	35,1	89,9	97,8	108,4	131,9	122,7	116,8	69,3	37,6	21,6	877,9
1987	16,8	23,2	26,9	78,8	103,1	85,8	108,0	146,5	97,7	38,4	35,2	19,3	779,4
1988	20,4	24,2	34,5	94,7	80,7	128,3	131,8	102,8	77,2	49,9	36,8	27,0	808,3
1989	16,5	19,1	42,0	65,2	69,2	96,8	112,2	113,2	92,6	57,0	29,5	18,7	732,2
1990	15,7	20,2	37,6	84,8	109,4	146,5	87,6	104,0	109,2	53,6	35,4	16,7	820,9
1991	13,6	14,1	23,8	76,1	94,7	99,4	145,0	110,0	107,3	59,0	36,1	20,8	799,7
1992	15,3	23,5	30,3	80,0	83,5	93,1	131,9	124,0	99,8	74,2	46,4	23,5	825,4
1993	18,8	27,5	43,6	101,9	89,4	124,0	135,2	138,8	123,2	65,3	44,1	30,4	942,3
1994	26,5	26,1	56,9	81,0	125,4	146,8	165,4	170,5	114,3	94,5	59,9	32,4	1099,7
1995	23,6	29,9	54,3	103,9	138,1	162,0	172,1	175,6	138,9	76,3	44,6	18,0	1137,3
1996	15,3	15,1	46,2	68,2	107,9	128,6	141,0	122,2	127,7	56,0	36,9	22,4	887,6

Mittel 18,3 21,9 39,4 79,6 98,6 114,3 126 121,8 100 65,3 36,7 23,3 845,2

Anlage 2.3 Verdunstung (mm) Station Krasnyj Oktjabr'

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1946	21,2	14,9	26,0	36,8	68,0	71,3	82,7	86,6	101,4	60,5	23,1	13,3	606
1947													
1948	5,4	6,0	11,7	23,1	69,2	89,0	145,1	157,1	93,3	62,0	31,8	16,1	710
1949	12,8	16,5	22,1	51,0	64,4	63,9	105,2	95,4	65,4	45,7	22,5	17,0	582
1950	14,6	17,9	32,8	52,5	91,0	100,1	107,4	128,3	92,5	61,9	26,1	13,0	738
1951	11,5	10,5	28,5	66,2	92,6	75,5	84,3	124,0	111,8	39,0	25,1	17,6	687
1952	15,4	20,1	31,5	56,0	80,6	93,9	101,1	113,6	83,9	49,8	18,0	11,9	676
1953	10,9	13,9	20,0	47,6	88,5	87,7	130,7	102,6	115,8	36,2	20,1	15,6	690
1954	12,6	15,1	27,1	57,9	82,8	71,7	83,9	83,1	76,3	62,8	29,3	16,3	619
1955	14,2	14,2	27,3	55,2	81,6	114,4	108,9	118,4	84,8	76,2	28,2	18,0	741
1956	9,6	15,4	22,2	68,0	63,4	78,0	138,8	117,5	107,8	72,5	44,8	15,2	753
1957	13,5	11,3	27,9	51,0	84,2	105,2	93,5	91,2	94,2	59,9	30,6	23,8	686
1958	16,9	19,5	36,5	44,8	65,8	96,3	103,3	77,4	85,4	64,8	26,1	22,8	660
1959	15,6	15,4	24,5	67,8	94,2	112,9	90,3	104,7	137,6	63,7	26,5	14,3	768
1960	12,0	15,7	21,7	69,9	55,7	106,7	113,0	148,1	88,6	65,7	40,2	17,7	755
1961	14,0	12,8	30,6	69,9	109,5	124,0	132,1	118,1	98,6	49,6	31,1	17,6	808
1962	14,9	21,2	56,3	71,8	64,8	97,3	134,0	130,8	89,1	53,2	20,5	15,4	769
1963	13,7	20,2	40,1	58,9	75,6	102,3	113,0	106,2	104,4	57,2	26,4	19,8	738

1964	13,7	15,1	30,9	43,7	74,4	102,9	91,1	100,3	77,6	53,4	29,8	11,7	644
1965	11,1	16,9	28,9	56,2	84,7	107,3	113,0	105,8	73,0	47,9	24,8	23,4	693
1966	20,3	21,6	22,1	43,8	59,6	79,1	69,6	77,5	90,6	58,2	22,4	14,3	579
1967	11,5	14,2	32,6	59,2	62,7	81,9	100,4	95,0	87,8	49,5	26,6	15,4	637
1968	18,5	18,9	35,7	55,4	61,6	79,8	97,8	118,7	102,0	77,5	39,5	25,7	731
1969	13,5	14,8	30,0	60,8	80,4	93,9	107,9	115,2	84,4	48,8	29,5	25,7	705
1970	14,3	18,8	28,6	58,1	82,1	101,8	96,5	107,6	102,0	65,3	36,3	18,9	730
1971	13,3	16,4	33,5	59,7	70,8	108,9	112,2	139,5	109,5	76,0	38,9	35,1	814
1972	14,2	13,5	33,4	66,6	73,9	84,9	95,8	86,6	91,0	63,2	36,2	20,4	680
1973	19,1	23,5	32,6	74,7	80,2	106,6	146,3	141,2	90,5	66,9	43,1	33,6	858
1974	17,5	20,2	43,6	61,3	81,3	107,3	121,5	109,5	86,3	63,2	31,6	14,1	758
1975	13,1	16,7	37,4	84,5	90,5	106,8	142,2	126,3	117,5	77,3	34,3	17,4	864
1976	20,3	22,8	33,5	58,9	79,3	84,9	119,7	124,6	94,0	56,9	26,2	17,6	739
1977	12,7	18,5	40,6	81,8	81,1	102,3	127,1	113,0	89,5	53,9	33,5	19,0	773
1978	11,8	11,9	28,4	61,3	67,2	75,3	119,2	152,0	127,7	92,8	39,0	31,6	818
1979	20,5	28,2	44,1	73,7	94,8	112,1	123,5	124,1	94,1	82,8	37,4	26,1	861
1980	17,1	20,7	37,3	69,7	88,8	98,1	122,1	109,2	103,7	52,9	37,8	32,8	790
1981	21,9	23,8	45,3	70,1	66,9	82,6	94,3	92,7	85,7	40,6	24,0	14,2	662
1982	13,2	18,4	27,4	79,4	96,6	86,6	104,9	99,8	66,5	34,8	28,5	19,2	675
1983	19,0	25,4	41,3	81,3	88,6	107,3	135,1	151,0	107,9	70,3	34,9	21,2	883
1984	15,6	15,6	37,1	66,2	84,9	126,4	146,4	173,7	101,5	58,4	26,3	11,7	864
1985	13,5	20,5	23,7	77,9	90,0	106,8	121,5	102,8	112,1	51,2	24,4	14,5	759
1986	13,5	17,4	25,5	59,7	77,6	92,4	132,7	117,5	112,0	59,6	30,2	17,6	756
1987	13,8	18,4	30,7	55,4	78,9	67,6	91,2	125,8	64,4	17,8	14,2	9,3	587
1988	10,3	16,5	17,4	69,0	58,5	92,6	64,7	66,9	63,4	40,2	25,3	14,0	539
1989	8,4	8,4	25,1	39,2	47,6	54,9	80,9	87,3	64,7	38,5	17,6	13,9	487
1990	11,4	13,4	28,0	43,5	70,5	101,6	86,9	102,9	101,4	49,4	24,6	12,5	646
1991	12,2	14,2	29,0	74,0	87,8	79,0	109,0	79,0	89,3	44,7	25,9	16,5	661
1992	12,8	19,5	27,9	66,7	72,2	70,8	90,3	83,9	73,1	57,2	27,0	12,1	613
1993	10,3	20,2	33,4	74,2	57,2	87,9	77,1	81,4	71,3	31,5	20,0	13,0	578
1994	10,9	14,3	32,0	51,2	87,8	99,4	103,6	104,8	66,5	51,1	32,9	16,7	671
1995	10,5	15,4	35,1	72,8	106,5	107,3	105,3	108,5	93,1	45,8	30,0	10,4	741
1996	10,0	12,6	30,9	53,9	83,5	93,6	95,2	93,1	96,7	44,0	22,7	26,1	662
1997	15,6	16,3	45,2	103,7	69,2	99,9	115,4	119,2	112,1	83,3	25,7	14,3	820
1998	12,3	17,5	32,1	63,9	74,0	90,6	104,8	95,6	83,6	53,6	28,3	14,8	671

Mittel 14 16,9 31,3 61,9 77,8 93,7 108,3 110,3 92,6 56,5 28,8 18,2 710

Anlage 3: Mittlere monatliche Luftfeuchtigkeit (%)

Anlage 3.1 Relative Luftfeuchte (%) Station Karakol

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1940	68	66	62	46	63	62	63	65	64	72	66	69	64
1941	68	63	66	62	58	61	65	62	54	57	70	67	63
1942	70	64	74	65	64	60	63	60	54	53	66	65	63
1943	71	70	71	55	52	62	56	69	59	62	69	68	64
1944	65	64	60	59	58	69	61	64	63	68	80	76	66
1945	82	80	63	58	70	62	69	66	68	74	72	70	70
1946	78	82	68	67	76	76	79	74	52	61	72	73	72
1947	70	70	66	56	61	62	57	54	59	68	78	73	65
1948	78	71	74	64	59	58	53	52	54	59	68	72	64
1949	80	68	76	62	60	64	62	65	70	66	71	66	68
1950	83	78	74	51	59	62	66	58	60	60	71	72	66
1951	78	75	76	63	57	64	60	61	55	72	71	70	67
1952	68	66	66	57	56	62	60	62	62	64	66	77	64
1953	77	86	78	66	59	68	58	63	59	70	78	76	70
1954	70	76	72	67	63	68	68	72	67	64	62	65	68
1955	68	70	71	56	56	58	60	61	64	58	69	71	64
1956	70	74	70	56	66	67	59	69	65	58	64	64	65
1957	69	67	66	61	58	60	63	62	66	64	67	68	64
1958	65	67	65	67	62	58	62	69	67	69	67	73	66
1959	72	71	69	56	52	55	65	72	62	70	74	74	66
1960	75	77	70	56	66	58	62	57	62	57	59	63	64
1961	62	61	59	52	46	49	60	67	66	62	66	65	60
1962	66	71	58	52	63	60	56	54	59	62	63	68	61
1963	73	68	62	53	57	53	58	64	52	60	64	70	61
1964	66	67	66	66	59	58	66	64	70	63	70	74	66
1965	69	65	64	58	54	56	64	58	64	62	68	59	62
1966	60	63	64	55	57	55	58	63	61	59	63	70	61
1967	68	72	68	54	61	64	59	62	63	62	59	59	63
1968	63	61	64	59	59	59	57	55	57	58	68	68	61
1969	74	73	80	66	62	65	62	60	59	64	69	74	67
1970	72	75	66	64	59	52	65	65	62	66	66	69	65
1971	60	66	64	57	58	62	65	58	60	63	72	71	63
1972	73	67	68	57	62	64	63	67	70	68	70	72	67
1973	70	74	67	62	60	58	57	56	63	62	64	63	63
1974	71	59	61	62	62	60	59	59	63	64	67	72	63
1975	74	74	68	56	61	61	60	65	66	61	63	71	65
1976	70	68	63	56	62	61	64	58	67	63	65	65	64
1977	71	64	60	51	54	57	56	58	59	66	68	70	61
1978	66	69	67	65	63	66	62	55	57	63	71	78	65
1979	73	72	64	68	59	63	58	57	58	60	58	66	63
1980	67	67	66	57	58	58	53	55	57	62	66	63	61
1981	62	62	62	58	67	63	64	61	61	64	63	67	63

1982	69	65	64	49	52	58	63	64	63	65	71	75	63
1983	78	71	69	61	64	64	63	59	65	65	70	72	67
1984	69	70	72	65	64	62	58	52	62	65	70	69	65
1985	72	73	71	58	55	52	54	59	52	60	67	62	61
1986	67	68	67	53	59	61	60	61	58	64	70	73	63
1987	75	75	72	57	57	67	66	57	63	73	69	79	68
1988	73	67	71	55	64	59	62	67	70	70	73	74	67
1989	74	70	67	60	70	65	65	64	64	70	72	81	69
1990	77	73	70	57	59	57	72	68	63	72	73	81	69
1991	78	79	80	63	63	66	58	64	62	68	71	77	69
1992	79	73	72	62	64	67	60	60	61	59	63	74	66
1993	67	67	63	48	59	58	57	53	55	61	64	61	59
1994	55	59	55	51	51	51	51	49	51	50	59	61	54
1995	60	58	54	44	46	48	49	47	49	57	66	75	54
1996	74	80	62	59	55	56	56	60	55	67	68	75	64
1997	78	72	67	60									
Mittel	70	69	66	58	59	60	60	60	60	63	67	69	64

Anlage 3.2 Relative Luftfeuchte (%) Station Krasnyj Oktjabr'

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1938	76	75	73	56	57	55	62	57	51	64	71	73	64
1939	73	75	71	68	62	56	59	50	56	62	71	73	65
1940	71	75	73	55	68	58	58	62	56	72	72	67	66
1941	71	76	72	71	66	64	62	55	52	56	70	75	66
1942	74	72	72	68	72	68	60	62	56	60	70	70	67
1943	70	70	76	68	56	61	53	54	52	56	70	66	63
1944	68	70	59	59	52	65	48	48	55	67	66	68	60
1945	69	62	70	62	64	70	64	58	59	60	76	69	65
1946	68	75	69	76	69	72	71	69	57	65	73	75	70
1947	70	68	69	63	66	64	55	56	61	67	69	69	65
1948	90	89	88	86	70	68	56	51	60	63	66	72	72
1949	76	74	78	72	74	77	64	68	68	71	70	64	71
1950	72	66	72	68	65	64	66	59	61	61	68	68	66
1951	75	74	69	62	64	72	72	58	57	78	75	75	69
1952	73	70	72	70	66	65	68	63	65	68	79	76	70
1953	76	79	81	71	67	70	60	64	54	73	74	75	70
1954	72	73	73	72	62	73	71	71	68	63	72	65	70
1955	62	76	77	63	65	62	64	62	62	52	69	76	66
1956	70	72	78	64	74	70	60	59	56	57	62	70	66
1957	70	72	74	67	60	64	68	68	58	62	71	70	67
1958	69	70	70	76	70	65	67	72	64	60	74	75	69
1959	71	71	74	65	58	61	70	64	50	65	74	76	67
1960	74	78	77	58	74	62	63	52	62	60	57	70	66
1961	70	77	70	65	60	58	58	59	60	67	67	67	65
1962	68	70	62	62	74	65	58	58	62	68	76	73	66
1963	74	75	69	69	69	65	63	62	56	68	76	76	69
1964	71	78	75	76	67	63	69	65	66	64	72	81	71
1965	81	72	73	71	66	62	63	64	68	73	79	70	70
1966	70	75	79	75	72	74	77	75	64	65	71	77	73
1967	68	73	71	70	74	71	66	66	64	71	70	80	70
1968	70	69	73	66	75	72	68	60	57	54	66	67	66
1969	67	64	74	67	67	65	64	60	63	73	75	72	68
1970	70	71	70	70	65	63	67	63	57	62	68	74	67
1971	68	74	70	68	70	62	62	53	52	58	68	65	64
1972	72	67	71	61	70	69	65	69	61	62	70	68	67
1973	59	63	68	63	66	63	55	54	61	59	64	56	61

1974	62	62	60	70	67	61	61	60	63	61	69	66	64
1975	70	71	70	55	58	61	53	57	51	55	63	64	61
1976	66	67	70	69	68	69	61	58	61	66	72	72	67
1977	71	66	65	59	66	67	58	63	65	70	75	72	66
1978	70	76	75	70	74	74	63	50	49	49	59	61	64
1979	56	58	56	60	57	58	59	59	59	58	63	70	59
1980	66	70	66	64	66	64	61	63	57	72	73	62	65
1981	67	67	66	64	73	70	69	67	62	73	75	77	69
1982	79	75	78	60	61	69	65	65	71	80	69	64	70
1983	66	60	63	57	62	60	56	54	55	58	68	67	61
1984	64	67	69	62	63	55	53	49	56	63	74	69	62
1985	71	71	74	60	61	61	61	65	53	70	71	76	66
1986	70	72	75	67	66	65	57	60	56	66	74	76	67
1987	74	77	75	69	66	73	70	60	74	87	86	88	75
1988	82	73	84	65	73	68	80	77	74	74	80	85	76
1989	84	85	78	75	79	79	73	70	73	78	81	84	78
1990	80	81	77	77	72	68	71	66	62	72	79	84	74
1991	76	76	74	62	64	72	66	72	66	74	77	79	72
1992	79	74	71	67	68	74	71	71	70	71	76	80	73
1993	77	73	71	60	73	69	74	71	72	80	76	80	73
1994	77	75	72	68	64	67	68	67	70	71	77	79	71
1995	78	75	68	59	57	64	67	65	64	73	74	82	69
1996	80	80	74	68	64	67	69	68	63	73	80	76	72
1997	80	78	67	57	71	66	64	61	58	59	72	75	67
1998	76	75	69	67	67	69	67	69	68	70	74	78	71
1999	73	70	69	64	63	67	70	67	64				
Mittel	72	72	72	66	66	66	64	62	61	66	72	73	68

Anlage 3.3 Relative Luftfeuchte (%) Station Balykši

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1936	50	58	58	57	60	58	57	56	54	58	54	56	56.3
1937	56	64	53	58	61	55	61	62	53	55	49	60	57.2
1938	68	63	63	53	59	54	61	60	57	51	57	54	58.3
1939	59	66	64	59	57	63	63	48	55	54	56	62	58.8
1940	61	62	62	54	60	64	63	63	58	66	60	70	61.9
1941	62	64	66	68	60	62	64	61	57	44	61	66	61.2
1942	62	50	74	63	60	62	58	59	43	50	59	56	58
1943	62	63	60	60	53	54	53	52	50	48	58	62	56.2
1944	62	69	66	53	52	66	56	45	50	60	57	50	57.2
1945	62	48	68	68	65	70	64	68	63	62	56	61	62.9
1946	66	76	59	62	60	60	66	58	53	60	51	53	60.3
1947	62	60	65	54	64	65	59	55	58	62	64	59	60.6
1948	66	60	64	60	59	54	53	48	49	61	64	60	58.2
1949	69	65	63	61	61	65	56	61	54	56	53	54	59.8
1950	70	64	66	56	60	62	60	56	54	57	56	55	59.7
1951	60	48	63	61	62	62	58	56	54	70	61	67	60.2
1952	66	62	61	68	60	61	64	61	59	55	52	62	60.9
1953	63	72	72	62	61	62	53	57	57	60	59	64	61.8
1954	59	60	60	66	56	64	63	65	57	55	55	47	58.9
1955	56	61	63	56	62	60	60	60	60	48	66	62	59.5
1956	56	64	66	61	66	62	54	60	57	52	62	55	59.6
1957	50	55	60	53	53	50	56	49	55	52	55	58	53.8
1958	56	58	52	51	50	42	50	57	46	48	58	60	52.3
1959	62	58	61	46	44	42	50	60	43	52	50	57	52.1
1960	59	70	60	45	56	48	47	38	50	46	50	57	52.2
1961	60	55	59	53	42	51	56	53	51	48	62	68	54.8
1962	61	69	53	54	71	58	48	48	51	60	55	67	57.9
1963	70	71	62	54	60	54	54	55	46	54	61	66	58.9
1964	55	61	60	64	57	61	74	72	53	42	62	60	60.1
1965	62	58	64	55	53	51	58	50	60	54	62	58	57.1
1966	58	60	59	53	46	48	50	55	52	52	46	53	52.7
1967	51	58	56	45	51	50	47	47	47	52	48	61	51.1
1968	53	52	55	55	64	56	47	42	46	50	55	49	52
1969	54	55	75	62	58	58	64	60	65	63	62	67	61.9

1970	61	66	53	57	48	47	55	54	49	55	54	60	54.9
1971	54	62	59	51	53	56	55	48	56	64	77	71	58.8
1972	63	55	68	58	73	72	64	64	70	75	62	56	65
1973	63	65	61	57	50	52	44	42	48	52	59	58	54.2
1974	56	54	53	54	53	52	55	49	51	51	55	50	52.8
1975	62	56	57	39	46	50	46	47	46	48	50	58	50.4
1976	61	52	49	46	56	48	51	47	56	55	55	59	52.9
1977	57	58	52	40	46	47	44	48	44	55	62	54	50.6
1978	54	56	54	54	55	51	50	35	43	57	58	77	53.7
1979	61	67	53	64	47	57	54	49	48	52	59	67	56.5
1980	56	58	55	47	52	51	44	52	42	52	59	56	52
1981	55	55	53	59	66	64	56	54	52	55	56	62	57.2
1982	65	58	58	42	43	48	49	52	48	55	53	56	52.2
1983	58	56	55	49	52	53	46	49	49	52	62	60	53.4
1984	53	50	61	54	53	48	36	38	48	53	56	43	49.4
1985	62	63	59	46	50	42	50	53	42	48	48	48	50.9
1986	45	49	46	43	51	52	53	55	49	49	55	66	51.1
1987	70	72	67	60	54	56	57	42	52	54	54	75	59.4
1988	63	59	69	47	50	44	52	55	56	50	60	58	55.2
1989	50	51	58	52	63	55	50	50	54	54	54	64	54.6
1990	49	47	49	44	47	40	58	54	41	59	66	68	51.8
1991	69	62	63	51	49	56	56	51	49	54	56	53	55.8
1992	54	58	49	46	47	58	46	40	36	46	52	52	48.7
1993	46	41	46	42	55	49	52	48	46	57	60	65	50.6
1994	59	59	62	59	55	56	54	49	53	46	64	60	56.3
1995	46	54	53	39	48	55	53	50	59	59	61	56	52.8
1996	46	69	62	55	54	60	59	53	51	62	61	58	57.5
1997	55	43	45	40	50	43	49	44	49	56	65	66	50.4
1998	60	63	55	55	55	51	54	56	51	50	55	58	55.2
1999	54	56	52	51	48	52	65	54	54	58	61	60	55.4
2000	60	60	54	54	56	60	53	49	54	57	53	59	55.8
2001	56	59	56	55	52	41	38	48	51	58	57	53	52
Mittel	58	58	58	53	54	54	54	52	51	54	57	59	56

Anlage 4: Erläuterungen zur verwendeten Reihe der durchschnittlichen Jahrestemperaturen

Anlage 4.1 Statistische Charakteristika langjähriger Temperaturreihen

	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
N₁	1923	1928	1947	1923	1936	1951
N₂	2000	2000	2000	1996	2000	2001
K_γ	78	73	54	74	65	51
T_{min}	7,3	8,7	10,9	4,3	6,4	5,5
T_{max}	11,0	12,0	14,1	7,3	11,0	8,2
T_m	9,1	10,5	12,6	5,9	8,6	6,7
S	0,827	0,872	0,810	0,615	1,020	0,537
Q	0,832	0,878	0,818	0,619	1,029	0,542
G	0,0131	0,0198	0,0271	0,0167	0,0191	0,0191

N₁ – erstes Jahr der Reihe; **N₂** – letztes Jahr der Reihe; **K_γ** – Anzahl der Jahre;
T_{min} – Temperaturminimum; **T_{max}** – Temperaturmaximum; **T_m** – Temperaturmittel;
S – Standardabweichung;
Q – Kriterium zur Bewertung der Genauigkeit der Approximation.

Anlage 4.2 Korrelationskoeffizienten der Lufttemperatur und Wolfszahlen bei verschiedenen time lags (Jahre)

Сдвиг	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
-10	0,077	0,106	0,069	0,150	0,098	0,182
-9	0,180	0,180	0,233	0,109	0,171	0,202
-8	0,241	0,181	0,262	0,037	0,137	0,096
-7	0,138	0,138	0,221	0,045	0,127	-0,042
-6	0,072	0,096	0,141	0,109	0,099	-0,075
-5	0,000	0,017	0,000	0,148	0,027	-0,202
-4	-0,005	0,004	-0,115	0,187	-0,022	-0,203
-3	-0,037	-0,022	-0,195	0,195	-0,127	-0,124
-2	-0,041	-0,041	-0,239	0,183	-0,140	-0,057
-1	0,002	0,038	-0,160	0,174	-0,030	0,036
0	0,013	0,070	-0,058	0,102	0,039	0,073

$0,077 - R < S_R$; $0,180 - S_R < R < 2 \cdot S_R$; $0,241 - R > 2 \cdot S_R$.

Anlage 4.3 Charakteristika der paarweisen Korrelation der Jahrestemperatur bei verschiedenen Kombination von Messstationen

Zahl der Jahrespaare

	Biškeek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
Almaty	73	54	74	65	50
Biškeek		54	69	65	50
Džalal-Abad			50	54	50
Karakol				61	46
Kazalinsk					50

Korrelationskoeffizienten

	Biškeek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
Almaty	0,844	0,671	0,650	0,670	0,648
Biškeek		0,859	0,744	0,819	0,753
Džalal-Abad			0,740	0,723	0,739
Karakol				0,536	0,918
Kazalinsk					0,510

Standardabweichungen der Korrelationskoeffizienten

	Biškeek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
Almaty	0,034	0,075	0,067	0,068	0,082
Bischkek		0,036	0,054	0,041	0,061
Džalal-Abad			0,064	0,065	0,064
Karakol				0,091	0,023
Kazalinsk					0,105

**Anlage 4.4 Charakteristika der stückweise-linearen Approximation der Jahres-
durchschnittstemperaturen der Luft an verschiedenen Messstationen**

Zahl der Aufteilungsvarianten

	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
2	69	64	45	65	56	42
3	1770	1485	630	1540	1081	528
4	20825	15180	2925	16215	8436	2024
5	111930	66045	3060	73815	23751	1365
6	237336	98280	126	118755	15504	6
7	134596	27132		38760	462	
8	6435	120		330		

Durchschnittliche Quadratfehler der besten Approximationen

	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
1	0,772	0,764	0,688	0,499	0,954	0,455
2	0,739	0,748	0,669	0,464	0,931	0,450
3	0,729	0,705	0,656	9,458	0,915	0,447
4	0,694	0,700	0,648	0,442	0,906	0,445
5	0,685	0,692	0,636	0,430	0,889	0,441
6	0,681	0,688	0,631	0,424	0,882	0,447
7	0,676	0,678		0,416	0,860	
8	0,669	0,684		0,435		

Optimumkriterium Q

	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
1	0,782	0,775	0,702	0,506	0,970	0,464
2	0,754	0,764	0,689	0,474	0,954	0,465
3	0,749	0,725	0,682	0,471	0,945	0,467
4	0,718	0,725	0,681	0,458	0,943	0,470
5	0,713	0,722	0,676	0,448	0,934	0,470
6	0,714	0,724	0,677	0,446	0,934	0,482
7	0,714	0,719		0,440	0,920	
8	0,712	0,731		0,465		

Anlage 4.5 Gradient der Jahresmitteltemperaturen (°C pro Jahr) für die Abschnitte der optimalen stückweise-linearen Approximation

	Almaty	Biškek	Džalal-Abad	Karakol	Kazalinsk	Pokrovka
Zeitraum	1923-1931	1928-1941	1947-1962	1923-1934	1935-1940	1951-2001
Gradient	-0,18859	0,10995	0,07967	-0,10544	0,31925	0,01914
Zeitraum	1931-1941	1941-1951	1962-1972	1934-1944	1940-1950	
Gradient	0,14699	-0,14400	-0,05687	0,10478	-0,14886	
Zeitraum	1941-1951	1951-1962	1972-1982	1944-1954	1950-1963	
Gradient	-0,12963	0,11200	0,07875	-0,07442	0,10352	
Zeitraum	1951-1962	1962-1972	1982-1993	1954-1964	1963-1973	
Gradient	0,08278	-0,04916	-0,02444	0,09013	-0,09531	
Zeitraum	1962-1972	1972-1982	1993-2000	1964-1974	1973-1983	
Gradient	-0,04870	0,09604	0,19160	-0,01702	0,13693	
Zeitraum	1972-1982	1982-1994		1974-1990	1983-1994	
Gradient	0,08424	-0,02022		0,04981	-0,05770	
Zeitraum	1982-1994	1994-2000		1990-1996	1994-2000	
Gradient	-0,00951	0,16482		-0,09929	0,25356	
Zeitraum	1994-2000					
Gradient	0,19086					

17. Literaturverzeichnis

- Bol'shakov, M.N.: Protiv antropogennoj gipotezy poniženija urovnja ozera Issyk-Kul' v XX stoletii (Gegenhypothese zur anthropogen bedingten Reduzierung des Wasserstandes des Issyk-Kul). In: Akademie der Wissenschaften Kirgisischen SSR, 1982, Nr. 4, S. 19-25.
- Budyko, M.I., Efimova, N.A., Lokšina, I.Ju.: Sovremennoe poteplenie (Gegenwärtige Erwärmung des Klimas). In: Meteorologija i gidrologija (Meteorologie und Hydrologie) 1993, Nr. 7, S. 29-34.
- Chatčinson, D.: Limnologia (Limnologie), Moskva 1969, 592 Seiten.
- Cigel'naja, I.D.: Vodnyj balans ozera Isyk-Kul' (Wasserbilanz des Issyk-Kul). In: Materialy gljaciologičeskich issledovanij Tjan`-Šanja (Materialen zu glaziologischen Untersuchungen des Tjan-Schan), Ausgabe 2, Frunze: Ilim, 1960.
- Davydova, A.I.: Rasčet élementov vodopotreblenija na orošaemeoe zemledelie (Berechnung des Wasserbedarfs der Bewässerungswirtschaft). In: Ozero Issyk-Kul' i tendencii ego prirodnogo razvitija (Issyk-Kul und Tendenzen seiner natürlichen Entwicklung), Leningrad: Nauka, 1986, S. 94-108.
- Efimova, N.A., Strokina, L.A.: Émpiričeskie ocenki izmenenij klimata na kontinentach Severnogo polušarija v konce XX veka (Empirische Schätzung der Klimaveränderung auf den Kontinenten der nördlichen Halbkugel). In: Izmenenija klimata i ich posledstvija (Klimaveränderung und ihre Folgen). Sankt-Peterburg: Nauka, 2002. S. 93-104.
- Girs, A.A.: Makrocirkuljacionnyj metod dolgosročnych meteorologičeskich prognozov (Makrozirkulationsmethode langfristiger meteorologischer Prognosen). Leningrad 1974, 485 Seiten.
- Gronskaja, T. P.: Vodnyj balans u ožidaemye urovni ozera Issyk-Kul' (Wasserbilanz und zu erwartende Wasserstände des Issyk-Kul'), Diss., Leningrad, 1983, S. 16.
- Kadyrov, V.K.: Novye dannye ob ionno-solevom sostave vody ozera Issyk-Kul' (Neue Daten zum Ionen-Salz-Umtausch im Issyk-Kul). In: Berichte der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, 1968, Band 150, Teil 2, S. 396-398.
- Kaplinskij, M.I.: O vlijanii vodochozjastvennych meroprijatij na izmenenie urovnja ozera Issyk-Kul' (Einfluss wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf Wasserstandveränderungen des Issyk-Kul). In: Voprosy vodnogo chozjajstva (Fragen der Wasserwirtschaft) 1974, Ausgabe 29, Frunze: Kirgistan, S. 178-185.
- Kaplinskij, M.I., Kosuchina, M.I.: Dinamika vodnogo balansa ozera Issyk-Kul' pri sovremennom sostojanii orošenija i na perspektivu (Entwicklungsdynamik der

Wasserbilanz des Issyk-Kul unter Berücksichtigung des Bewässerungsfeldbaus und Ausblick). In: Voprosy vodnogo chozjajstva (Fragen der Wasserwirtschaft) 1974, Ausgabe 29, Frunze: Kirgistan, S. 93-163.

Kaplinskij, M.I., Timčenko, L.C.: Vodnyj balans ozera Isyk-Kul' za mnogoletnij period (Vieljährige Wasserbilanz des Issyk-Kul). In: Werke SARNIGMI, 1977, Ausgabe 50 (131), S. 87-101.

Kondrat'ev, K.Ja., Kanter, R.R., Kargin, B.A., Pozdnjakov, D.V.: Čislenoe modelirovanie v zadačach distancionnogo zondirovanija vnutrennich vodoemov (Numerische Modellierung der Fernerkundung von Wasserbecken) Leningrad: Nauka, 1987, S. 63.

Krivošej, M.I.: K voprosu o priččinach padenija urovnja ozera Isyk-Kul' v 1883-1974 godach (Zur Frage der Senkung des Wasserstandes des Issyk-Kul von 1883-1974). In: Issledovanija vodnogo balansa, termičeskogo i gidrochemičeskogo režima ozera Isyk-Kul' (Untersuchung der Wasserbilanz und des hydrochemischen Regimes des Issyk-Kul) Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, S. 55-62.

Krivošej, M.I., Gronskaja, T.P.: Vodnyj balans ozera Isyk-Kul' (Wasserbilanz des Issyk-Kul). In: Problemy issledovanija krupnych ozer SSSR (Probleme der Erforschung großer Seen in der UdSSR), Leningrad: Nauka, 1986, S. 276-280.

Mamatkanov, D.M.: Modelirovanie i predskazanie rečnogo stoka (Modellierung und Vorhersage der Flussabflüsse) Frunze: Kyrgyzstan, 1973, 240 Seiten.

Mamatkanov, D.M., Sysenko, V.I., Kulžabaev, Ž.: Problemy ozera Isyk-Kul' (Probleme des Issyk-Kul), Frunze: Ilim, 1990, S. 204.

Mamatkanov, D.M., Dikich, A.N., Romanovskij, V.V., Sujunbaev, M.N., Šambetov, Z.N.: Sovremennye tendenzii temperatury vozducha i reakzija na nich razlichnyh vidov vodnyh resursov Isyk-Kul'skoj kotloviny (Gegenwärtige Tendenzen der Lufttemperatur und ihre Einfluss auf verschiedene Arten der Wasserressourcen des Issyk-Kul-Beckens). In: Écho nauki (Echo der Wissenschaft), Nachrichten NAN KR, Nr. 2-3, 1997, S. 96-101.

Meščerskaja, A.V., Golod, M.P., Beljankina I.G.: Kolebanija urovnja Kaspijskogo morja v svjazi s osobennostjami obščej cirkuljacii atmosfery v XX veke (Wasserstchwankungen des Kaspischen Meeres unter dem besonderen Gesichtspunkt der atmosphärischen Zirkulation). In: Izmenenija klimata i ich posledstvija (Klimaveränderung und ihre Folge), Sankt-Peterburg: Nauka, 2002, S. 180-194.

Novak, V.A., Romanovskij, V.V.: K voprosu ob isparenii s poverchnosti ozera Isyk-Kul' (Zur Frage der Verdunstung von der Wasseroberfläche des Issyk-Kul). In: Fiziko-geografičeskie issledovanija ozera Isyk-Kul' i ego beregov (Physisch-geographische Untersuchungen des Issyk-Kul und seiner Küsten),

- Frunze: Ilim, 1988, 52-73.
- Ozero Issyk-Kul' (Der Issyk-Kul'). Leningrad: Gidrometizdat 1946.
- Ratkovič, D.Ja.: Vodnyj balans i režim urovnja ozera Issyk-Kul' (Wasserbilanz und Wasserstandsregime des Issyk-Kul). In: Vodnye resursy (Wasserressourcen) 1977, Band 5, S. 20-33.
- Rejmers, N.F.: Prirodopol'zovanie (Naturnutzung), Moskva 1990, 638 Seiten.
- Rogers J.C., Mosley-Tompson, E.: Atlantic Arctic Cyclones and the Mild Siberian Winters of the 1980s // Geophys. Res. 1995. Vol. 22, N7. P. 799-802.
- Romanov, V.V., Vlasova, L.C., Mescheteli A.V., Sal'nova, L.V.: Izučenie uslovij formirovanija prirodných vod Issyk-Kul'skoj kotloviny s pomošč'ju tritija (Untersuchung der Faktoren der Wasserbildung im Issyk-Kul-Becken mit Hilfe des Tritiums). In: Vodnye resursy (Wasserressourcen) 1989, Nr. 4, S. 82-94.
- Romanovskij, V.V.: Ozero Issyk-Kul' kak prirodnyj kompleks (Issyk-Kul als natürlicher Komplex). Frunze: Ilim, 1990.
- Romanovskij, V.V.: Uroven' ozera Issyk-Kul' kak indikator sovremennyh izmenenij klimata (Wasserstandsänderung des Issyk-Kul als Indikator der Klimaveränderung), Biškek 1999.
- Šitnikov, A.V.: Vodnye resursy ozera Issyk-Kul' (Wasserressourcen des Issyk-Kul). In: Vodnye resursy (Wasserressourcen) 1977, Nr. 5, S. 5-19.
- Šitnikov, A.V.: Ozero Issyk-Kul' (Issyk-Kul). In: Ozero Tjan'-Šanja i ich istorija (Die Seen des Tjan-Schan und ihre Geschichte), Leningrad: Nauka, 1980, S. 5-66.
- Trofimov, A.K., Grinina, O.M.: K paleografii ozera Issyk-Kul' (Zur Paläographie des Issyk-Kul). In: Pribrežnaja zona ozera Issyk-Kul' (Küstenbereich des Issyk-Kul), Frunze: Ilim, 1979, S. 94-103.
- Venus, B.G.: Izmenenie beregovoj linii v tekuščem stoletii (Veränderung der Küstenlinie im Verlauf dieses Jahrhunderts). In: Ozero Issyk-Kul' i tendenzii ego prirodnogo razvitija (Issyk-Kul und Tendenzen seiner natürlichen Entwicklung), Leningrad: Nauka, 1986, S. 161-165.
- Vikulina, Z.A.: Vodnyj balans (Wasserbilanz). In: Ozero Issyk-Kul' (Issyk-Kul), Leningrad: Gidrometizdat 1946.
- Vollmer, M.K., Weiss, R.F., Williams, R.T., Falkner, K.K., Qiu, X., Ralph, E.A., Romanovsky, V.V.: Physical and chemical properties of the waters of saline lakes and their importance for deep-water renewal: Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. //Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.66, No.24, pp.4235-4246, 2002.