

Giese, Ernst; Mossig, Ivo

Working Paper

Klimawandel in Zentralasien

Discussion Paper, No. 17

Provided in Cooperation with:

Justus Liebig University Giessen, Center for international Development and Environmental Research (ZEU)

Suggested Citation: Giese, Ernst; Mossig, Ivo (2004) : Klimawandel in Zentralasien, Discussion Paper, No. 17, Justus-Liebig-Universität Gießen, Zentrum für Internationale Entwicklungs- und Umweltforschung (ZEU), Giessen

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/50489>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Klimawandel in Zentralasien

von

Ernst Giese¹; Ivo Moßig¹

Nr. 17, Gießen im Februar 2004

¹ Institut für Geographie, Justus-Liebig Universität Giessen

Inhaltverzeichnis

1	Fragestellung	1
2	Klimastationen und Datenlagen	12
2.1	Klimastationen	12
2.2	Datenlage und Verlässlichkeit der Daten	14
3	Temperatur der bodennahen Luftschichten	16
3.1	Entwicklung der Jahresmittelwerte	16
3.2	Entwicklung der Monatsmittelwerte	33
3.3	Auswirkungen auf die Gletscherentwicklung	37
4	Atmosphärische Niederschläge	40
4.1	Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen	42
4.2	Niederschlagswirksamkeit atmosphärischer Zirkulationsprozesse	51
4.2.1	Südwestliche Randlage des sibirischen Hochs	51
4.2.2	Nördliche und nordwestliche Kaltlufteinbrüche	54
4.2.3	Westliche Luftströmungen	55
4.2.4	Durchzug südlicher Zyklonen	56
5	Zusammenfassung	62
6	Literaturverzeichnis	67

Abbildungen

- Abb. 1: Lage repräsentativer Gletscher im Tjan-Šan
- Abb. 2: Entwicklung der Massenbilanz des Tjuksu-Gletschers im Zailijskij Alatau 1879 - 2000
- Abb. 3: Entwicklung der Massenbilanz (kumuliert) repräsentativer Gletscher im Tjan'-Šan' 1956/57 - 2000/01
- Abb. 4: Abflussentwicklung des Džuksu, Hydrologischer Posten Džuukucak, Issyk-Kul'-Becken, Nordabdachung des Terskej Ala-Too, 1937 - 2000
- Abb. 5: Seespiegelschwankungen des Aralsees und Issyk-Kul's
- Abb. 6: Entwicklung des Wasserzuflusses und der Wasserfläche des Aralsees sowie der Bewässerungsfläche im Becken des Aralsees 1910 - 2001
- Abb. 7: Seespiegelschwankungen des Balchaš- und des Bosten-Sees
- Abb. 8: Standorte ausgewählter Klimastationen in Zentralasien
- Abb. 9: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Kazalinsk 1886 - 2000, Mündungsbereich des Syr-darja in den Aral-See, 68 m
- Abb. 10: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Taškent 1880 - 2001, westliches Gebirgsvorland des Tjan'-Šan', 478 m
- Abb. 11: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol (Prževal'sk) 1880 - 1996, Issyk-Kul'-Becken, östlicher Beckenrand, 1718 m
- Abb. 12: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Naryn 1882 - 2001, mittleres Naryn-Tal, zentraler Tjan'-Šan', 2045 m
- Abb. 13: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen Zentralasiens 1880 - 2000
- Abb. 14: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Kazalinsk 1890 - 2000
- Abb. 15: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Taškent 1880 - 2000
- Abb. 16: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Karakol (Prževal'sk) 1880 - 1996
- Abb. 17: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Naryn 1890 - 2001
- Abb. 18: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen und Sonnenflecken-Relativzahlen nach Wolf der Station Karakol 1880-1996
- Abb. 19: Zusammenhang der Jahresmitteltemperaturen und Sonnenflecken-Relativzahlen nach Wolf der Station Karakol 1879-1996

- Abb. 20: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen Zentralasiens 1880 - 2000
- Abb. 21: Entwicklung der linearen Regressionskoeffizienten b zur Ermittlung des Anstiegs der Jahresmitteltemperatur der Station Almaty bis zum Jahr 2000 nach Anfangsjahren (Regressionskoeff. vom Jahr x - 2000)
- Abb. 22: Entwicklung der linearen Regressionskoeffizienten b zur Ermittlung des Anstiegs der Jahresmitteltemperatur an den Stationen Kazalinsk, Almaty (bis zum Jahr 2000) und Karakol (bis zum Jahr 1996) nach Anfangsjahren (Regressionskoeffizienten vom Jahr x - 1996/2000)
- Abb. 23: Schubweiser Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Station Kazalinsk
- Abb. 24: Schubweiser Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol
- Abb. 25: Zusammenhang zwischen dem Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen 1972 - 2000 und der Höhenlage ausgewählter Klimastationen in Zentralasien
- Abb. 26: Standardabweichungen der Monatsmitteltemperaturen der Stationen Kazalinsk, Almaty, Naryn, Biškek und Balykši 1934-2000
- Abb. 27: Zusammenhang zwischen den Trendkoeffizienten der Monatsmitteltemperaturen des Monats April 1972 - 2000 und der Höhenlage ausgewählter Klimastationen in Zentralasien
- Abb. 28: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Station Paca-Ata 1928 - 2000, Fergana-Becken, Westabdachung der Ferganskij-Kette, 1529 m
- Abb. 29: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Kazalinsk 1885 - 2001, Mündungsbereich des Syr-darja in den Aral-See, 68 m
- Abb. 30: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Almaty (Alma-Ata) 1887 - 2001, Gebirgsfußfläche des Zailijskij-Ala-Too, Nordabdachung des Tjan'-Šan, 825 m
- Abb. 31: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Karakol (Prževal'sk) 1883 - 1996, Issyk-Kul'-Becken, östlicher Rand, 1718 m
- Abb. 32: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Naryn 1910 - 2001, mittleres Naryn-Tal, zentraler Tjan'-Šan, 2045 m
- Abb. 33: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Klimastationen Almaty, Bajtik, Karakol, Sary-Taš, Naryn, Tjan'-Šan' 1880 - 2000
- Abb. 34: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Klimastationen Almaty, Bajtik, Novorosijka und Biškek (nördliche Gebirgs- und Vorgebirgsbereiche des Tjan'-Šan') 1880 - 2000
- Abb. 35: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Klimastationen Paca-Ata, Taškent, Isfana, Sary-Taš und Ak-Saj (westliche und südliche Gebirgsbereiche des Tjan'-Šan') 1880 - 2000

- Abb. 36: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1880 - 2000
- Abb. 37: Dauer und Häufigkeit des Auftretens typischer Wetterlagen in Zentralasien
- Abb. 38: Atmosphärische Zustände und Prozesse in Zentralasien
- Abb. 39: Jährliches Auftreten zonal und meridonal ausgerichteter atmosphärischer Zirkulationsprozesse auf der Nordhalbkugel 1899-2000
- Abb. 40: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen und der Jahresmitteltemperaturen der Station Taškent 1882-1998
- Abb. 41: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen und der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol (Prževal'sk) 1883-1993

Tabellen

- Tab. 1: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen nach verschiedenen Autoren und Zeitabschnitten in Zentralasien
- Tab. 2: Datenbasis ausgewählter Klimastationen in Zentralasien
- Tab. 3: Kennwerte zur Lufttemperatur ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1970 - 2000
- Tab. 4: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen in Zentralasien für verschiedene Zeitabschnitte
- Tab. 5: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperatur der Station Kazalinsk nach verschiedenen Anfangszeitpunkten
- Tab. 6: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperatur der Station Kazalinsk nach verschiedenen Endzeitpunkten
- Tab. 7: Trendkoeffizienten der Monatsmitteltemperaturen 1972 - 2000 ausgewählter Klimastationen in Zentralasien
- Tab. 8: Kennwerte zum Niederschlag ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1970 - 2000

Vorwort

Die vorliegende Untersuchung wurde im Rahmen der Arbeiten zum Forschungsprojekt: "Wasserverknappung, Wassernutzungskonflikte und Wassermanagement in Trockengebieten Zentralasiens (Usbekistan, Kasachstan, Kirgistan, Xinjiang/VR China)" erstellt. Das Ziel des Forschungsprojektes besteht darin, die Ursachen und Auswirkungen der zunehmenden Wasserverknappung und Verschlechterung der Wasserqualität in den Trockengebieten Zentralasiens zu untersuchen. Dabei spielt der Klimawandel eine bedeutende Rolle.

Die der Analyse zugrundegelegten Daten wurden uns von 'Kyrgyzhydromet' über das 'Institut für Wasserprobleme und Hydroelektroenergie' der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften in Biškek (Dr. V.V. Romanovskij, Leiter des Labors) und vom Kasachischen Forschungsinstitut für Umwelt und Klimamonitoring (KazNIIMOSK) in Almaty (Dr. M. Ž. Burlibaev, Direktor des Instituts) zur Verfügung gestellt.

Über den Textteil hinaus wurde ein umfangreiches Paket an Diagrammen zur Temperatur- und Niederschlagsentwicklung in Zentralasien erstellt. Dieses liegt in Form einer CD als Anhang bei.

Beim Aufbau der umfangreichen Datenbank und bei der Erstellung der Diagramme haben Ansgar Dorenkamp und Jan-Hendrik Marotzki als studentische Hilfskräfte wesentlich mitgewirkt. Ihnen sei für Ihre tatkräftige und zuverlässige Unterstützung ganz herzlich gedankt.

Unser besonderer Dank gilt der Volkswagen-Stiftung, die das auf vier Jahre angesetzte Forschungsprojekt (Mai 2001 - April 2005) im Rahmen der Förderinitiative "Mittelasien / Kaukasus im Focus der Wissenschaft" unterstützt.

Gießen im Februar 2004

Prof. Dr. Ernst Giese
Dr. Ivo Moßig

1 Fragestellung

Verschiedene Phänomene wie die verstärkte Schrumpfung der Gletscher im Tjan'-Šan' und Pamir-Alaj-Gebirge, die Zunahme der sommerlichen Abflussmengen von Gebirgsflüssen mit Gletscherernährung sowie Seespiegelschwankungen zentralasiatischer Seen (Aral-See, Balchaš-See und Ala-Kol, Issyk-Kul', Bosten-See, Taitmar-See, Lop-Nur, etc.) deuten darauf hin, dass sich in jüngerer Zeit in Zentralasien ein Klimawandel vollzogen hat. Dieser soll im Folgenden anhand klimatologischer Zeitreihen mit Werten der Lufttemperatur bodennaher Luftschichten und Niederschlagsmengen untersucht werden.

Auffällig ist, dass seit Anfang der 70er Jahre ein deutlich verstärkter Abschmelzprozess der Gletscher im Tjan'-Šan', Pamir-Alaj-Gebirge und Džungarischen Alatau eingesetzt hat und mit ihm ein verstärkter Wasserabfluss. Über den Tjuksu-Gletscher (Zentralgletscher) im Zailijskij Alatau (Nördlicher Tjan'-Šan'), den Kara-Batkak-Gletscher im Terskej Ala-Too (Zentraler Tjan'-Šan'; Issyk-Kul'-Becken) und den Gletscher Nr. 1 im Borochoro-Šan' (Östlicher Tjan'-Šan') liegen langfristige Berechnungen der Massenbilanz vor (vgl. Dikich 2002; Tursunov 2002; Hagg 2003). Sie deuten darauf hin, dass in Zentralasien Anfang des 20. Jh. ein langfristiger Gletscherschwund eingesetzt hat, der in den letzten 30 Jahren deutlich an Intensität zugenommen hat (vgl. Abb. 1, 2, 3). Dadurch lässt sich auch erklären, dass die Abflussmengen von Flüssen mit Gletscherernährung wie der Džuksu oder Cong-Kyzylsu (Speisung durch den Kara-Batkak-Gletscher) in den Sommermonaten seit Mitte der 70er Jahre sukzessiv zugenommen haben (vgl. Abb. 4).

Dass in Zentralasien in der jüngeren Vergangenheit eine allgemeine Klimaerwärmung stattgefunden hat, ist unbestritten. Unklar ist, ob diese Ausdruck einer zyklischen oder einer trendhaften Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ist. Unklar ist auch, seit wann die Klimaerwärmung eingesetzt hat. Durchgeführte Trendanalysen setzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an und kommen entsprechend auch zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Aizen et al. (1997) haben für 110 hydroklimatische Meßstationen im Tjan'-Šan' (einschließlich Vorlandbereiche) Trendberechnungen der Jahresmitteltemperaturen und jährlichen Niederschlagsmengen für den Zeitraum von 1940 - 1991 vorgenommen. Sie führen die Berechnungen nicht auf der Basis der Zeitreihen einzelner Klimastationen durch, sondern auf der Basis räumlich aggregierter Zeitreihen, um die starken Fluktuationen („Rauschen“) in den Zeitreihen zu reduzieren. Hierbei wurde die Methode von Thiessen angewandt (vgl. Diskyn 1970; Ward 1975).

Abb. 1: Lage repräsentativer Gletscher im Tjan' Šan

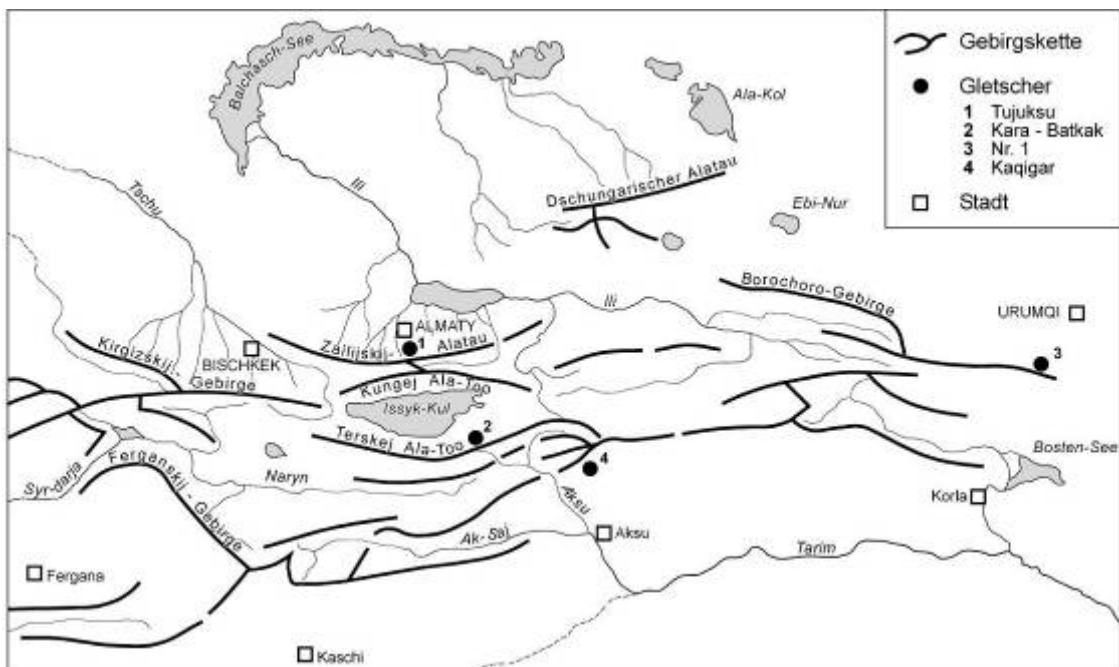
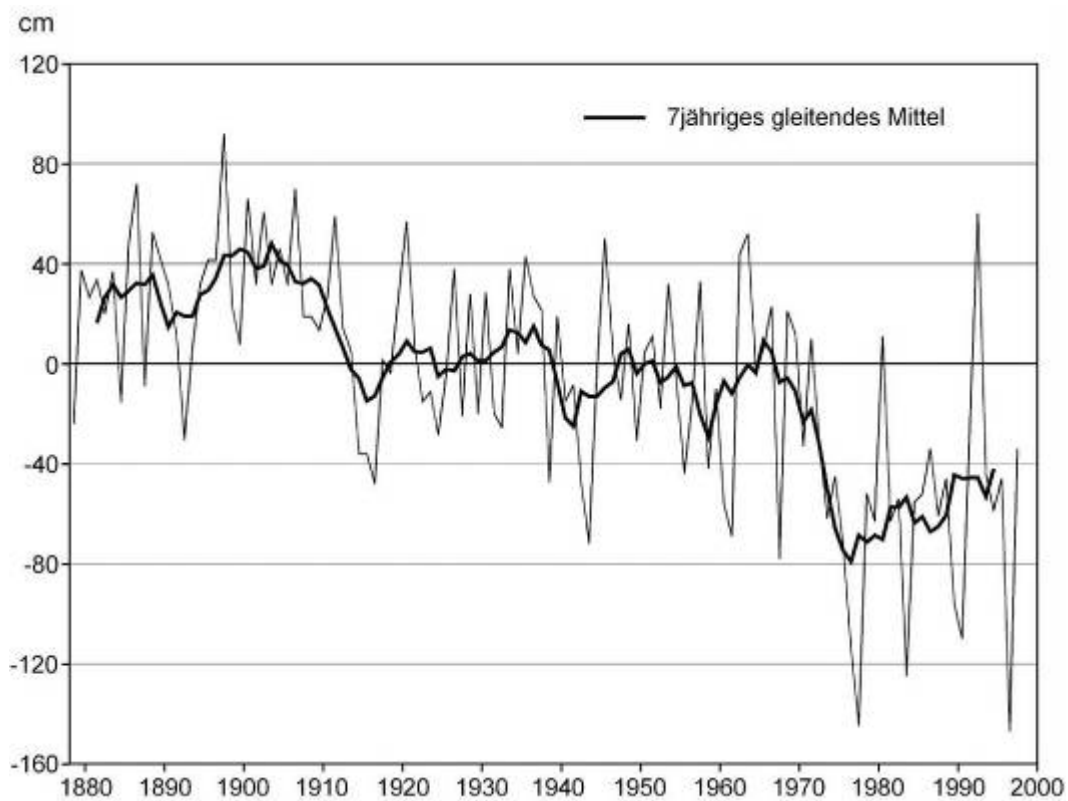
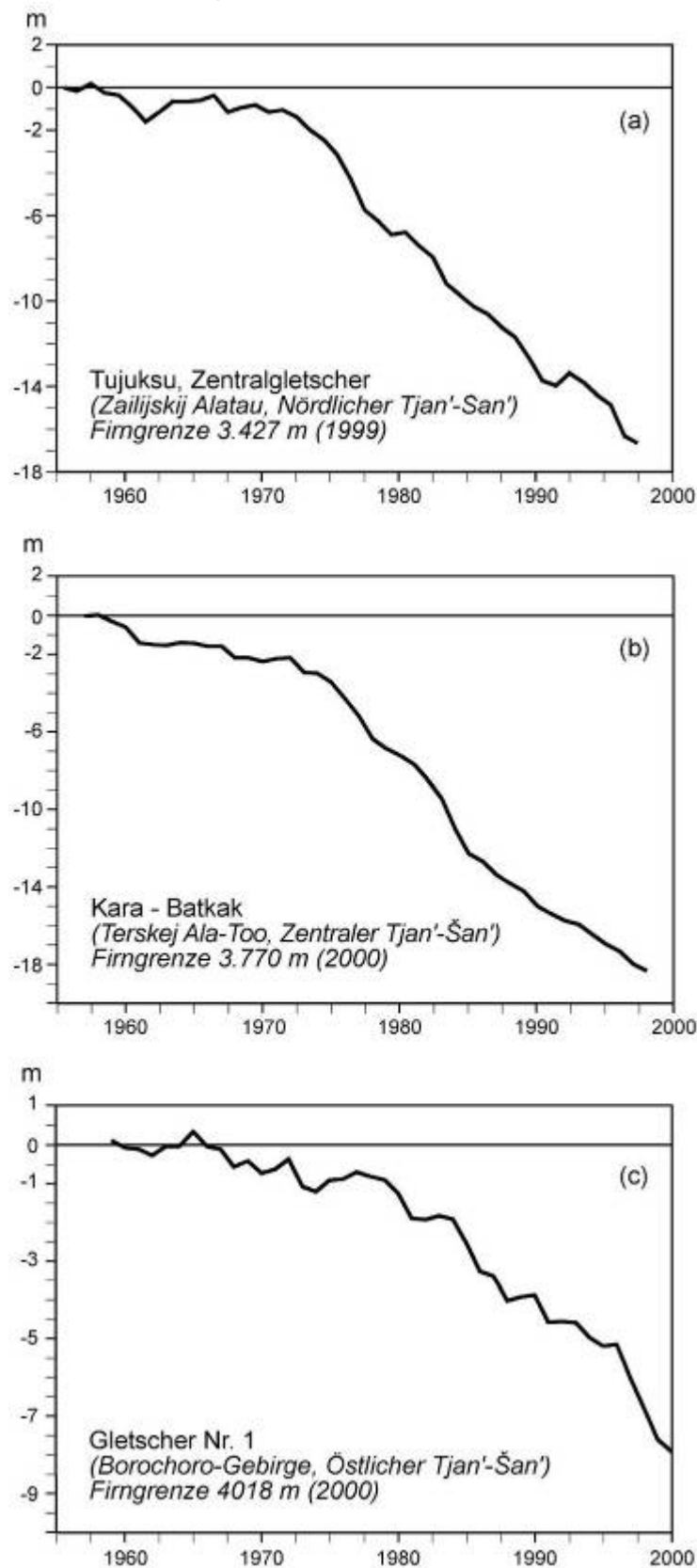


Abb. 2: Entwicklung der Massenbilanz des Tujuksu-Gletschers im Zailiyskij Alatau 1879 - 2000



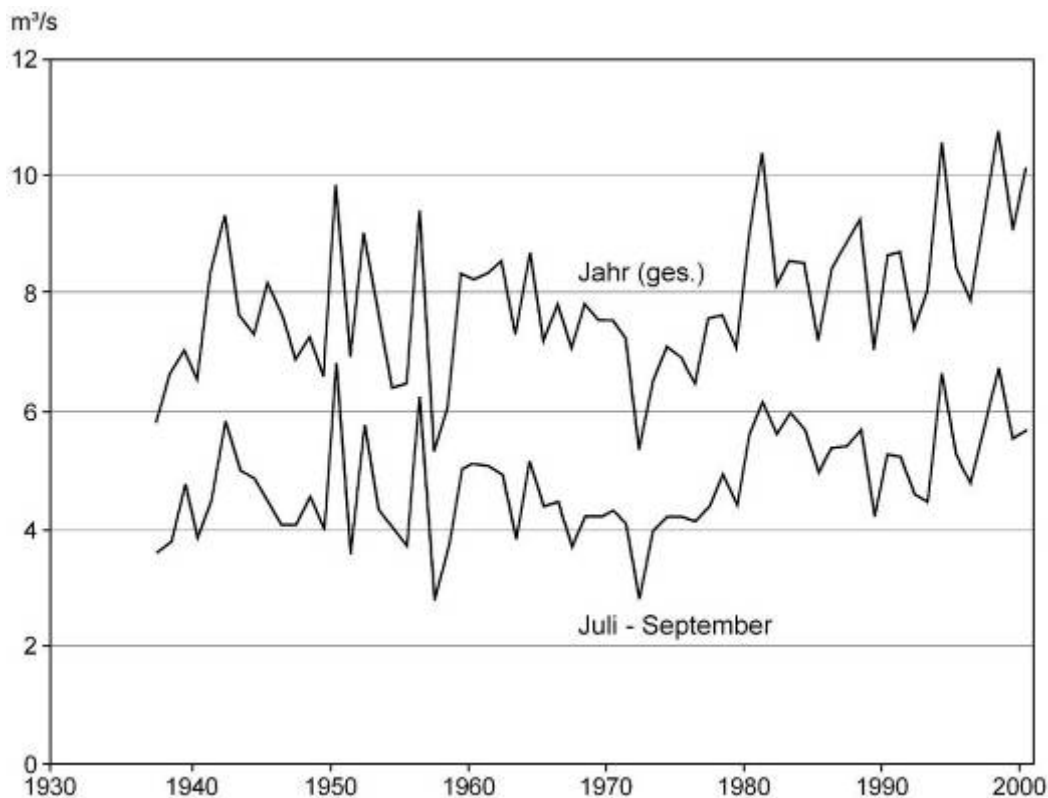
Quellen: A.A. Tursunov 2002, S. 201 (nach K.G. Makarevic, KazIGAN); Daten ab 1956/57 wurden freundlicherweise von Dr. W. Hagg, Bayrische Akademie der Wissenschaften, München, zur Verfügung gestellt.

Abb. 3: Entwicklung der Massebilanz (kumuliert) repräsentativer Gletscher im Tjan'-Šan' 1956/57 - 2000/01



Quellen: Daten wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Dr. W. Hagg, Bayrische Akademie der Wissenschaften, München (a); Dr. N.N. Dikich, Institut für Geologie der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften, Biškek (b), Prof. Gao Qianzhao, Institut für Glaziologie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, Lanzhou (c).

Abb. 4: Abflussentwicklung des Džuuksu, Hydrologischer Posten Džuukucak, Issyk-Kul'-Becken, Nordabdachung des Terskej Ala-Too, 1937-2000



Quelle: Daten wurden freundlicherweise von Dr. V.V. Romanovskij, Institut für Wasserprobleme der Kirgisischen Akademie der Wissenschaften, Biškek, zur Verfügung gestellt.

Unter Berücksichtigung der wichtigsten, wirksamen Zirkulationsprozesse sowie orographischer Faktoren (Höhenlage und Exposition) wurde der Tjan'-Šan' in vier Regionen unterteilt: in eine westliche, nördliche, zentrale und östliche Region. Desweiteren wurde eine Unterscheidung der Klimastationen nach der Höhenlage getroffen. Dabei kommen Aizen et al. (1997, S. 1397/98) zu dem Ergebnis, dass die Jahresmitteltemperaturen im Zeitraum von 1940 - 1991 im Tjan'-Šan' signifikant angestiegen sind und zwar durchschnittlich um 0,52 °C, bezogen auf 100 Jahre also um 1,0 °C. Der Anstieg der Lufttemperaturen soll sich dabei mit Ausnahme der nördlichen Tjan'-Šan'-Region in allen Regionen mit annähernd gleicher Intensität vollzogen haben. Für die nördliche Region des Tjan'-Šan' wird eine schwächere Zunahme der Temperatur ermittelt: oberhalb von 2.000 m soll die Zunahme 0,8 °C, unterhalb von 2.000 m sogar nur 0,6 °C betragen.

Auf Grund der erheblichen Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr fallen die Beträge der berechneten Korrelationskoeffizienten mit $r = 0,27$ bis $r = 0,42$ sehr niedrig aus. Ein linearer Trend ist somit in den Zeitreihen nicht sehr ausgeprägt bzw. wird von zyklischen Schwankungen und unabhängigen Temperaturfluktuationen (sog. 'Rau-

schen') überlagert. Nur 7,5 bis 17,7 % der Variabilität der Lufttemperaturen in den Zeitreihen lassen sich auf einen linearen Trend zurückführen. Und hierbei ist das Ergebnis der Berechnungen bereits auf Grund der räumlichen Aggregation der Zeitreihen und der damit verbundenen Mittelwertbildung geschönt (Problem der ökologischen Verfälschung).

Noch gravierender wirkt sich die Festlegung des Anfangs- und Endzeitpunktes der Regression aus. Sie erfolgt sachlich unbegründet. Eine andere Festlegung würde zu einem anderen Ergebnis führen (s.u.). So kommt Finaev (1999, S. 291) für den zentralen Bereich des Pamir bei geringfügig verändertem Zeithorizont auch zu einem anderen Ergebnis. Dort sollen die Jahresmitteltemperaturen im Zeitraum von 1929 - 1993 bei Stationen oberhalb von 2.000 m um 0,7 - 1,3 °C, bei Stationen unterhalb von 2.000 m um 1,7 - 1,9 °C (jeweils bezogen auf 100 Jahre) angestiegen sein.

Romanovskij (2002) hat gleichfalls eine Analyse der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung im Tjan'-Šan' vorgenommen. Er führt auf der Basis von 23 Klimastationen Trendberechnungen der Monats- und Jahresmitteltemperaturen sowie der Monats- und Jahressummen der Niederschläge durch, wobei die Trendberechnungen auf den Zeitraum der letzten 30 Jahre von 1972 - 2001 bezogen werden. Romanovskij begründet die Festlegung des Zeithorizontes seiner Trendanalyse wie folgt:

1. Seit 1972 sei ein anhaltender trendhafter Anstieg der Jahresmitteltemperaturen feststellbar. Zwar sei bei etlichen Stationen bereits in den Jahren 1934 - 1957 ein positiver Trend der Jahresmitteltemperatur beobachtbar, dieser trete aber erst seit 1972 deutlich in Erscheinung.
2. Durchgängige und hinreichend gesicherte Zeitreihen lägen für die Klimastationen in Zentralasien erst ab 1972 vor. Etliche Stationen seien verlegt worden, Messungen seien zuvor nicht immer regelmäßig erfolgt, bei den Niederschlagsmessungen seien verschiedene Geräte benutzt worden und ab 1966 sei bei der Bemessung der Niederschlagsmengen ein Korrekturfaktor eingeführt worden, um die Befeuchtung zu berücksichtigen. Störfaktoren dieser Art seien ausgeschlossen, wenn man sich auf die letzten 30 Jahre beschränken würde.

Die Trendberechnungen der aktuellen Temperatur- und Niederschlagsentwicklung werden von Romanovskij für Prognosezwecke genutzt. Durch Extrapolation der ermittelten Trends werden Monats- und Jahresmittelwerte der Temperatur- und Niederschlagsmessungen bis zum Jahr 2020 berechnet. In diesen Berechnungen liegt das eigentliche Motiv und Ziel seiner Untersuchung verankert, hier setzen aber auch die Probleme ein.

Die zunächst auf 30 Jahre angesetzten Prognosen (entsprechend den 30jährigen Trendanalysen) führen zu nicht plausiblen Ergebnissen. So ergeben sich z.B. für einige

Klimastationen „negative Niederschlagswerte“. In Kazalinsk würde die Lufttemperatur im Februar in 30 Jahren höher liegen als im Juli.

Tab. 1: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen nach verschiedenen Autoren und Zeitabschnitten in Zentralasien

Autor	gewählter Zeitabschnitt	Temperaturerhöhung/ 100 Jahren
Aizen et al. (1997)	1940 - 1991	+ 1,0 °C
Finaev (1999)	1929 - 1993	+ 0,7 - 1,3°C (>2000m) + 1,7 - 1,9°C (<2000m)
Romanovskij (2002)	1972 - 2001	bis zu + 5,1°C

Aus diesem Grund wurde der Zeithorizont für die Prognose um 10 Jahre reduziert. Es schließen sich mehrere Fragen an:

1. Ist es berechtigt, die unterstellte trendhafte Entwicklung der Monats- und Jahresmitteltemperaturen der letzten 30 Jahre von 1972 - 2001 über diesen Zeitraum hinaus um weitere 20 bzw. 30 Jahre fortzuschreiben ?
Ist es nach der bisherigen Entwicklung der Monats- und Jahresmitteltemperaturen nicht wahrscheinlicher, dass die unterstellte trendhafte Entwicklung der Lufttemperatur Teil einer längerfristigen zyklischen Entwicklung ist ?
Müssten Rechenansätze dieser Art nicht in längerfristige Entwicklungsabläufe eingebettet werden, um Tendenzen kurzfristiger Entwicklungsabläufe beurteilen zu können?
2. Da das Ergebnis der Trendberechnungen wesentlich vom Anfangs- und Endzeitpunkt des Regressionsansatzes abhängt, stellt sich desweiteren die Frage nach der Begründung der Wahl des Zeitabschnittes der Trendanalyse. Ist mit dem Anfangsjahr 1972 der Regressionsanalyse ein sinnvoller Anfangszeitpunkt bestimmt worden ?
Wie im Folgenden noch gezeigt wird, führt ein Verschieben des Anfangszeitpunktes und entsprechend auch des Endzeitpunktes bereits um wenige Jahre zu erheblich anderen Ergebnissen. Mit dem Jahr 1972 wurde ein extrem kaltes Jahr gewählt, so dass die Beträge der berechneten Trendkoeffizienten extrem hoch ausfallen. Für Biškek, Almaty und Kazalinsk werden dadurch unrealistisch hohe Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen von +4,3 bis +5,1 °C bezogen auf 100 Jahre errechnet.
3. Desweiteren ist zu fragen, ob eine Synchronizität der Temperatur- und Niederschlagsabläufe vorliegt. Sollte das nicht der Fall sein, ist zu fragen, ob dann das Jahr 1972 als Anfangszeitpunkt der Trendanalyse der Niederschlagsent-

wicklung sinnvoll gewählt ist. Auch die Wahl des Zeitabschnitts für die Analyse der Niederschlagsmengen ist - ggf. gesondert von der Analyse der Lufttemperaturen - genau zu begründen.

Um Fragen dieser Art zu beantworten, ist es notwendig, die Zeitreihenanalyse so langfristig wie möglich anzusetzen. Dabei soll den folgenden Fragen nachgegangen werden soll:

- Seit wann ist in der jüngeren Vergangenheit in Zentralasien eine Klimaerwärmung eingetreten ?
- Mit welcher Intensität hat sich die Klimaerwärmung vollzogen ?
- Sind davon alle Jahreszeiten in gleicher Weise betroffen oder lassen sich jahreszeitliche Unterschiede feststellen ?
- Ist die Klimaerwärmung der jüngeren Vergangenheit Ausdruck einer trendhaften oder zyklischen Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ?

Neben dem verstärkten Abschmelzprozess der Gletscher stellen Seespiegelschwankungen zentralasiatischer Seen eine weitere auffallende Erscheinung dar. Seit Anfang der 60er Jahre können wir bei fast allen Seen eine sukzessive Absenkung des Wasserspiegels feststellen. Der Aral-See ist seit 1960 um 22 m gesunken, seine Fläche ist auf 25% seiner ursprünglichen Fläche geschrumpft, sein Wasservolumen auf 10% (September 2002). Desgleichen ist der Wasserspiegel vom Balchaš-See, Ala-Kol, Issyk-Kul', Ebi-Nur, Ulunqur-See und Bosten-See gesunken (vgl. Abb. 5). Der Manas-See ist Anfang der 70er Jahre ausgetrocknet, der Taitmar-See seit 1968, der Lop-Nur seit 1972. Die Ursache der Verlandungsprozesse wird wirtschaftlichen Fehlplanungen und Fehleinschätzungen der sowjetischen Führung zugeschrieben, die von einer unbegrenzten Verfügbarkeit und Nutzbarkeit natürlicher Ressourcen, u. a. auch der Wasserressourcen, ausging und festlegte, Sowjet-Mittelasien zur Baumwollbasis des Landes auszubauen. Ähnliches trifft auf Xinjiang zu, da die chinesische Führung sich in dieser Phase der Entwicklung (50er/60er Jahre) dem sowjetischen Entwicklungsmodell anschloss (vgl. Giese, Bahro, Betke 1998).

Aus den in Abbildung 6 dargestellten Kurvenverläufen wird ersichtlich, dass die Ausweitung der Bewässerungsflächen und damit in Zusammenhang stehend die Ausweitung des Wasserverbrauchs für landwirtschaftliche Zwecke, vor allem für den Baumwoll- und Reisanbau, in einem unmittelbaren Zusammenhang mit den Verlandungsprozessen stehen. Ein Landerschließungsprogramm nach dem anderen wurde aufgelegt. Es wurde ein Kanalnetz geschaffen, das weitgehend ohne Einkleidung im wahrsten Sinne des Wortes „in den Sand gesetzt“ wurde, so dass mit der Anlage von Kanälen hohe Infiltrationsraten verbunden waren. In Uzbekistan erstreckt sich das Netz der Be-

wässerungskanäle über eine Länge von 183.000 km, lediglich 2 - 3 % davon sind mit Beton ausgekleidet oder anderweitig befestigt.

Abb. 5: Seespiegelschwankungen des Aralsees und Issyk-Kul's

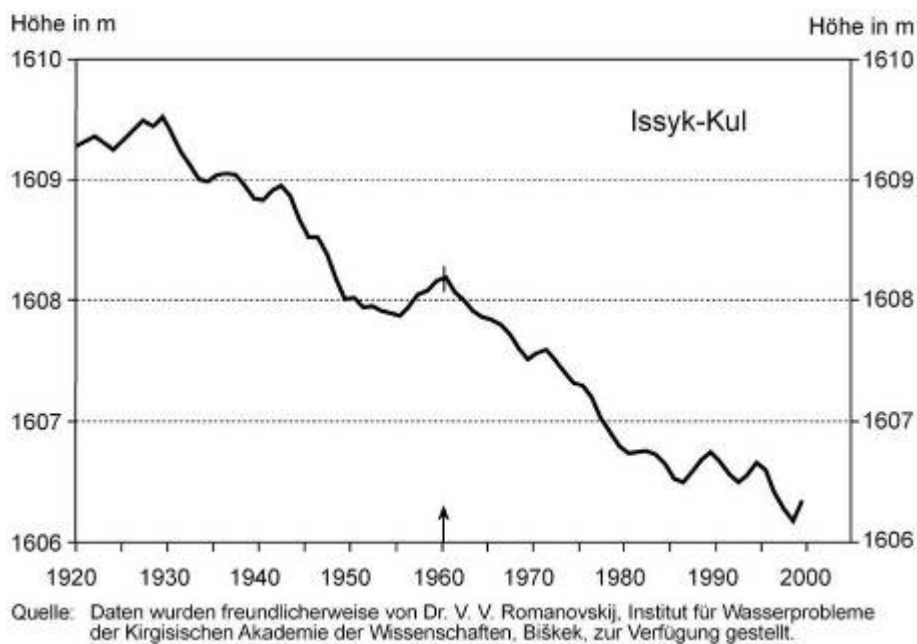
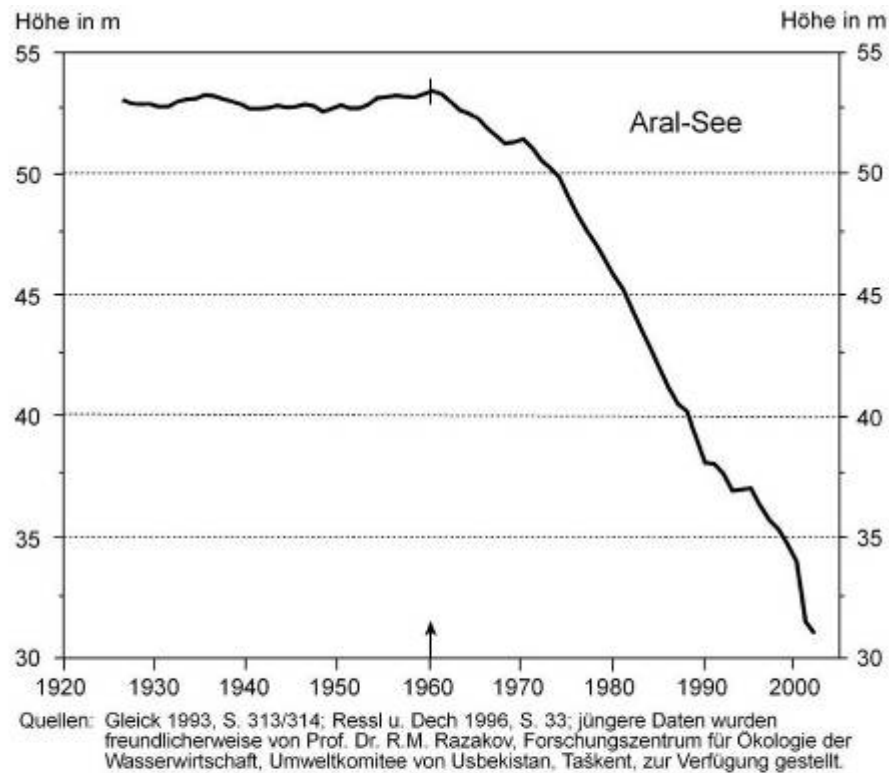
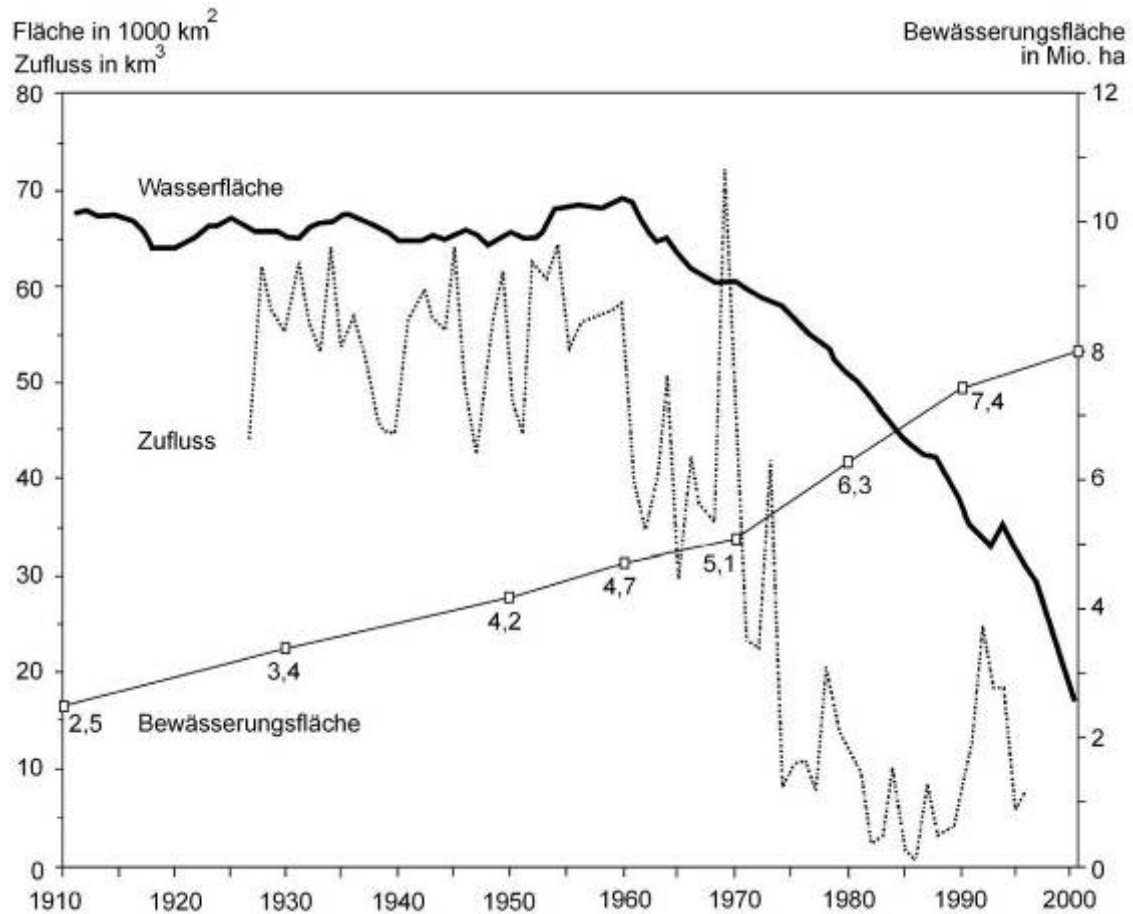


Abb. 6: Entwicklung des Wasserzuflusses und der Wasserfläche des Aralsees sowie der Bewässerungsfläche im Becken des Aralsees 1910 - 2001



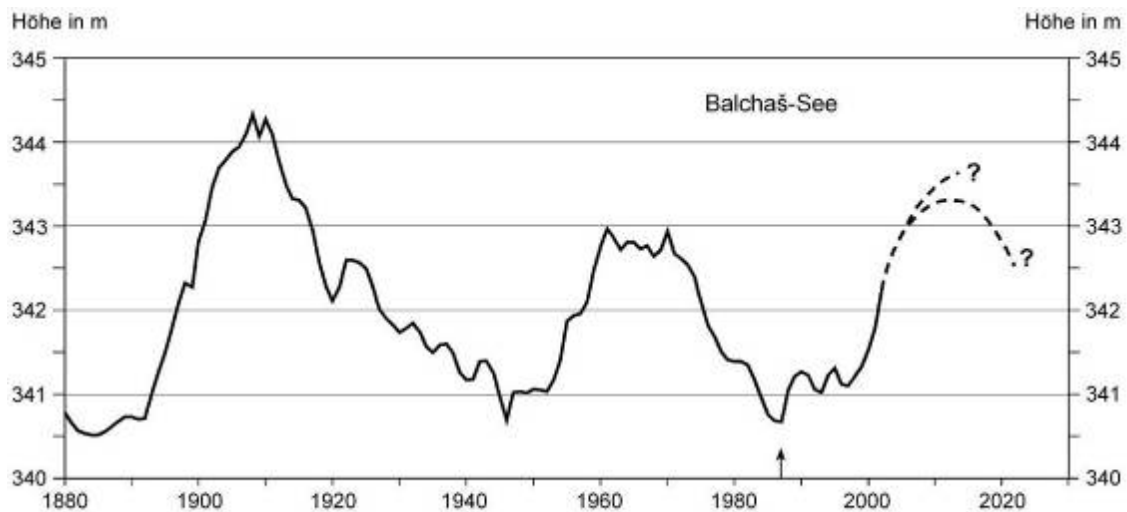
Quellen: Micklin/Williams 1996, S. 5; ab 1990 eigene Ergänzungen

Der Syr-darja besitzt einschließlich seiner Nebenflüsse eine Länge von ca. 15.000 km. Die Ausweitung des Bewässerungsfeldbaus war im Einzugsgebiet des Syr-darja mit dem Bau eines Kanalnetzes von 35.000 km Länge verbunden, einschließlich der Abwasserkanäle von rund 50.000 km. Die Wasserverdunstungsfläche hat sich allein hierdurch um mehr als das Dreifache erhöht. In die Betrachtung einzubeziehen ist die Anlage großer Flachwasserspeicher und Rückhaltebecken, so dass erhebliche Mengen Wasser infolge des Bewässerungsfeldbaus durch Verdunstung und Infiltration verloren gehen und die zunehmende Wasserverknappung verständlich werden lassen. Der Nutzungskoeffizient des Wassers (koefficient poleznogo dejstvija) liegt in den meisten Oasen unter 0,6, d.h. mehr als 40 % des Nutzwassers werden im Bewässerungsfeldbau wirtschaftlich nicht effektiv eingesetzt, sondern gehen verloren.

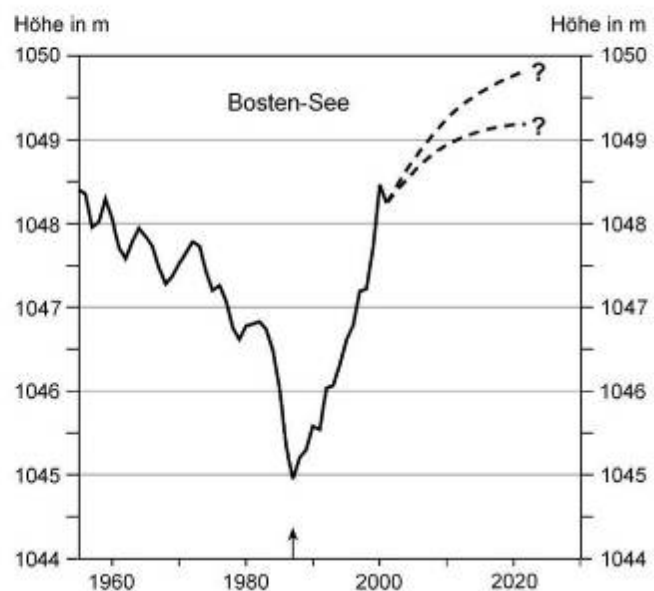
In dieses Bild passt nicht, dass der Seespiegel verschiedener zentralasiatischer Seen seit 1987 wieder ansteigt und zwar stetig. Der Balchaš-See zum Beispiel sank von 343,0 m in den 60er Jahren bis 1986/87 auf 340,7 m ab. Seither steigt er wieder an

und hat ein Niveau von 342,3 m erreicht (Tursunov 2002, S. 264). Eine ähnliche Entwicklung ist beim Bosten-See auszumachen (vgl. Wang, Giese, Gao 2003). Er sank seit Beginn der Messungen 1955 von 1.048,4 m auf 1.045,0 m im Jahr 1987 ab; seither steigt der Seespiegel wieder sukzessiv an. Er hat bereits wieder das Ausgangsniveau der Beobachtungswerte aus dem Jahr 1955 mit 1.048,2 m (2001) erreicht (vgl. Abb. 7).

Abb. 7: Seespiegelschwankungen des Balchaš- und des Bosten-Sees



Quelle: Tursunov 2002, S. 264; ergänzt



Quelle: Wang, R.; Giese, E.; Gao, Q. 2003, S. 6

Auch andere Seen wie der Ebi-Nur und Sajram-Nur verzeichnen in jüngster Zeit einen Anstieg des Seespiegels (seit 2001 bzw. 2000). Selbst ausgetrocknete Seen wie der Manas-See und Aiding-See in der Turfan-Oase füllen sich in jüngster Zeit wieder mit Wasser (seit 2002 bzw. 2001). Da keine gravierenden Änderungen in der Bewässerungswirtschaft und damit im landwirtschaftlich bedingten Wasserverbrauch eingetreten sind, stellt sich als weiteres Problem die Frage, ob das Klima in jüngster Zeit feuchter geworden ist? - Hat die Niederschlagstätigkeit in der jüngeren Vergangenheit, wie behauptet wird (vgl. Aizen et al. 1997; Romanovskij 2002), wieder zugenommen ?

Nach den Zeitreihenanalysen von Aizen et al. (1997, S. 1398) ist für den Zeitraum von 1941 - 1991 eine statistisch signifikante Zunahme der Niederschlagsmengen im Tjan'-Šan' zu verzeichnen, wobei die Zunahme in Höhenlagen unter 2000 m stärker ausgeprägt ist als in Höhenlagen oberhalb von 2000 m. Das soll insbesondere auf die nördliche und westliche Tjan'-Šan'-Region zutreffen. Die Zunahme der Niederschlagsmenge wird bezogen auf den Zeitraum von 1941 - 1991 im Durchschnitt mit 1,2 mm/Jahr angegeben.

Romanovskij (2002, S. 6/7) hat gleichfalls Trendberechnungen der Entwicklung der monatlichen und jährlichen Niederschlagsmengen in Tjan'-Šan' vorgenommen. Er bezieht seine Berechnungen auf den Zeitraum von 1972 - 2001. Zugrundegelegt werden die Zeitreihen von 21 Klimastationen. Romanovskij stellt mit Ausnahme einiger Klimastationen in zentralen Bereichen des Tjan'-Šan' gleichfalls eine allgemeine Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen fest. Diese fällt besonders bei westexponierten Gebirgsrandlagen deutlich aus. Für die westlichen Tjan'-Šan'-Bereiche wird eine Zunahme der Niederschlagsmengen von durchschnittlich 4,7 mm/Jahr ermittelt, für die nördlichen eine Zunahme von durchschnittlich 1,15 mm/Jahr. Etliche Klimastationen im Zentralen Tjan'-Šan' (Suusamy, Tjan'-Šan', Con-Ašu, Karakol) verzeichnen dagegen eine zum Teil kräftige Abnahme der jährlichen Niederschlagsmengen.

Die nachfolgende Untersuchung gliedert sich in 5 Abschnitte: Im anschließenden Kapitel 2 wird zunächst die Datenlage diskutiert und die Auswahl der in die Analyse einbezogenen Klimastationen begründet. In Kapitel 3 wird auf die Entwicklung der bodennahen Lufttemperatur differenziert nach Jahres- und Monatsmittelwerten eingegangen und ein Fazit bezüglich der Auswirkungen der Temperaturänderungen auf die Gletscher in Zentralasien gezogen. In ähnlicher Weise wird in Kapitel 4 die Entwicklung der Niederschläge analysiert und in Beziehung zu den Veränderungen atmosphärischer Zirkulationsprozesse gesetzt. Im abschließenden Kapitel 5 werden die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst. Dabei wird auf ein besonderes Phänomen der Korrespondenz der Zeitabläufe der Jahresmitteltemperaturen und der Niederschlagsmenge aufmerksam gemacht.

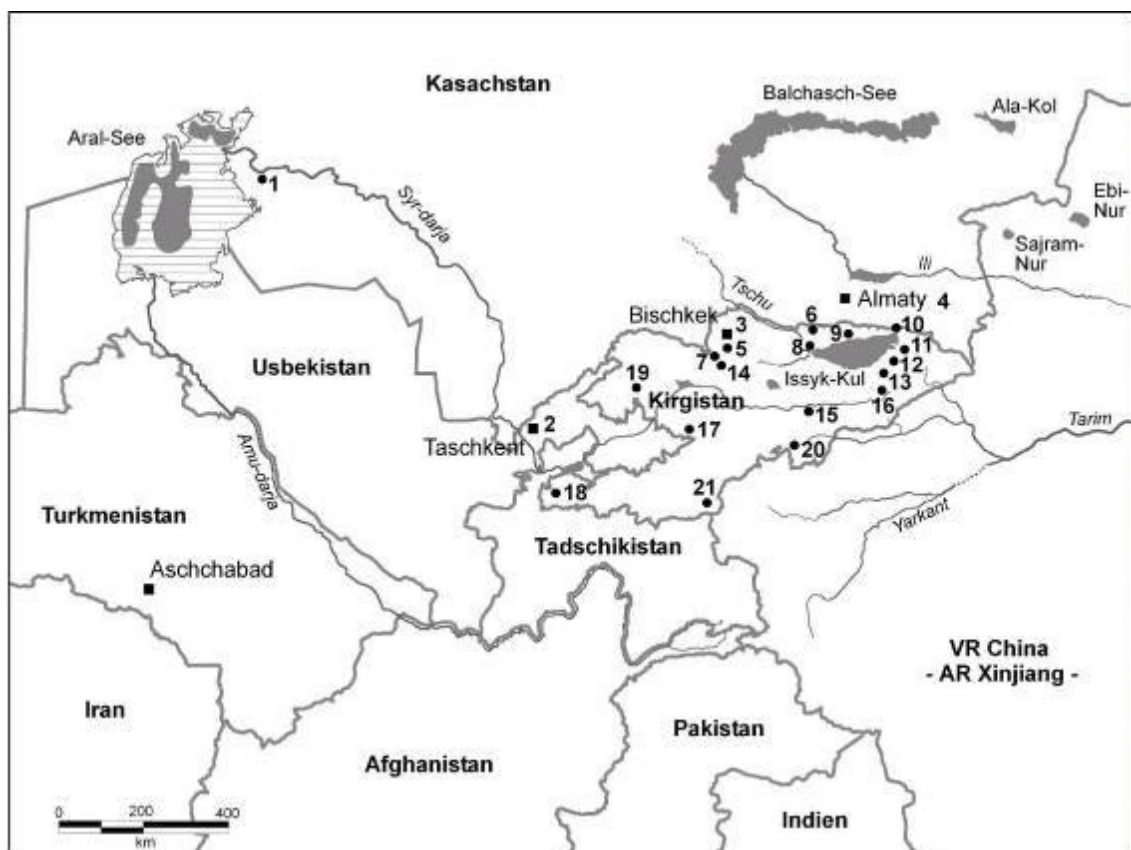
2 Klimastationen und Datenlage

2.1 Klimastationen

Für die Zeitreihenanalyse wurden solche Klimastationen ausgewählt (vgl. Tab. 2 und Abb. 8), für die langfristige Zeitreihen von Monatsmittelwerten der Lufttemperatur und Niederschlagsmengen ohne Unterbrechung vorlagen und zugänglich waren. Sie repräsentieren zugleich verschiedene typische Standorte in Zentralasien:

- Zentrale, tiefländische, aride Beckenlagen (Kazalinsk);
- Gebirgsrandlagen des Tjan'-Šan' (Almaty, Biškek, Taškent);
- Intramontane Tal- und Beckenlagen im Tjan'-Šan' (Naryntal, Issyk-Kul-Becken; Fergana-Becken);
- Gebirgs- und Hochgebirgslagen im Tjan'-Šan' in verschiedenen Expositionen, u.a. Stationen in der glazio-nivalen Zone ≥ 3.000 m (Stationen Tjan'-Šan' 3.614 m, Kara-Batkak 3.415 m, etc.).

Abb. 8: Standorte ausgewählter Klimastationen in Zentralasien



Tab. 2: Datenbasis ausgewählter Klimastationen in Zentralasien

Nr	Klimastation	Höhe in m	Topographische Lage	Zeitreihen / verfügbare Daten			
				Temperaturen		Niederschläge	
				Jahres- mittel	Monats- mittel	Jahres- mittel	Monats- mittel
1) Tiefländische Beckenlagen, nördliche Vorgebirgsbereiche des Tjan'-Šan'							
1	Kazalinsk	68	Mündungsbereich des Syr-darja in den Aral-See	1886-2001	1886-2001	1882-2001	1882-2001
2	Taškent	478	Westliches Gebirgsvorland des Tjan'-Šan'	1879-2001	1879-2001	1879-2001	1879-2001
3	Biškek	771	Gebirgsfußfläche der Kirgizskij-Kette, Nordabdachung des Tjan'-Šan'	1928-2000	1922-2000	1928-2000	1928-2000
4	Almaty	825	Gebirgsfußfläche des Zailijskij-Ala-Too, Nordabdachung des Tjan'-Šan'	1879-2000	1879-2000	1883-2001	1883-2001
2) Nördlicher Tjan'-Šan'							
5	Bajtik	1590	Kirgizskij-Kette, Tal des Ala-Arca, 20 km südlich von Biškek	1915-2001	1915-2001	1915-2001	1915-2001
6	Novorosijka	1524	Tal des Cong-Kemin (rechter Zufluss des Cu), Tal zwischen dem Kungej-Ala-Too und Zailijskij-Ala-Too	1931-2000	1931-2000	1927-2000	1927-2000
7	Tjuja-Ašuu	3120	Kirgizskij-Kette, Talschluss des Kara-Balta, Paßhöhe, Straße Biškek-Oš	1958-2002	1959-2002	1959-2002	1959-2002
3) Issyk-Kul-Becken							
8	Balykši (Rybac'e)	1670	Westlicher Beckenrand (1957 verlegt)	1931-2000	1931-2000	1931-2000	1931-2000
9	Colpon-Ata	1620	Nördlicher Uferbereich (1971 verlegt)	1929-2000	1929-2000	1929-2000	1929-2000
10	Krasnyj Oktjabr'	1645	Nordöstliche Uferseite (1999 geschlossen)	1946-1998	1946-1998	1941-1998	- -
11	Karakol (Prževal'sk)	1718	Östlicher Beckenrand (1997 geschlossen)	1879-1996	1879-1996	1883-1996	1883-1996
12	Pokrovka	1740	Südöstlicher Beckenrand	1951-2001	1951-2001	1951-2001	1951-2001
13	Kara-Batkak	3415	Terskej-Ala-Too, Gletscherstation, Quellgebiet des Con-Kyzyl-Suu, südöstlicher Rand des Issyk-Kul'-Beckens	1956-1999	1956-1999	- -	- -
4) Zentraler Tjan'-Šan'							
14	Suusamyр	2091	Hochfläche zwischen Kirgizskij-Kette, Suusamyр-Too und Džumgal-Too, Tal des Suusamyр	1937-2000	1937-2000	1937-2000	1937-2000
15	Naryn	2045	Mittleres Naryn-Tal	1882-2001	1882-2001	1910-2001	1910-2001
16	Tjan'-Šan'	3614	Ara-Bel'-Syrte zwischen Terskej-Ala-Too und Ak-Šyrak-Massiv, nahe der Goldmine Komtur, Station 1997 verlegt auf das Gelände der Goldmine Komtur	1930-2001	1930-2001	1930-2001	1930-2001
5) Westlicher Tjan'-Šan'							
17	Žalal Abad	971	Fergana-Becken, östlicher Rand	1947-2000	1947-2000	1947-2000	1947-2000
18	Isfana	1160	Fergana-Becken, südlicher Rand, Tal des Karasu, Nordabdachung der Turkestanskij-Kette	1950-2000	1950-2000	1950-2000	1950-2000
19	Paca Ata	1529	Fergana-Becken, Westabdachung der Ferganskij-Kette, Tal des Padyša-Ata	1928-2000	1928-2000	1928-2000	1928-2000
6) Südlicher Tjan'-Šan'							
20	Ak-Saj	3135	Talkessel südlich der At-Bašy-Kette	1952-1997	1952-1997	1952-1998	1952-1998
21	Sary-Taš	3155	Alajskij-Kette, hochgelegene Bergsenke, neben dem Taldyk-Paß, südlicher Tjan'-Šan'	1934-2000	1934-2000	1934-2000	1934-2000

Datenquelle: Kyrgyzhydromet, Biškek (Dr. V.V. Romanovskij) und KazNIIMOSK, Almaty (Dr. M. Ž. Burlibaev)

2.2 Datenlage und Verlässlichkeit der Daten

Die Datenlage für eine klimatologische Zeitreihenanalyse, die auf der Basis von Monatsmittelwerten und gegebenenfalls von Tagesmittelwerten durchgeführt werden soll, ist in Zentralasien aus verschiedenen Gründen nicht günstig. Für die ehemals russischen bzw. sowjetischen Teile Zentralasiens (Russisch-Turkestan bzw. Sowjet-Mittelasien) liegen langfristige Zeitreihen der monatlichen Lufttemperatur und Niederschlagsmengen nur für eine kleine Zahl von Klimastationen ab 1846 (z.B. Kazalinsk), durchlaufend ohne Unterbrechung erst ab 1879/1880, zumeist erst ab 1928/1931 vor. In den chinesischen Teilen Zentralasiens (Autonome Uigurische Region Xinjiang) setzen durchgängige Messreihen klimatologischer Daten erst 1951/52 ein.

Vor allem politische Ereignisse wie die Kulturrevolution in China 1966 - 1976 und der Zusammenbruch der Sowjetunion Ende der 80er Jahre haben zu erheblichen Beeinträchtigungen der Datenerhebung geführt. Hierzu zählen vor allem, dass Messungen unterbrochen oder nicht mehr weitergeführt wurden, Messstationen aufgegeben oder verlegt wurden (z.B. die bedeutende Hochgebirgsstation Tjan'-Šan') und die Messtechnik verändert wurde, so dass bei den klimatologischen Zeitreihen zum Teil auffällige „Inhomogenitäten“ auftreten. Soweit möglich wurde versucht, diese durch eine „Homogenisierung“ zu korrigieren. Zum Teil war das nicht mehr möglich, so dass Zeitreihen nur für den Teil relativ gesicherter, verlässlicher Messwerte verwendet wurden. So musste die Zeitreihe der Klimastation Tjan'-Šan', für die eine durchgängige klimatologische Zeitreihe ab 1930 vorliegt, mit dem Jahr 1997 abgebrochen werden, da die Station vom ursprünglichen Standort der Ara-Bel-Syrte in die nahegelegene Goldmine „Komtur“ an den Gletscherrand des Ak-Širak-Massivs verlegt wurde und die neue Messreihe zur ursprünglichen auffällige, nicht korrigierbare Inhomogenitäten zeigte. Diese scheinen vor allem dadurch bedingt zu sein, dass man im Zuge der Verlagerung auch die Messtechnik geändert hat. Anstelle konventioneller Geräte (Thermometer) werden jetzt automatische Messgeräte eingesetzt. Dabei hat man festgestellt, dass diese gegenüber Sonneneinstrahlungen unzureichend geschützt sind, so dass Messungen, die mit den automatischen Geräten durchgeführt werden gegenüber solchen, die mit konventionellen Geräten vorgenommen werden, überhöhte Temperaturen aufweisen. Für die Station Tjan'-Šan' soll sich dieser Umstand so auswirken, dass die mit automatischen Geräten ermittelten Monatsmitteltemperaturen um bis zu 2 °C über den mit konventionellen Geräten gemessenen Werten liegen (Mitteilung Prof. Podresov, Biškek).

Auch andere Stationen wurden verlegt, so z.B. Colpon-Ata im Issyk-Kul'-Becken. Sie wurde 1971 aus der Siedlung Kurskoe 10 km in östliche Richtung und 2 km weiter vom nördlichen Uferbereich des Issyk-Kul' entfernt zu den Bergen hin verlegt. Etliche Stationen wurden geschlossen. So wurde die Station Karakol (Prževal'sk) im Issyk-Kul'-

Becken, für die klimatologische Messreihen ab 1879 vorliegen, im Jahre 1997 aufgegeben.

Von besonderen Veränderungen und Unregelmäßigkeiten betroffen sind die Messreihen der Klimastationen im chinesischen Teil Zentralasiens (AR Xinjiang). Sie wurden während der Kulturrevolution von 1966 - 1976 unzulänglich und fehlerhaft weitergeführt. Messungen wurden unterbrochen, nicht regelmäßig weitergeführt und zum Teil nur einmal am Tag vorgenommen (z.B. Stationen Xiehela und Shaliguilan).

Auch der politische Wechsel von der sowjetisch beeinflussten Zeit (bis 1961) zur eigenständigen, unabhängigen Entwicklung hat in Xinjiang Einfluss auf die Messverfahren und Standorte der Klimastationen gehabt. So lag die Klimastation von Urumqi ursprünglich in der Stadt auf einer Höhenlage von 917,9 m. Sie wurde im November 1960 ca. 20 km vom ursprünglichen Standort entfernt in die Nähe des Flughafens verlegt, Höhenlage jetzt 653,6 m. Im Januar 1976 nach dem Ende der Kulturrevolution wurde sie wieder in die Stadt zurückverlegt, so dass eine nicht konsistente Messreihe vorliegt (Januar 1951 - Oktober 1960 sowie ab Januar 1976: 918 m; November 1960 - Dezember 1975: 654 m). Der nicht erklärbare, unverhoffte Temperatursprung von 5,1°C (1959) auf 7,4 °C (1961) dürfte auf diese Standortverlagerung zurückzuführen sein. Verlässlich und auch messtechnisch konsistente Zeitreihen liegen für Xinjiang erst seit Ende der 70er Jahre vor, also erst für die letzten 30 Jahre. Ferner ist zu beachten, dass die Messungen in Xinjiang zu „Beijinger Zeit“ durchgeführt werden, d.h. um zwei Stunden gegenüber den „üblichen“ Tageszeiten versetzt. Zeitreihen klimatologischer Messstationen aus dem chinesischen Teil Zentralasiens werden deshalb bei der folgenden Analyse nicht berücksichtigt.

Noch stärker als die Temperaturmessungen sind die Niederschlagsmessungen mit Unwägbarkeiten behaftet. Bei ihnen wurden im Laufe der Zeit verschiedene Geräte eingesetzt. Zudem wurde in der Sowjetunion zur Ermittlung der Niederschlagsmengen ab dem Jahr 1966 ein Korrekturfaktor eingeführt, um die sog. „Befeuchtung“ zu berücksichtigen.

Aus den vorgetragenen Hinweisen zur Praxis der Temperatur- und Niederschlagsmessung ist der Schluss zu ziehen, dass jeder, der über die Entwicklung des Klimas in Zentralasien einigermaßen gesicherte und zuverlässige Aussagen treffen möchte, prüfen sollte, ob eine Veränderung der Messtechnik, der Zeitpunkte der Messungen sowie der Standorte der Messungen vorgenommen wurde oder nicht. Bei großräumigen Untersuchungen und dem Aufkommen großer Datenmengen wird oftmals allzu gutgläubig und unkritisch auf zugängliches Datenmaterial zurückgegriffen, ohne es einer hinreichend detaillierten Überprüfung und Korrektur zu unterwerfen.

3 Temperatur der bodennahen Luftschichten

Für die ausgewählten Klimastationen sind in Tabelle 3 Kennwerte zur Lufttemperatur im Zeitraum 1970 - 2000 zusammengestellt worden. Das augenfälligste Merkmal ist die extreme Kontinentalität des Klimas in Zentralasien. Die Differenz zwischen dem wärmsten Monat Juli und dem kältesten Monat Januar beträgt bei einigen Klimastationen 35°C und mehr (z.B. Kazalinsk, Suusamyr, Ak-Saj). Mit zunehmender Höhe nehmen die Jahresmitteltemperaturen um durchschnittlich 0,6 °C / 100m ab, wobei das Bestimmtheitsmaß für diesen Zusammenhang mit $B = 86,1\%$ sehr hoch ist.

Desweiteren fällt die starke Streuung der Werte um den Mittelwert auf. Die Standardabweichung der Jahresmittelwerte 1970 - 2000 schwankt zwischen $s = 0,47$ °C (Tjan' Šan') und $s = 1,03$ °C (Kazalinsk). Die Standardabweichung der Jahrestemperaturen ist für die nachfolgende Analyse der Entwicklung der Jahresmittelwerte von Bedeutung, da das Aufzeigen der trendhaften Erwärmung und zyklischen Schwankung durch eine starke Streuung der Werte um den Mittelwert erschwert wird.

3.1 Entwicklung der Jahresmittelwerte

Liegen wie im vorliegenden Fall Zeitreihen vor, die stark oszillieren, kann durch eine Glättung der Werte (Gauß'sche Tiefpassfilterung) eine Generalisierung (Schematisierung) der Zeitreihe erreicht werden. Zunächst wurden 7jährige gleitende Mittelwerte berechnet, um hohe Frequenzen kurzer Perioden zu unterdrücken, niedrige Frequenzen längerer Perioden von 11 Jahren und mehr aber zu erfassen.

Wie man den generalisierten Kurvenverläufen in den Abbildungen 9 - 12 entnehmen kann (vgl. auch Abbildungen 1.1 - 1.21 im Anhang), vollzieht sich der langfristige Ablauf der Jahresmitteltemperaturen in einem mehr oder weniger regelhaften Rhythmus von Auf- und Abschwüngen, zumindest gilt das bis Anfang der 70er Jahre. Bis dahin ist bei den Kurvenverläufen ein zyklischer Verlauf der Jahresmitteltemperaturen feststellbar (vgl. Abb. 13). Dieser tritt deutlich hervor, wenn man die Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittel darstellt (vgl. Abb. 14 - 17). Verfolgt man hierbei die Auf- und Abschwünge der Kurven und beachtet dabei das Niveau der Tief- und Gipfelpunkte, scheinen die zyklischen Entwicklungsabläufe ab 1970/72 von einer trendhaften Entwicklung abgelöst bzw. überlagert zu werden.

Aus der Darstellung der generalisierten Kurvenverläufe in Abbildung 13 ist desweiteren zu entnehmen, dass die Kurven weitgehend synchron verlaufen. Durchgeführte Kreuzkorrelationen und Phasensynchronisationsanalysen (vgl. Rybski et al. 2002) bestätigen den Tatbestand einer starken Synchronizität der Kurvenverläufe.

Tab. 3: Kennwerte zur Lufttemperatur ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1970-2000

Nr Klimastation		Höhe in m	Durchschnittliche Lufttemperatur 1970-2000, °C			
			Jahr	Standard- abweichung	Januar	Juli
<u>1) Tiefländische Beckenlagen, nördliche Vorgebirgsbereiche des Tian'-Šan'</u>						
1	Kazalinsk	68	8,9	1,03	-9,9	27,2
2	Taškent	478	14,4	0,67	0,9	27,8
3	Biškek	771	10,9	0,76	-3,5	25,0
4	Almaty	825	9,5	0,75	-5,5	24,0
<u>2) Nördlicher Tian'-Šan'</u>						
5	Bajtik	1590	6,6	0,58	-5,0	18,5
6	Novorosijka	1524	5,0	0,59	-9,3	17,1
7	Tjuja-Ašuu (bis 1998)	3120	-3,6	0,81	-14,9	7,3
<u>3) Issyk-Kul-Becken</u>						
8	Balykši (Rybac'e)	1670	7,8	0,55	-3,7	19,1
9	Colpon-Ata	1620	8,2	0,47	-2,0	18,2
10	Krasnyj Oktjabr' (bis 1998)	1645	5,2	0,51	-8,2	16,4
11	Karakol (Prževal'sk) (bis 1996)	1718	6,3	0,51	-6,3	17,5
12	Pokrovka	1740	6,8	0,53	-4,8	17,4
13	Kara-Batkak	3415	-3,6	0,64	-13,5	5,5
<u>4) Zentraler Tian'-Šan'</u>						
14	Suusamyr	2091	-1,4	0,65	-21,7	14,0
15	Naryn	2045	3,7	0,69	-15,2	17,6
16	Tjan'-Šan' (bis 1996)	3614	-7,6	0,47	-21,5	4,6
<u>5) Westlicher Tian'-Šan'</u>						
17	Žalal Abad	971	12,9	0,67	-2,6	26,2
18	Isfana	1160	9,7	0,68	-2,9	22,1
19	Paca Ata	1529	8,0	0,65	-4,0	19,3
<u>6) Südlicher Tian'-Šan'</u>						
20	Ak-Saj (bis 1998)	3135	-7,2	0,85	-27,6	8,5
21	Sary-Taš	3155	-2,2	0,59	-16,2	10,1

Abb. 9: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Kazalinsk 1886 - 2000, Mündungsbereich des Syr-darja in den Aral-See, 68 m

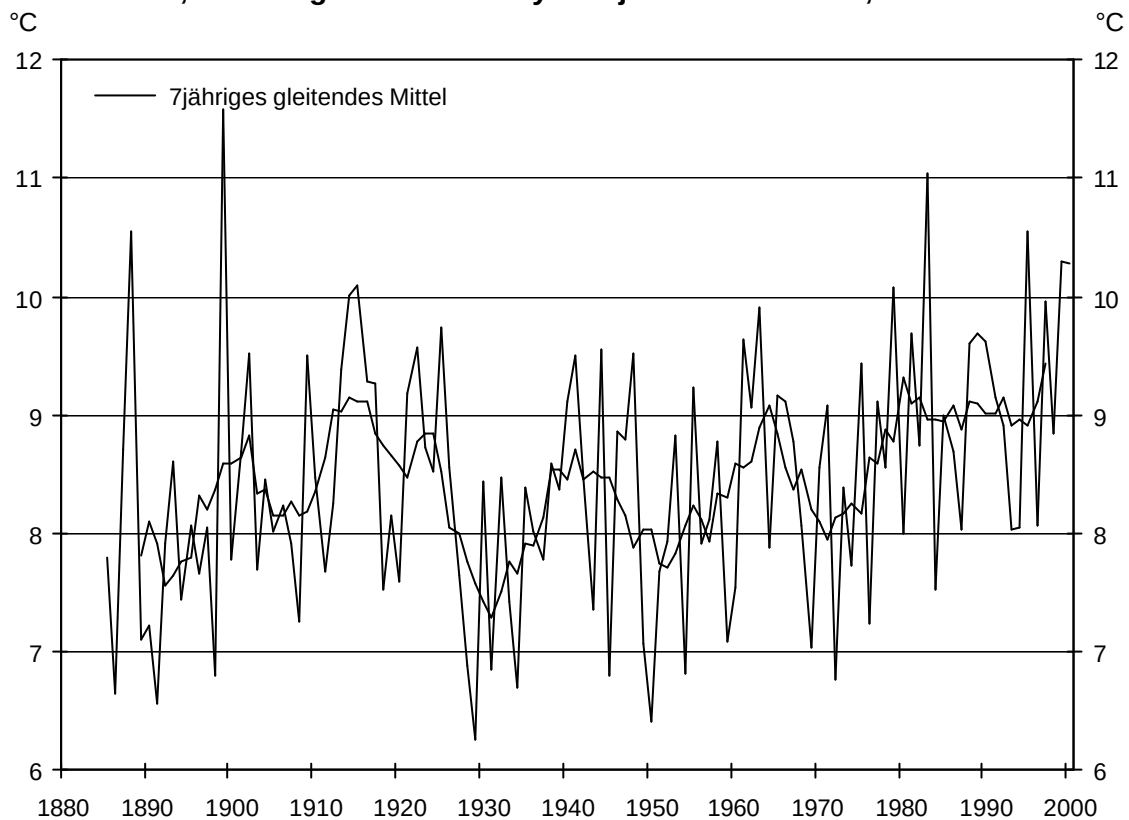


Abb. 10: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Taškent 1880 - 2001, westliches Gebirgsvorland des Tjan'-Šan', 478 m

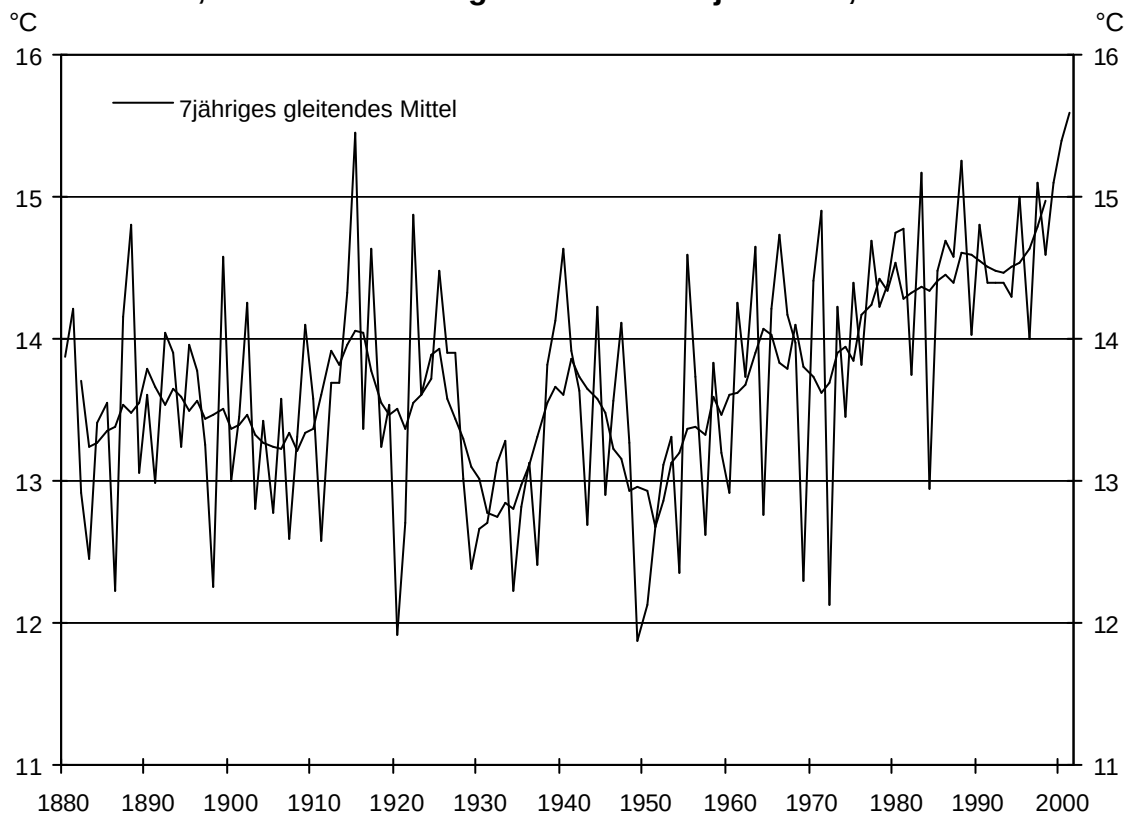


Abb. 11: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol (Prževal'sk) 1880 - 1996, Issyk-Kul'-Becken, östlicher Beckenrand, 1718 m

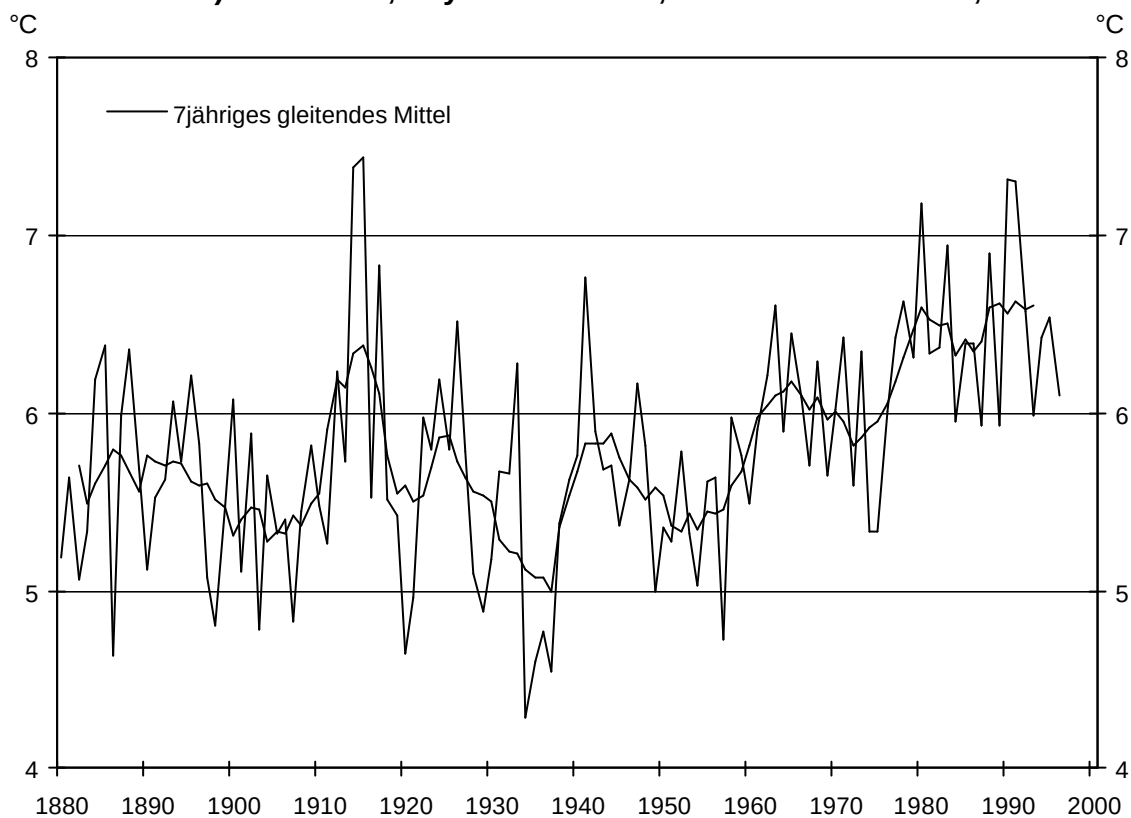


Abb. 12: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station Naryn 1882 - 2001, mittleres Naryn-Tal, zentraler Tjan'-Šan', 2045 m

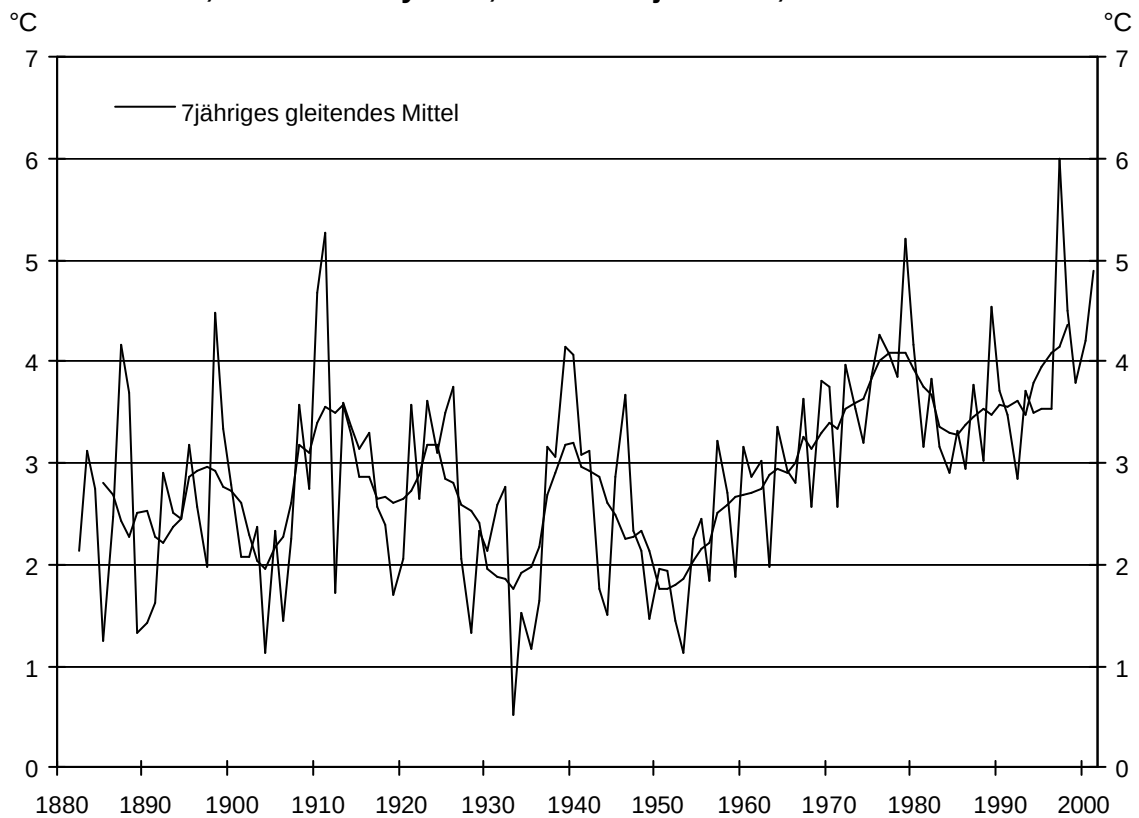
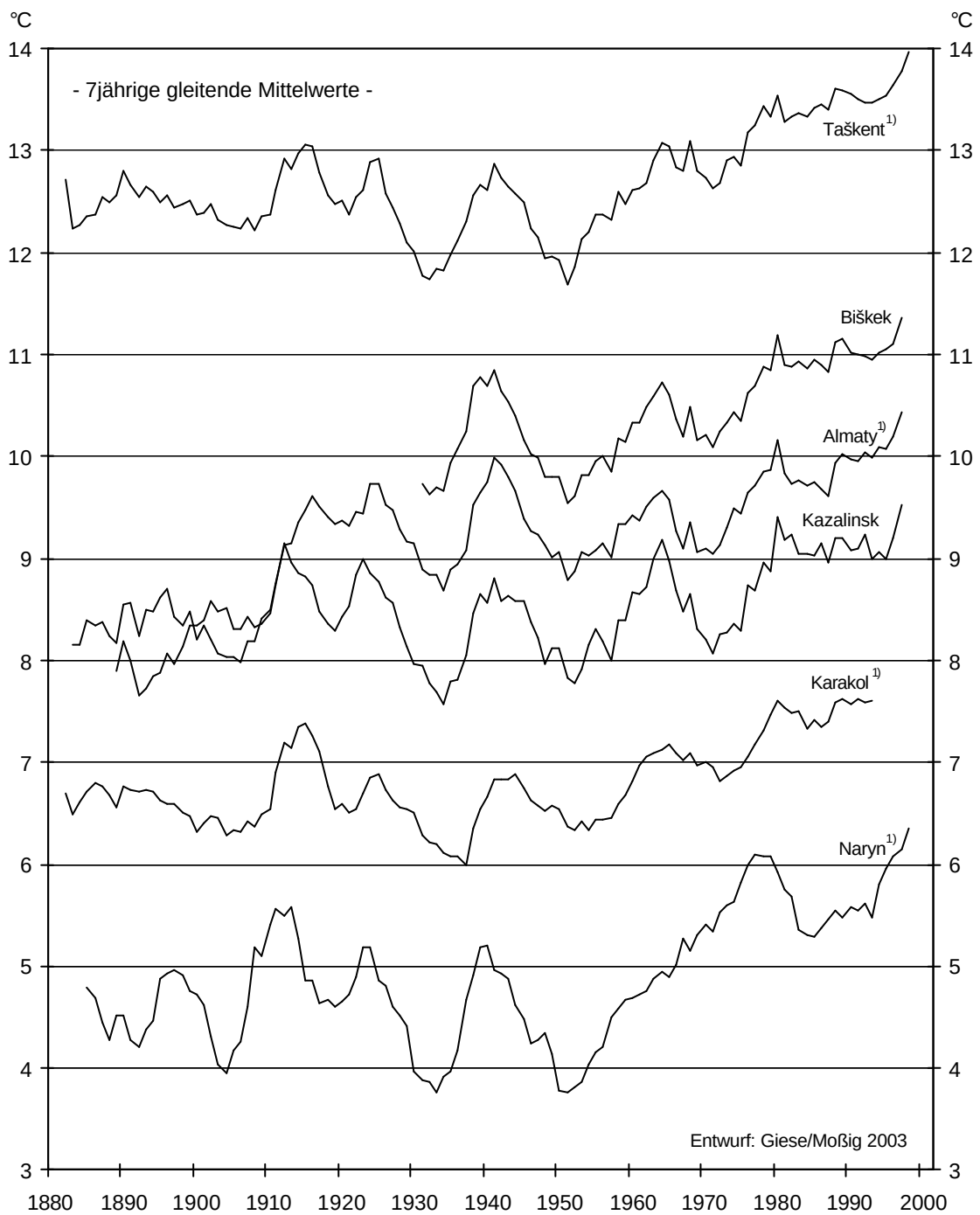


Abb. 13: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1880 - 2000



¹⁾ Temperaturwerte wurden zur besseren Darstellbarkeit versetzt: Tashkent -1°C, Almaty +0,4°C, Karakol +1°C, Naryn +2°C

Abb. 14: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Kazalinsk 1890 - 2000

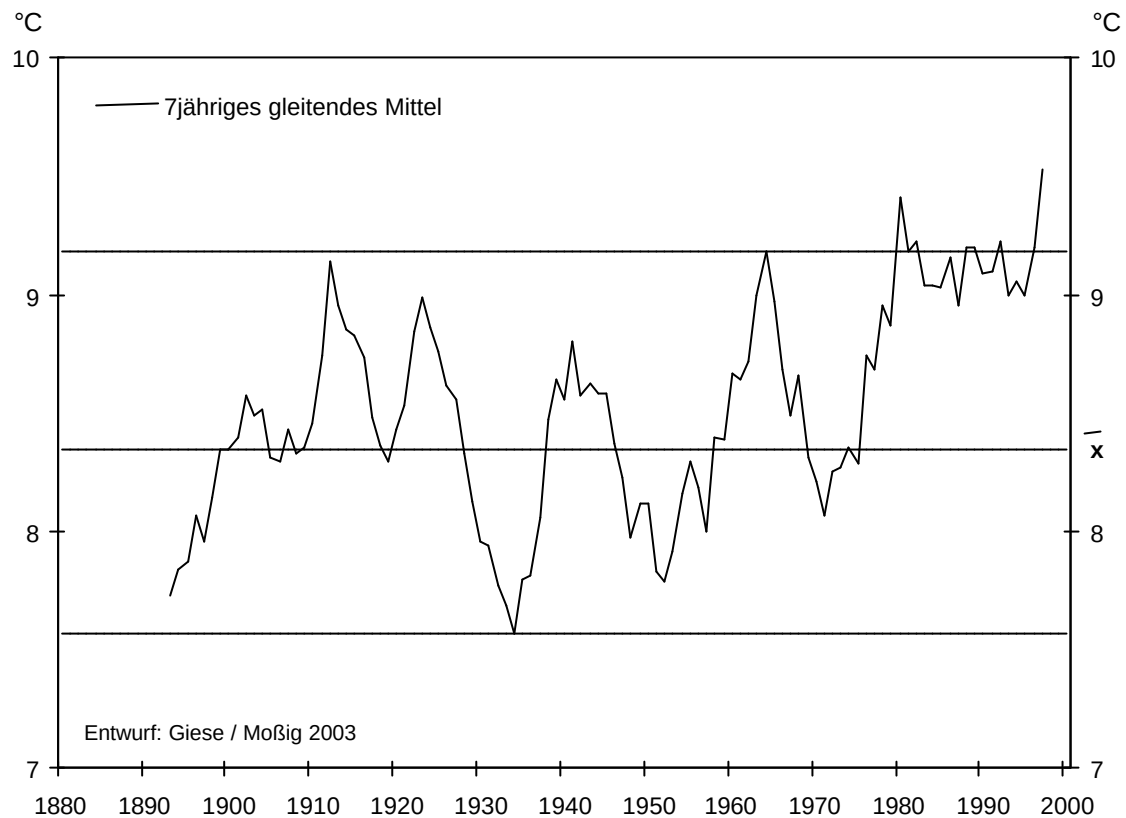


Abb. 15: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1880 - 1970 der Station Taškent 1880 - 2000

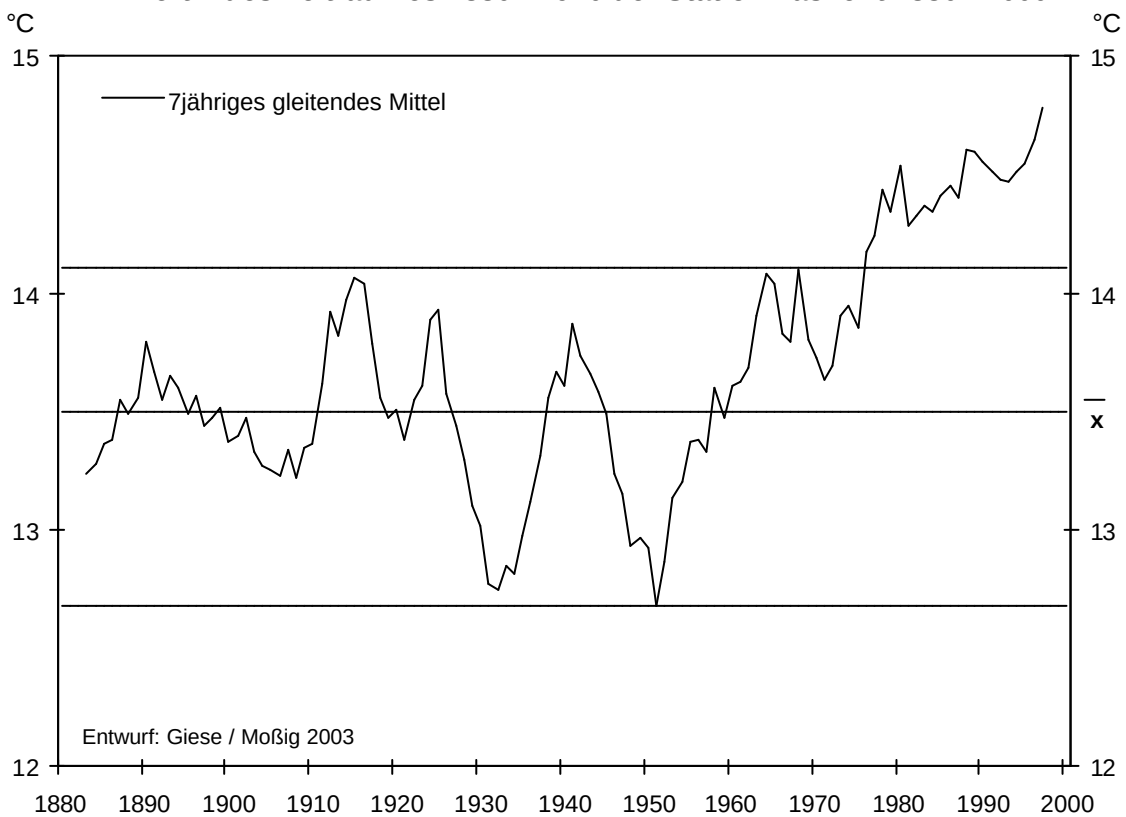


Abb. 16: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1880 - 1970 der Station Karakol (Prževal'sk) 1880 - 1996

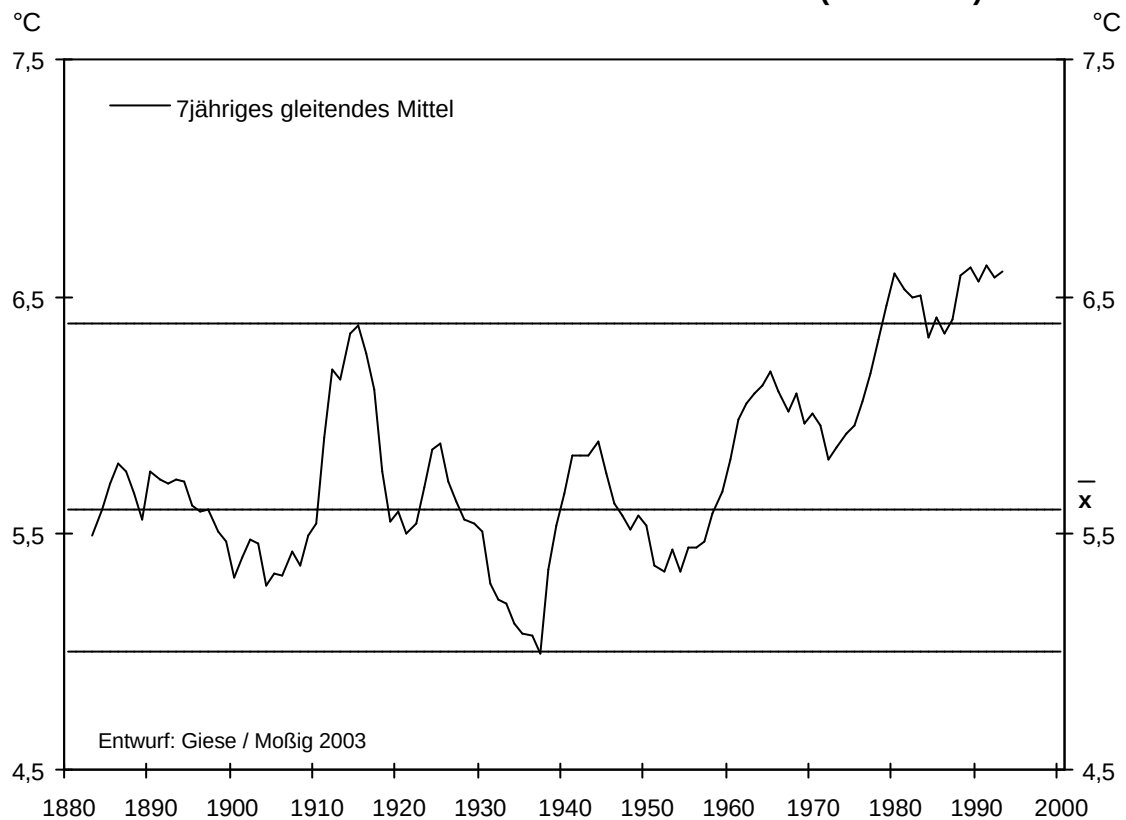
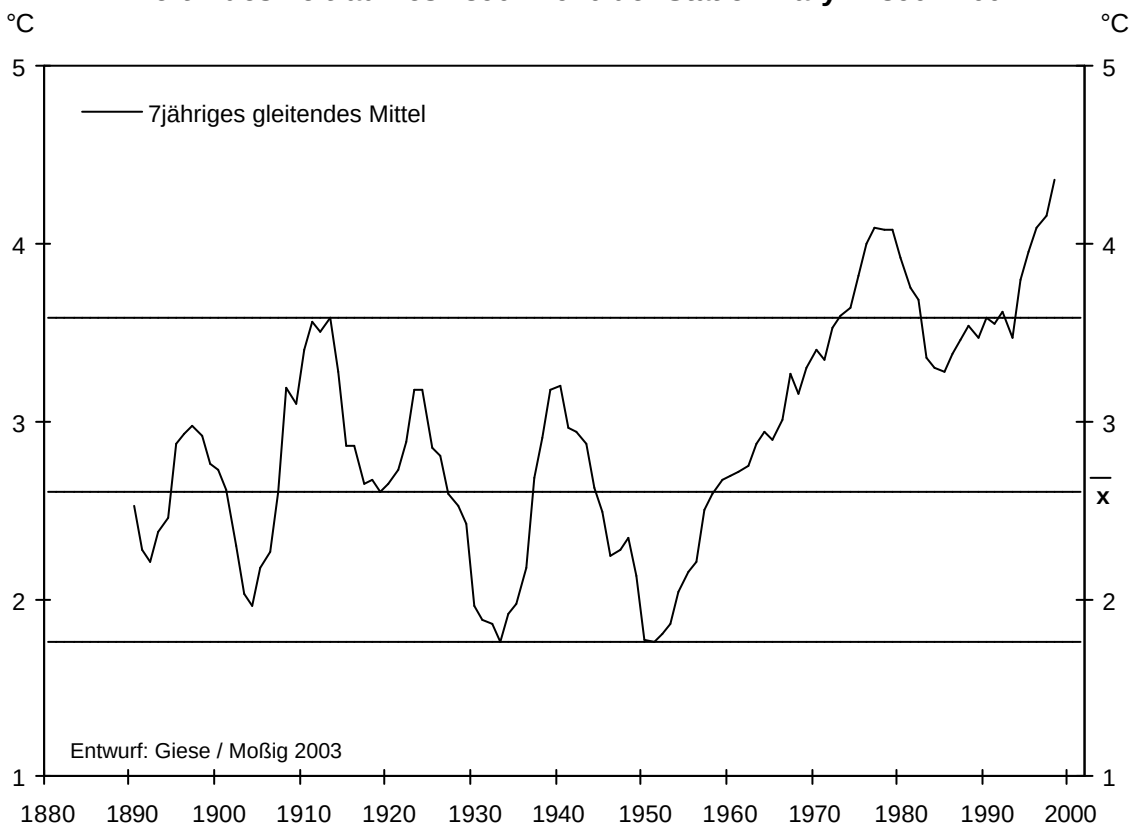


Abb. 17: Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Mittelwert $\bar{x}$ des Zeitraumes 1890 - 1970 der Station Naryn 1890 - 2001



Die jeweiligen Tief- und Gipfelpunkte der Zyklen sind nicht eindeutig fixierbar, aber näherungsweise eingrenzbar. So lassen sich als Tiefpunkte folgende Jahre bzw. Jahresabschnitte ausmachen: 1899, 1909-1911, 1919-1921, 1930-1934, 1950 (-1954), 1972 (-1977), (1986), (1996/97). Mit dieser Festlegung der Tiefpunkte werden in grober Vereinfachung Perioden abgegrenzt, die auf eine Länge von 11 bzw. 22 Jahren hinweisen. 22jährige Zyklen würden demnach durch die Zeitabschnitte 1909/11 - 1933/34, 1933/34 - 1950/54, 1950/54 - 1972/77, 1972/77 - 1996/97 repräsentiert.

Um zu überprüfen, ob ein regelhafter zyklischer Verlauf der Jahresmitteltemperaturen dieser oder auch anderer Art vorliegt, wurden Fourieranalysen durchgeführt.² Einmal wurden den Fourieranalysen die Originalwerte (Zeitreihe 1), zum anderen die 7jährigen gleitenden Mittelwerte (Zeitreihe 2) zugrunde gelegt. Desweiteren wurde versucht, lineare Trends aus den Zeitreihen zu extrahieren, um nachfolgend mit Hilfe der residuellen Größen Fourieranalysen durchzuführen. Einmal wurden die Zeitreihen 1 und 2 einer linearen Regression unterzogen und die Residuen der Regression berechnet, so dass zwei weitere Zeitreihen gebildet wurden (Zeitreihe 3 = Residuen der Zeitreihe 1; Zeitreihe 4 = Residuen der Zeitreihe 2). Zum anderen wurden die Zeitreihen 1 und 2 stückweise normiert und zwar in folgender Form: ab 1969 wurde eine lineare Regression angesetzt und die Residuen der Regression berechnet; für die Daten davor wurde der Mittelwert bestimmt und die Differenz der Originalwerte zum Mittelwert berechnet (Zeitreihen 5 und 6). Hintergrund der Normierung der Ausgangszeitreihen dieser Art besteht in der Annahme, dass der zyklische Verlauf der Jahresmitteltemperaturen ab 1970/72 von einer trendhaften Entwicklung abgelöst bzw. überlagert wird (vgl. Abb. 9 - 12).

Wie zu erwarten, lassen sich aus den Fourieranalysen, die auf der Grundlage der Originalwerte durchgeführt wurden (Zeitreihen 1, 3 und 5), keine Erkenntnisse gewinnen; die Temperaturschwankungen sind von Jahr zu Jahr zu groß. Aber auch die auf der Basis normierter Werte vorgenommenen Fourieranalysen (Zeitreihen 2, 4 und 6) führen zu keinem verwertbaren Ergebnis. Aus den Ergebnissen der Fourieranalyse lässt sich nicht der Hinweis ableiten, dass der Verlauf der Jahresmitteltemperaturen einer bestimmten Periodizität unterworfen ist. Insgesamt sind die berechneten Varianzanteile der einzelnen Periodenbereiche zu niedrig, als dass daraus gesicherte Schlussfolgerungen gezogen werden könnten. Am stärksten zur Varianzaufklärung tragen die Periodenbereiche von 20 - 24 Jahren bei. Für diese Bereiche wurden die höchsten Varianzanteile ausgeworfen: für Almaty nach Zeitreihe 4: 21,1 % und nach Zeitreihe 6: 16,5%, für Karakol nach Zeitreihe 4: 16,6 % und nach Zeitreihe 6: 24,9 %.

² Für die hilfreiche Unterstützung danken wir ganz herzlich Prof. Dr. J. Nipper (Universität Köln)

Mit der Hervorhebung dieses Periodenbereichs ist der Hinweis auf eine vermutete Abhängigkeit der Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen von der Solarstrahlung verbunden. Fluktuationen der Solarstrahlung folgen einem 11jährigen und mithin auch 22jährigen Rhythmus. So stellt sich die Frage, ob die Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen von der Fluktuation der Solarstrahlung beeinflusst wird.

Stellt man die Kurven der Jahresmitteltemperaturen und Solarstrahlung (Sonnenflecken-Relativzahlen nach Wolf, sog. Wolf-Zahlen) einander gegenüber, wird der vermutete Zusammenhang aber nicht bestätigt: ein synchroner Verlauf der Kurven ist nicht feststellbar (vgl. Abb. 18). Korreliert man die Jahresmittelwerte der beiden Variablen miteinander, ergeben sich Korrelationskoeffizienten von $r = |0,15|$. Statistisch ist damit die vermutete Abhängigkeit der Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen von der Solarstrahlung in dieser Form nicht nachweisbar (vgl. Abb. 19).

Wie bereits einleitend festgestellt wurde, wird der zyklische Verlauf der Jahresmitteltemperaturen seit 1970/72 von einer trendhaften Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen abgelöst bzw. überlagert. Stellt man die Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen mit Hilfe von 30jährigen gleitenden Mittelwerten dar, um auftretende kurzfristige Zyklen zu unterdrücken, im vorliegenden Fall vor allem Zyklen der aus den Abbildungen (vgl. Abb. 1.1 - 1.21 im Anhang) ablesbaren Periodenlängen von 17 - 30 Jahren (20 - 24 Jahren), dann wird deutlich, dass der trendhafte Anstieg der Lufttemperaturen bereits vor 1970/72 eingesetzt haben muss. Die in Abbildung 20 für verschiedene Klimastationen dargestellten Kurvenverläufe 30jähriger gleitender Mittelwerte weisen allesamt darauf hin, dass ein positiver linearer Trend der Jahresmitteltemperaturen seit Anfang der 30er Jahre, spätestens seit Anfang der 50er Jahre eingesetzt hat.

Um den Anstieg der Jahresmitteltemperaturen zu erfassen und verschiedene Phasen der Entwicklung voneinander zu unterscheiden, wurden sämtliche linearen Regressionskoeffizienten mit variablen Anfangszeitpunkt ab 1890 und festem Endzeitpunkt 2000 berechnet und dargestellt. Durch diese Vorgehensweise wird deutlich, welchen Einfluss der jeweilige Anfangszeitpunkt auf den errechneten Temperaturanstieg ausübt. Verzerrungen durch einen 'unglücklich' gewählten Zeitschnitt können so aufgezeigt und vermieden werden. Wie Abbildung 21 zeigt, ist an der Station Almaty der lineare Trend für den Zeitschnitt 1972-2000 mit $b = 0,046$ deutlich höher als für die Regression von 1971-2000 mit $b = 0,038$. Auf 100 Jahre bezogen macht diese Verschiebung des Anfangszeitpunktes um lediglich ein Jahr einen Unterschied von $0,8\text{ °C}$ aus. Setzt man die Regression früher an und wählt das Jahr 1938, so ergibt sich gegenüber dem Anfangsjahr 1972 eine wesentlich schwächere trendhafte Erwärmung von $b = 0,011\text{ °C}$ (bzw. $1,1\text{ °C} / 100\text{ Jahre}$).

Abb. 18: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur und Sonnenflecken-Relativzahl nach Wolf der Station Karakol 1880-1996

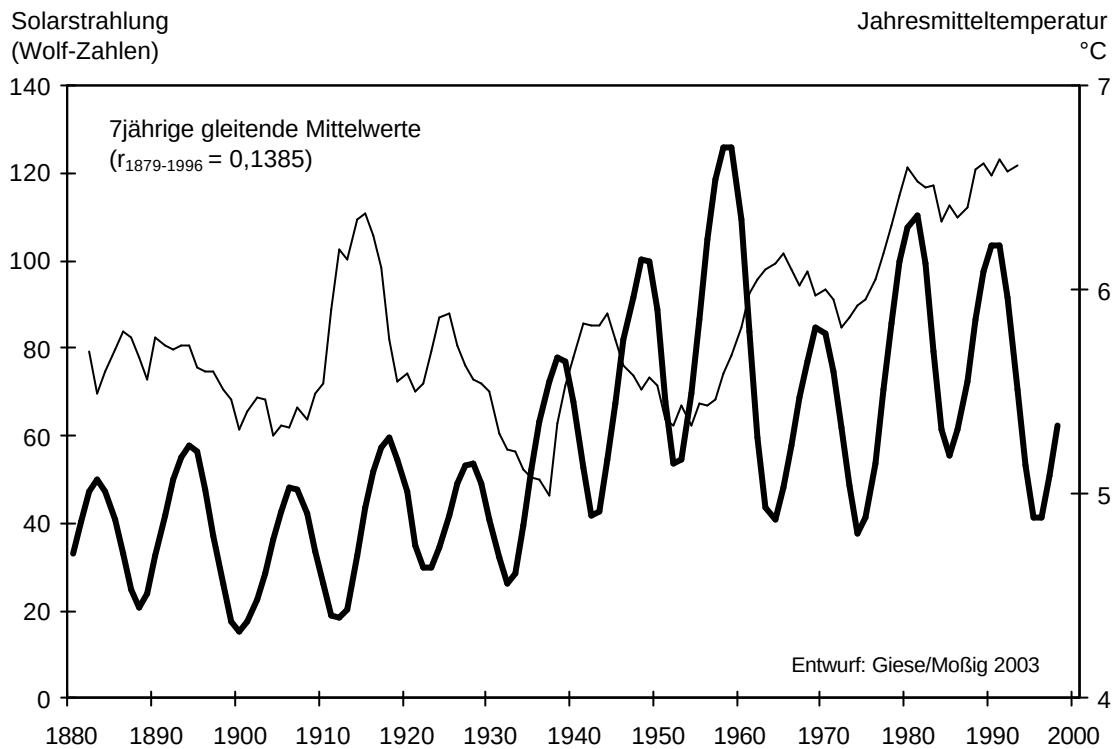


Abb. 19: Zusammenhang von Jahresmitteltemperaturen und Sonnenflecken-Relativzahlen nach Wolf der Station Karakol 1879-1996

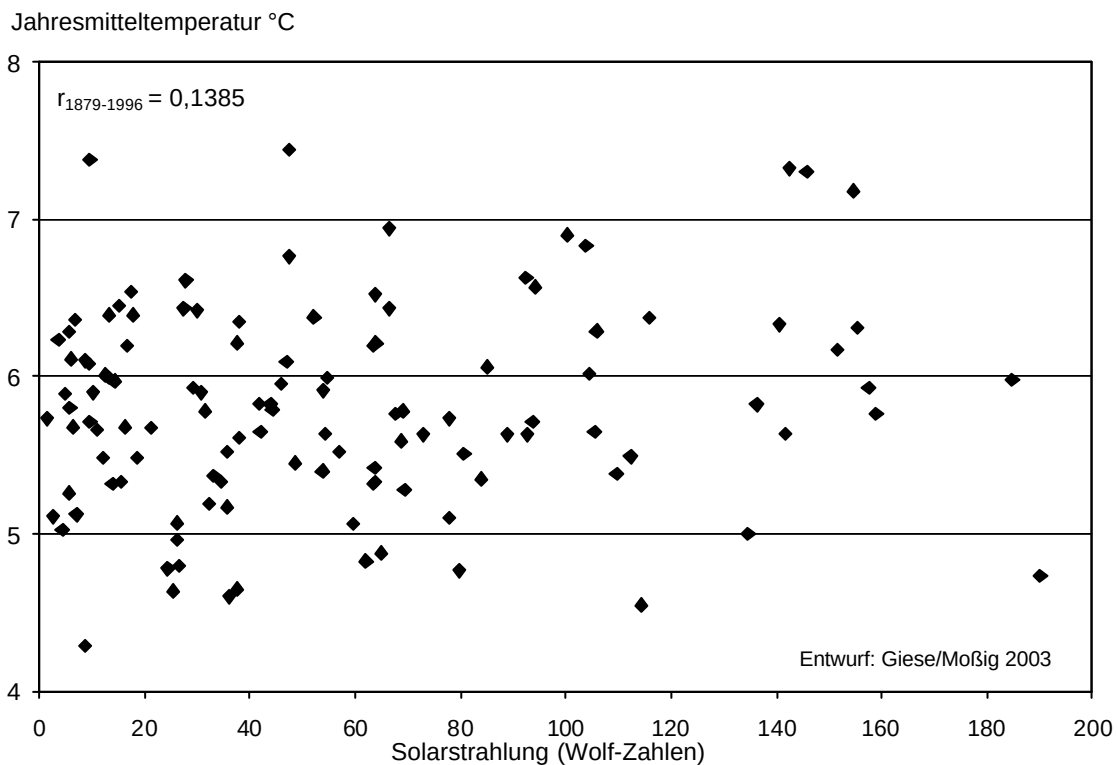
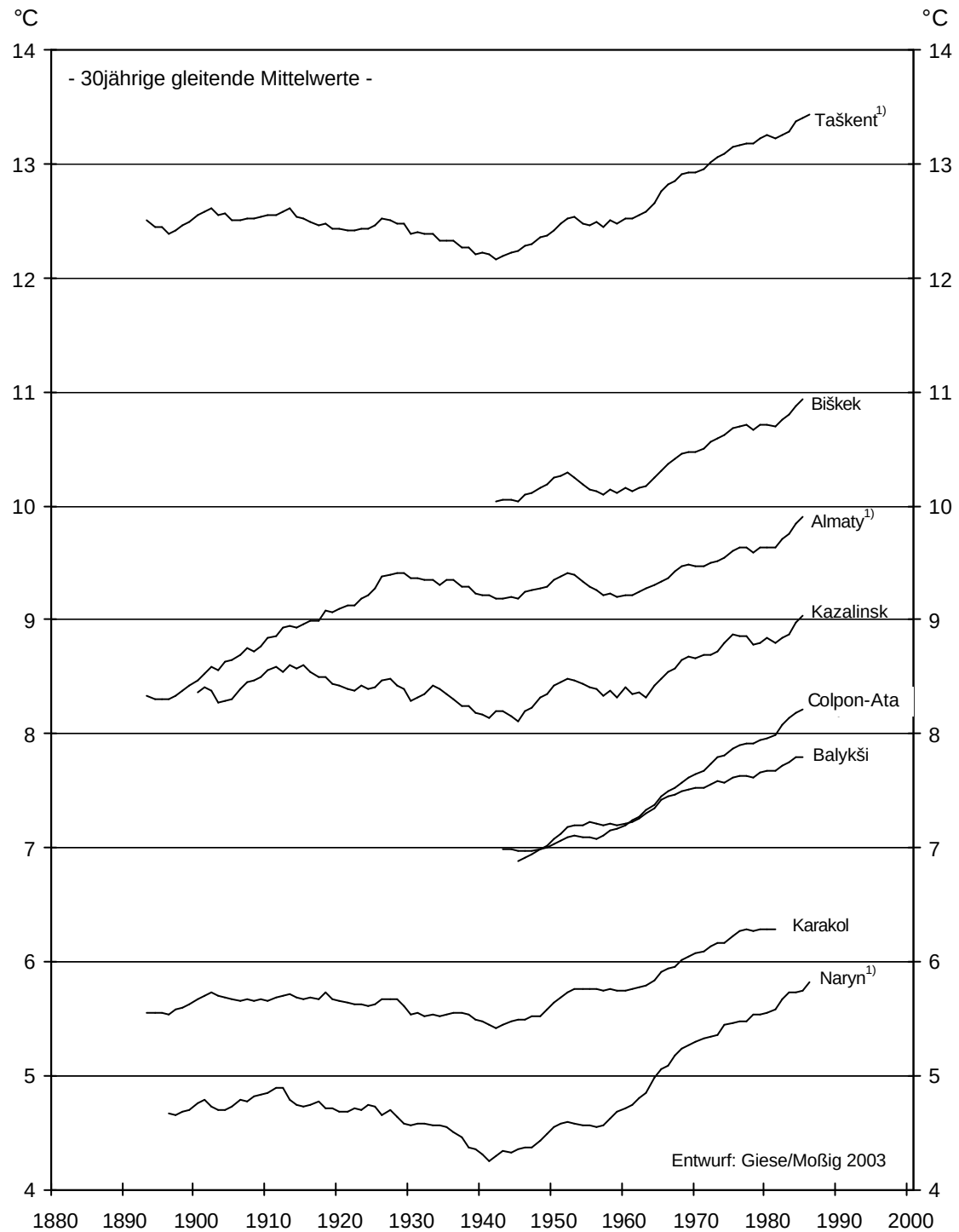


Abb. 20: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1880 - 2000



¹⁾ Temperaturwerte wurden zur besseren Darstellbarkeit versetzt: Taškent -1°C, Almaty +0,4°C, Naryn +2°C

Abb. 21: Entwicklung der linearen Regressionskoeffizienten b zur Ermittlung des Anstiegs der Jahresmitteltemperatur der Station Almaty bis zum Jahr 2000 nach Anfangsjahren (Regressionskoeff. vom Jahr x - 2000)

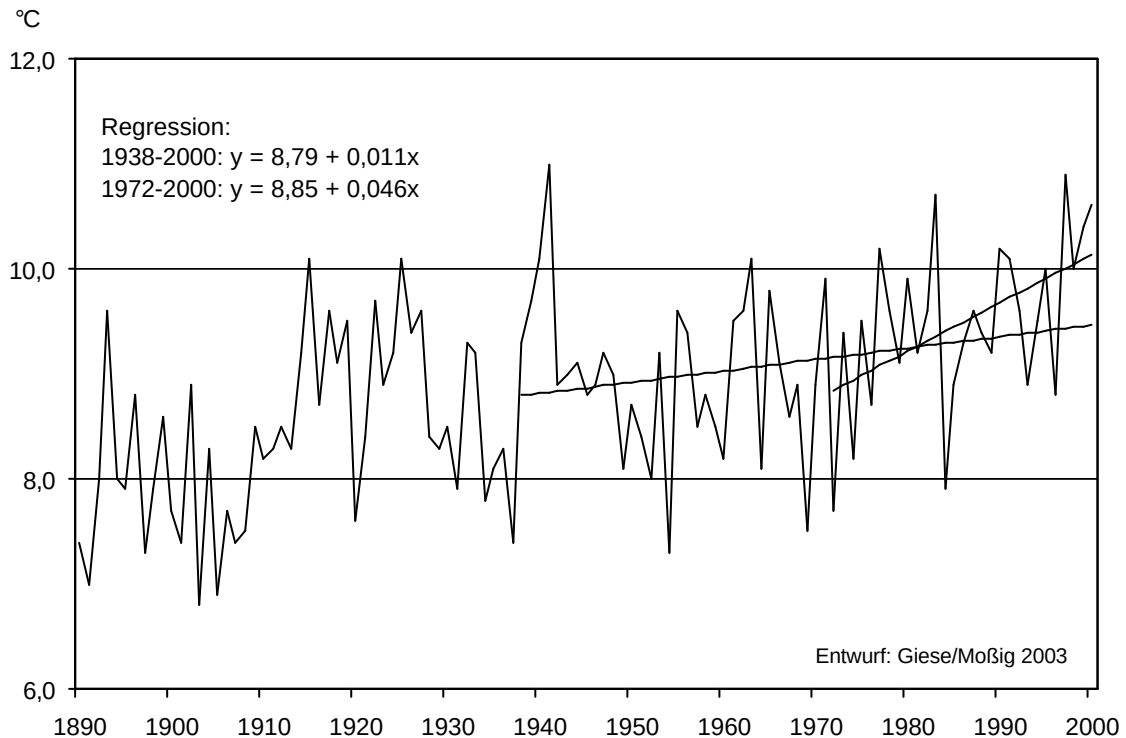
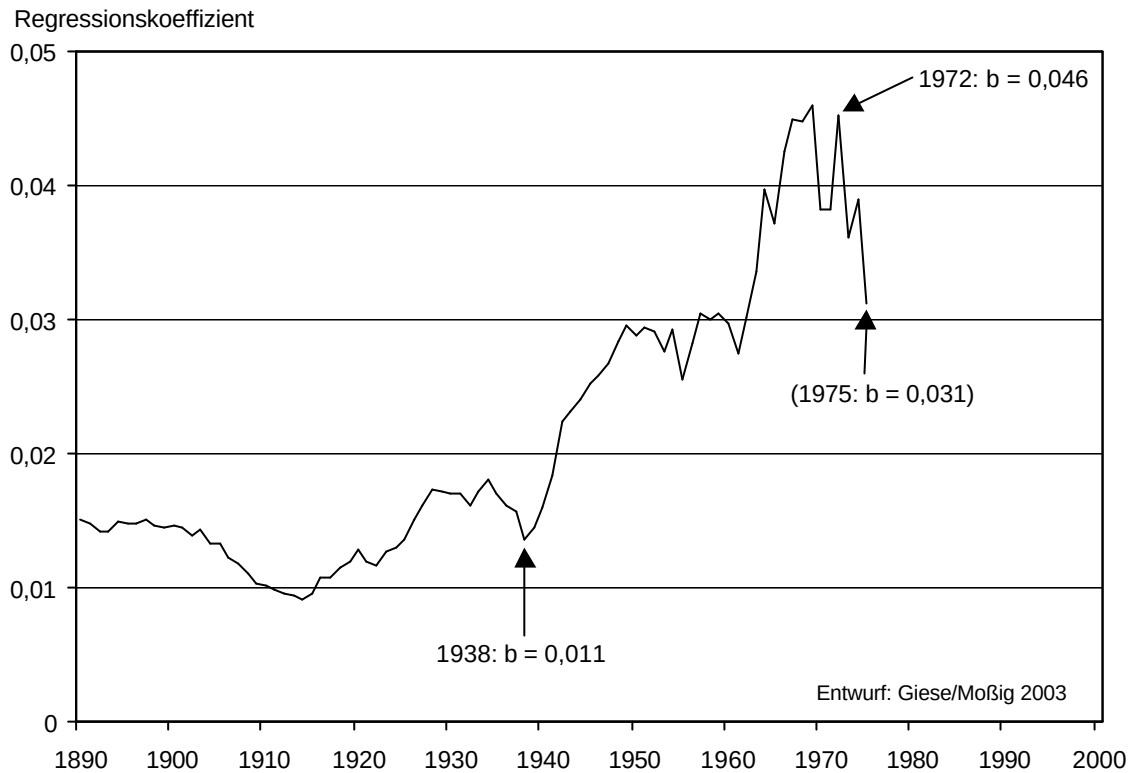
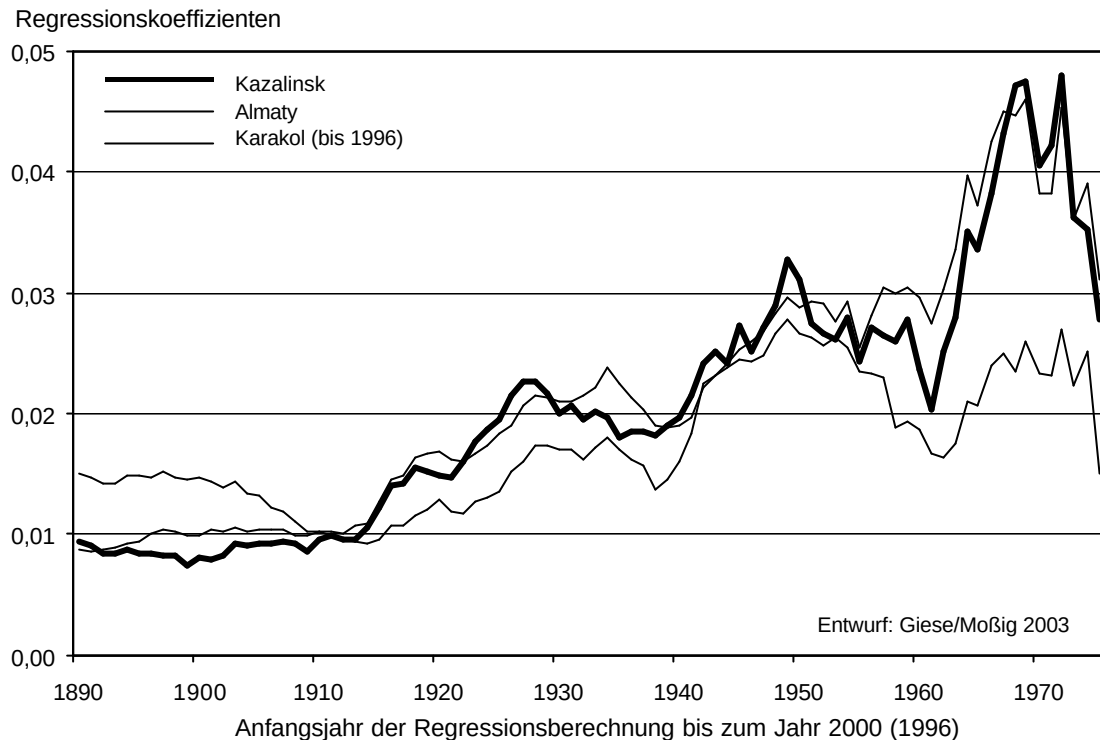


Abb. 22: Entwicklung der linearen Regressionskoeffizienten zur Ermittlung des Anstiegs der Jahresmitteltemperatur an den Stationen Kazalinsk, Almaty (bis zum Jahr 2000) und Karakol (bis zum Jahr 1996) nach Anfangsjahren (Regressionskoeffizienten vom Jahr $x - 1996/2000$)



Neben der Identifizierung extrem gewählter Zeitabschnitte zur Trendberechnung geht aus dem Kurvenverlauf der Abbildungen 21 und 22 hervor, dass die Erwärmung nicht gleichmäßig stattgefunden, sondern eine Beschleunigung erfahren hat. Es lassen sich grob drei Phasen identifizieren, in denen die Regressionskoeffizienten ein jeweils höheres Niveau erreichen: (a) Anfangsjahr zwischen 1890-1940; (b) Anfangsjahr 1950-1965 und (c) Anfangsjahr ab 1970. Wie bereits aus der Analyse der gleitenden Durchschnittswerte festgestellt wurde, wird die zyklische Schwankung der Temperaturwerte von einem linearen Anstieg der Lufttemperatur abgelöst bzw. so überlagert, dass sich ein Anstieg in Schüben abzeichnet. Diese Schübe setzen Anfang der 30er, 50er und 70er Jahre ein (vgl. Abb. 23 und 24). Es sei betont, dass der Hinweis auf den schubweise beschleunigten Anstieg der Lufttemperatur in den letzten 70 Jahren keineswegs die Aussage beinhaltet, dass eine solche Entwicklung auch weiterhin zu erwarten ist. Hier wird lediglich der Ablauf der Jahresmittelmitteltemperaturen der jüngeren Vergangenheit beschrieben.

Abb. 23: Schubweiser Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Station Kazalinsk

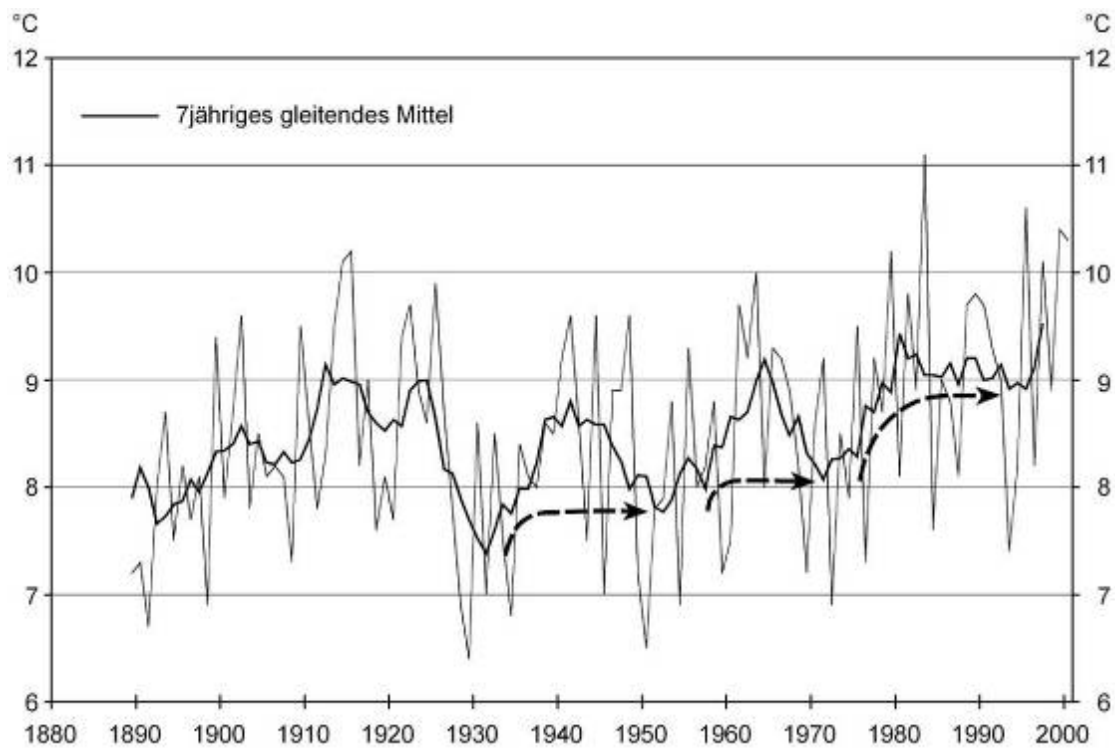
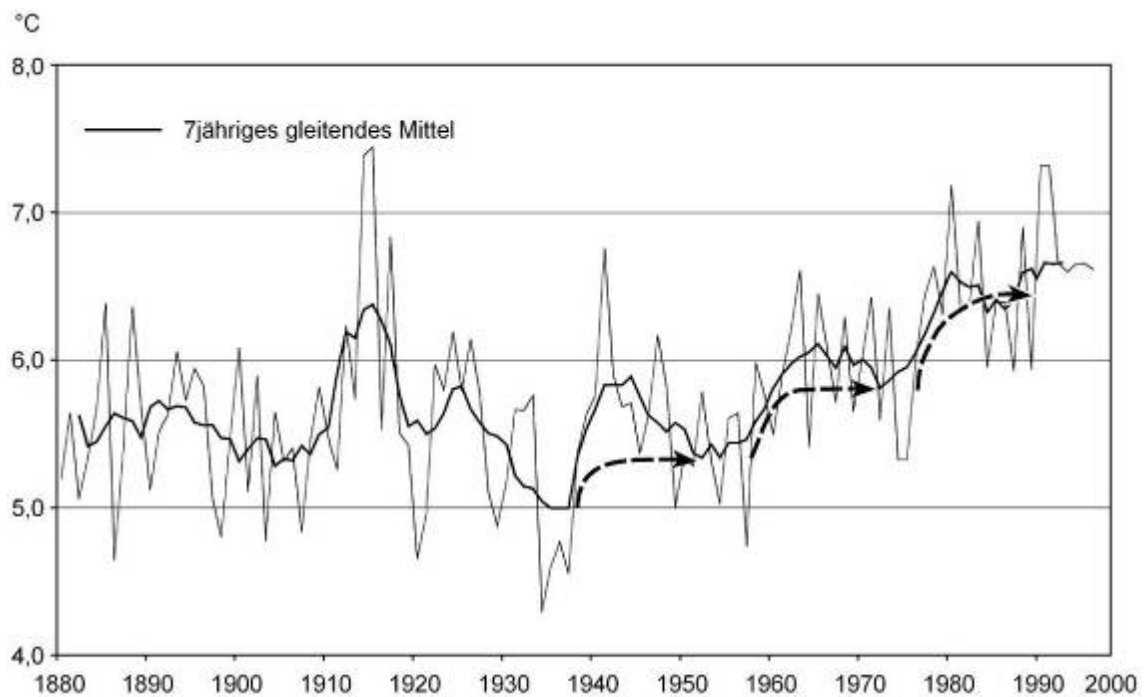


Abb. 24: Schubweiser Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol



Tab. 4: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen ausgewählter Klimastationen in Zentralasien für verschiedene Zeitabschnitte

Nr Klimastation		Höhe in m	Trendkoeffizienten				
			1934 - 2000	1950 - 2000	1954 - 2000	1970 - 2000	1972 - 2000
<u>1) Tiefländis che Beckenlagen, nördliche Vorgebirgsbereiche des Tian'-Šan'</u>							
1	Kazalinsk	68	0,020	0,031	0,028	0,041	0,048
2	Taškent	478	0,028	0,037	0,032	0,031	0,042
3	Biškek	771	0,021	0,033	0,031	0,034	0,042
4	Almaty	825	0,019	0,031	0,033	0,039	0,046
<u>2) Nördlicher Tjan'-Šan'</u>							
5	Bajtik	1590	0,006	0,010	0,009	0,007	0,012
6	Novorosijka	1524	0,010	0,016	0,017	0,017	0,024
7	Tjuja-Ašuu (1958-1998)	3120	-	-	(0,004)	-0,013	-0,014
<u>3) Issyk-Kul-Becken</u>							
8	Balykši (Rybac'e)	1670	0,024	0,022	0,020	0,026	0,034
9	Colpon-Ata	1620	0,030	0,036	0,037	0,019	0,013
10	Krasnyj Oktjabr' (1946-1998)	1645	-	0,019	0,019	0,023	0,028
11	Karakol (Prževal'sk) (bis 1996)	1718	0,024	0,027	0,026	0,023	0,027
12	Pokrovka (ab 1951)	1740	-	0,018	0,019	0,021	0,026
13	Kara-Batkak (1956 - 1999)	3415	-	-	(-0,012)	-0,018	-0,026
<u>4) Zentraler Tjan'-Šan'</u>							
14	Suusamyr (ab 1937)	2091	-	0,034	0,032	0,004	0,006
15	Naryn	2045	0,027	0,042	0,034	0,015	0,009
16	Tjan'-Šan' (bis 1996)	3614	0,012	0,008	0,006	-0,007	-0,004
<u>5) Westlicher Tjan'-Šan'</u>							
17	Žalal Abad (1947-2000)	971	-	0,026	0,024	0,037	0,048
18	Isfana (ab 1950)	1160	-	0,009	0,006	-0,003	0,009
19	Paca Ata	1529	0,009	0,015	0,011	0,014	0,024
<u>6) Südlicher Tjan'-Šan'</u>							
20	Ak-Saj (1952 - 1997) *)	3135	-	-	-0,0003	-0,034	-0,042
21	Sary-Taš *)	3155	0,024	0,025	0,025	0,014	0,018

*) Klimastationen Ak-Saj und Sary-Taš liegen in hochgelegenen Bergsenken, bilden Ausnahmen

In Tabelle 4 wurden die Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen der Klimastationen für die drei herausgestellten Zeitabschnitte der Entwicklung zusammengestellt. Sie erlauben folgende Aussagen:

1. In den letzten 50 Jahren hat sich in Zentralasien allgemein ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen vollzogen. Den stärksten Anstieg verzeichnen mit 1,5 °

bis 1,8 °C die Klimastationen in den tiefländischen Becken- und Gebirgsrandlagen (Kazalinsk +1,5 °C; Taškent +1,8 °C; Biškek +1,6 °C; Almaty +1,6 °C) sowie einige geschützt liegende Klimastationen in intramontanen Tal- und Beckenlagen (Naryn 2.045 m: +2,1 °C; Suusamy 2.091 m: +1,7 °C; Colpon-Ata 1.620 m: +1,8 °C) (vgl. Tab. 4). Vergleicht man den Anstieg der Lufttemperaturen in dieser Zeit und den Anstieg der Lufttemperatur im globalen Mittel, dann hat sich in den letzten 50 Jahren (1950 - 2000) in Zentralasien eine deutlich stärkere Erwärmung des Klimas vollzogen. Die Zunahme der Globaltemperatur wird nach Berechnungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2001) für den Zeitraum von 1950 - 2000 auf +0,47 °C geschätzt.

2. Der stärkste und nachhaltigste Anstieg der Lufttemperaturen hat 1970/72 eingesetzt. Für den Zeitabschnitt von 1970 - 2000 durchgeführte lineare Regressionsanalysen ergeben für Klimastationen, die tiefländische Becken- und Gebirgsrandlagen (Kazalinsk, Taškent, Biškek, Almaty) einnehmen, Trendkoeffizienten von 3,1 °C bis 4,1 °C (bezogen auf 100 Jahre). Setzt man die Regression im noch kälteren Jahr von 1972 an (absoluter Tiefpunkt), dann erhöhen sich die Trendkoeffizienten auf 4,2 ° bis 4,8 °C. Hier wird deutlich, in welchem Ausmaß das Ergebnis einer Trendanalyse vom festgelegten Anfangsjahr und entsprechend vom gewählten Endjahr beeinflusst wird. Je nachdem, welches Anfangsjahr man bei gleichem Endjahr (z.B. 2000) wählt, unterscheiden sich die berechneten Trendkoeffizienten zum Teil erheblich, im vorliegenden Fall bei der Station Kazalinsk zum Beispiel um +0,75 °C, auf den größeren Zeitraum von 1950 bis 2000 bezogen sogar um rund +2 °C (vgl. Tab. 5).

Tab. 5: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperatur der Station Kazalinsk nach verschiedenen Anfangszeitpunkten

Zeithorizont der Regressionsanalyse	Trendkoeffizienten (bezogen auf 100 Jahre)
1934 - 2000	+1,96 °C
1937 - 2000	+1,84 °C
1950 - 2000	+3,11 °C
1954 - 2000	+2,80 °C
1970 - 2000	+4,05 °C
1972 - 2000	+4,80 °C

Ebenso wirkt sich die Wahl des Endzeitpunktes der Trendanalyse auf das Ergebnis aus, für die Station Kazalinsk zum Beispiel in folgender Weise (vgl. Tab. 6):

Tab. 6: Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperatur der Station Kazalinsk nach verschiedenen Endzeitpunkten

Zeithorizont der Regressionsanalyse	Trendkoeffizienten	
	(bezogen auf 100 Jahre)	Differenz zu 1998
1934 - 1998	+1,66 °C	-
- 1999	+1,83 °C	+0,17 °C
- 2000	+1,97 °C	+0,31 °C
1954 - 1998	+2,21 °C	-
- 1999	+2,53 °C	+0,32 °C
- 2000	+2,77 °C	+0,56 °C
1970 - 1998	+2,76 °C	-
- 1999	+3,45 °C	+0,69 °C
- 2000	+3,94 °C	+1,18 °C

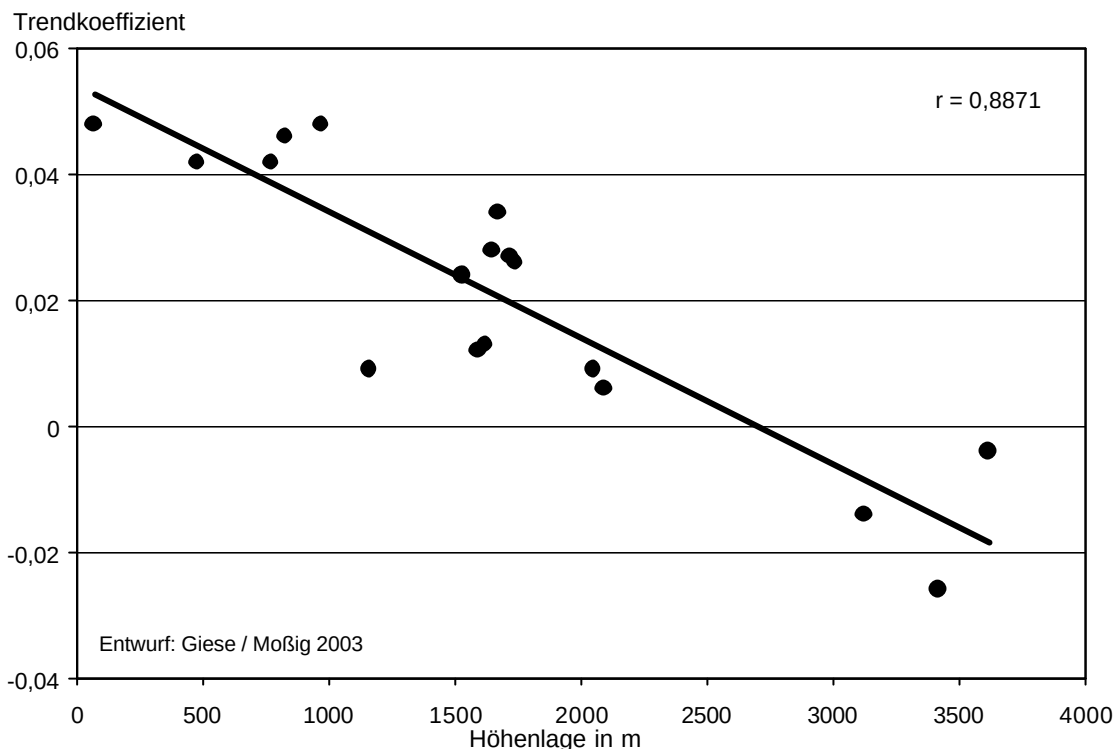
Berechnete Trendkoeffizienten sollten daher mit großer Vorsicht interpretiert und ausgewertet werden. Sofern Extremwerte als Anfangs- und/oder Endzeitpunkte der Trendanalyse gewählt werden, sollten diese gut begründet werden. Ungeachtet der relativierenden Anmerkungen bleibt unbestritten, dass die Klimaerwärmung in Zentralasien deutlich stärker ausgeprägt ist als im globalen Mittel.

2. Mit der Höhe schwächt sich die Erwärmung des Klimas ab. Wie das Streudiagramm (vgl. Abb. 25) zu erkennen gibt, nehmen die Trendkoeffizienten mit der Höhe ab. Sie erreichen in einer Höhenlage von etwa 2.700 m die 0 °C-Grenze und wechseln oberhalb dieser Grenze von positiven in negative Werte. Die Abhängigkeit der Trendkoeffizienten von der Höhenlage ist dabei, wie der hohe Betrag des Korrelationskoeffizienten von $r = 0,8871$ zeigt, deutlich ausgeprägt.

Wenn in der jüngeren Vergangenheit nach den berechneten Trendwerten oberhalb von 2.700 m eine Abkühlung des Klimas stattgefunden haben soll, wie ist dann die zunehmende Gletscherschmelze zu erklären? In der Zeit von 1957 - 1998 verlor der Kara-Batkak-Gletscher im Terskej Ala-Too (südlicher Rand des Issyk-Kul'-Beckens) 36,7 % seiner Eismasse (vgl. Mamatkanov et al. 1997, S. 98; Dikich 2002, II, S. 12). Für die Gletscherstation des Kara-Batkak wurde für den Zeitabschnitt von 1957 - 1996 ein Trendkoeffizient der Jahresmitteltemperaturen von -1,3 °C, für den Zeitabschnitt von 1972 - 1996 sogar ein Trendkoeffizient von -3,6 °C ermittelt.

Hier ist anzumerken, dass eine hinreichend gesicherte Kennzeichnung der Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen bei den Klimastationen, die im glazionivalen Bereich liegen, schwer fällt, da die Datenbasis nicht immer verlässlich erscheint.

Abb. 25: Zusammenhang zwischen dem Trendkoeffizienten der Jahresmitteltemperaturen 1972-2000 und der Höhenlage ausgewählter Klimastationen*) in Zentralasien



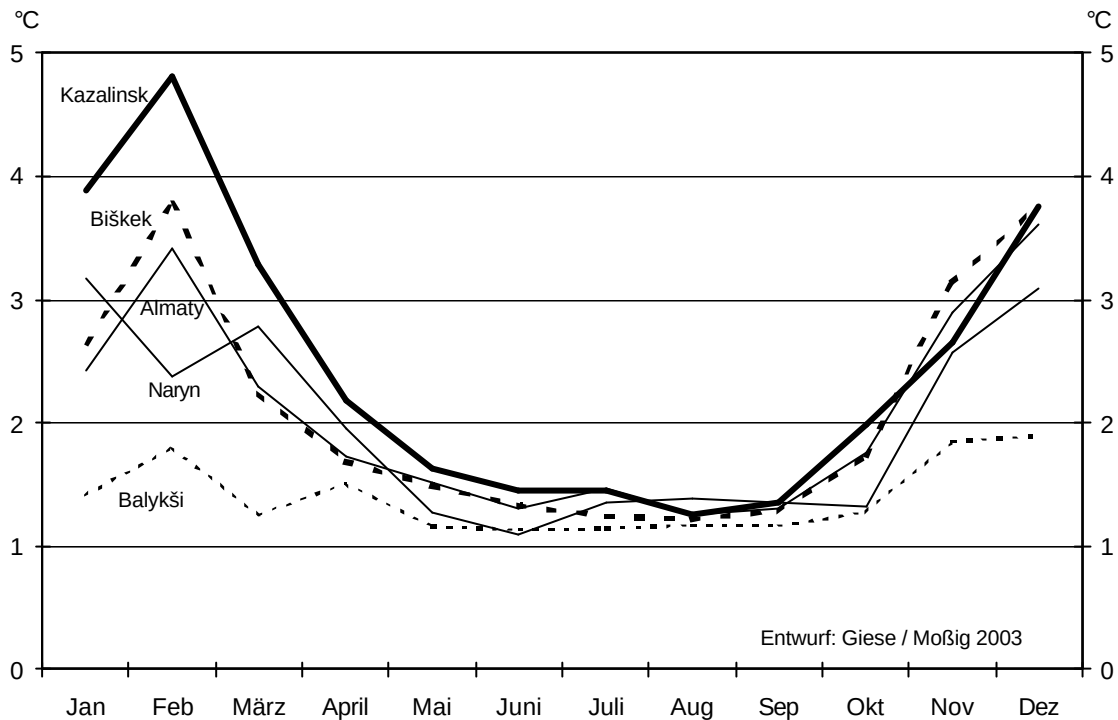
*) Klimastationen Ak-Saj und Sary-Taş wurden nicht berücksichtigt

3.2 Entwicklung der Monatsmittelwerte

Um die langfristige Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen besser verstehen und die zuletzt aufgeworfene Frage der Gletscherschmelze beantworten zu können, wurden in gleicher Weise wie zuvor Zeitreihenanalysen der Monatsmitteltemperaturen durchgeführt. Den Kurvenverläufen (vgl. Abbildung 2.1 - 2.21 im Anhang) ist folgendes zu entnehmen:

1. Die Zyklizität der Entwicklung wird im wesentlichen durch den Temperaturverlauf in der kalten, winterlichen Jahreszeit hervorgerufen und weniger durch Temperaturschwankungen in der warmen, sommerlichen Jahreszeit verursacht. In den Monaten Mai - September variieren die Monatsmitteltemperaturen nur geringfügig, in den Monaten November bis März, vor allem aber in den Monaten Dezember, Januar und Februar dafür umso stärker. Die an Hand der berechneten Standardabweichungen ablesbaren starken Schwankungen der Monatsmitteltemperaturen in der kalten Jahreszeit nehmen dabei mit zunehmender Höhe ab (vgl. Abb. 26).

Abb. 26: Standardabweichungen der Monatsmitteltemperaturen der Stationen Kazalinsk, Almaty, Naryn, Biškek und Balykši 1934-2000



2. Die seit Ende der 50er bzw. Ende der 70er Jahre deutlich werdende Erwärmung des Klimas ist vor allem auf eine Erhöhung der Lufttemperatur in der winterlichen, kalten Jahreszeit zurückzuführen. Hier treten vor allem die Monate November und Dezember hervor, die seit 1950 eine deutliche Tendenz zu einem Anstieg der Lufttemperatur aufweisen. Auch die Monate Januar und Februar tragen zur Erwärmung des Klimas bei, allerdings in einem schwächeren Maße als die Monate November und Dezember. Am deutlichsten tritt die winterliche Erwärmung in den tiefländischen Beckenlagen (Priaral) und nördlichen Vorgebirgsbereichen des Tjan'-Šan', speziell den Vorgebirgsbereichen des Kirgyskij- und Zailijskij-Alatau (Biškek und Almaty) zutage. Sie wird von Romanovskij (2002, S. 2) auf eine Abschwächung der Sibirischen Antizyklone zurückgeführt. Mit der Höhe nimmt die Erwärmung in den Wintermonaten ab, bleibt aber bis in große Höhenlagen wirksam.
3. Auch in der sommerlichen, warmen Jahreszeit ist ein Anstieg der Lufttemperaturen festzustellen. Er ist aber deutlich schwächer ausgeprägt als in den Monaten November und Dezember. Durch eine Erhöhung der Lufttemperatur sind vor allem die Monate Juni sowie August und September gekennzeichnet. Auffällig ist vor allem der Temperaturanstieg im September. Mit ihm ist eine Verlängerung der Wärmeperiode verbunden. Zwar nimmt der Temperaturanstieg im

September mit zunehmender Höhe ab, er wirkt sich aber bis in die glazio-nivale Zone aus, so dass die zunehmende Gletscherschmelze in der jüngeren Vergangenheit vor allem auf eine Verlängerung der Wärmeperiode zurückgeführt werden kann.

4. Im Unterschied zum Winter weisen die Frühjahrsmonate eine Tendenz zur Abkühlung auf. Dieses trifft vor allem auf den April zu. Wie man der Tabelle 7 und Abbildung 27 entnehmen kann, nehmen die Trendkoeffizienten der Monatsmitteltemperaturen im April ab einer Höhenlage von etwa 500 m ausnahmslos negative Werte an und dieses verstärkt mit zunehmender Höhe. Eine Folge dieser Entwicklung besteht darin, dass sich die Frostperiode im Frühjahr ausgeweitet hat. Die Veränderung wird auf verstärkte Einbrüche kalter Fronten aus dem Norden und Nordwesten in der frühjährlichen Zeit zurückgeführt (vgl. Romanovskij 2002, S. 2; Tursunov 2002).

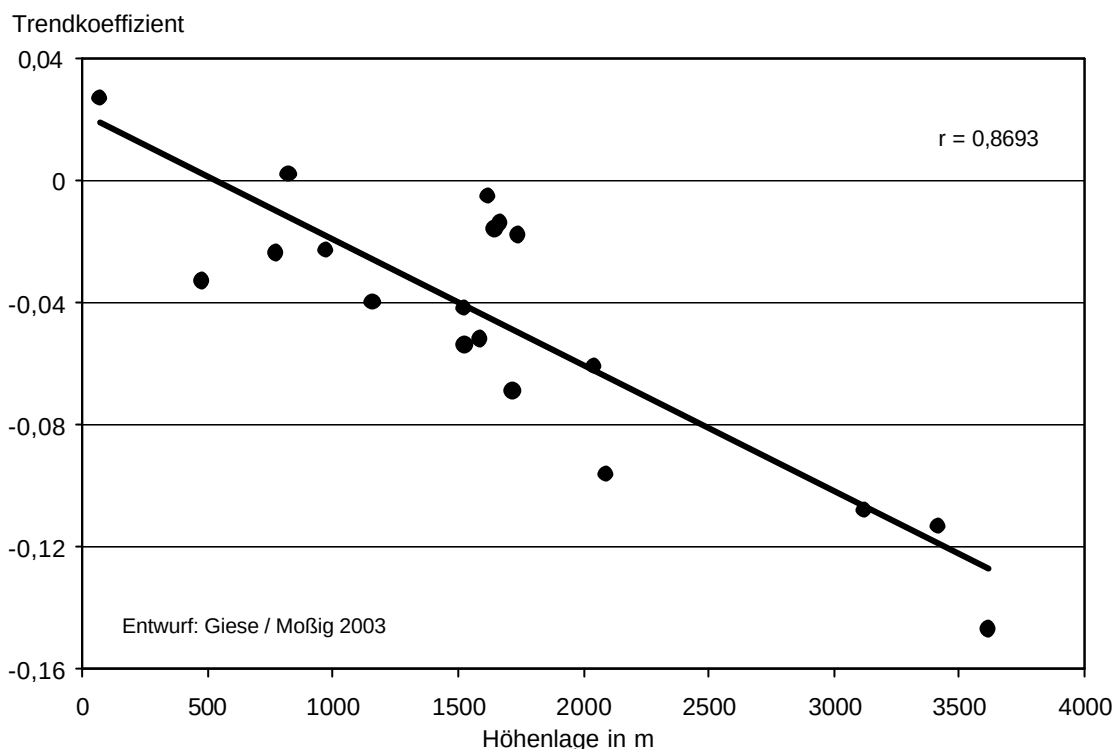
Eine Verschiebung der Jahreszeiten, wie hiernach zu vermuten wäre - Verlängerung der warmen Periode im September, gleichzeitig Verlängerung der kalten Periode im März/April - ist damit allerdings nicht verbunden. Stellt man die durchschnittlichen monatlichen Mitteltemperaturen der Jahre 1941-1970 denen der Jahre 1971-2000 gegenüber (vgl. Abb. 3.1 - 3.21 im Anhang), so ist die Kurve für den späteren Zeitschnitt (1971-2000) nicht nach rechts verschoben, wie bei einer Verschiebung der Jahreszeiten zu erwarten wäre; die Durchschnittswerte liegen vielmehr für alle Monate über denen der früheren Phase (1941-1970).

Tab. 7: Trendkoeffizienten der Monatsmitteltemperaturen 1972-2000 ausgewählter Klimastationen in Zentralasien

		Trendkoeffizienten 1972-2000				
Nr	Klimastation	Höhe in m	Jahr	April	September	Dezember
<u>1) Tiefländische Beckenlagen, nördliche Vorgebirgsbereiche des Tjan'-Šan'</u>						
1	Kazalinsk	68	0,048	0,027	-0,001	0,013
2	Taškent	478	0,042	-0,033	0,028	0,102
3	Biškek	771	0,042	-0,024	0,038	0,132
4	Almaty	825	0,046	0,002	0,053	0,139
<u>2) Nördlicher Tjan'-Šan'</u>						
5	Bajtik	1590	0,012	-0,052	0,023	0,070
6	Novorosijka	1524	0,024	-0,042	0,050	0,093
7	Tjuja-Ašuu (bis 1998)	3120	-0,014	-0,108	0,060	0,002
<u>3) Issyk-Kul-Becken</u>						
8	Balykši (Rybac'e)	1670	0,034	-0,014	0,059	0,056
9	Colpon-Ata	1620	0,013	-0,005	0,041	0,040
10	Krasnyj Oktjabr' (bis 1998)	1645	0,028	-0,016	0,069	0,071
11	Karakol (Prževal'sk) (bis 1996)	1718	0,027	-0,069	0,081	0,084
12	Pokrovka	1740	0,026	-0,018	0,067	0,045
13	Kara-Batkak (bis 1999)	3415	-0,026	-0,113	0,018	0,017
<u>4) Zentraler Tjan'-Šan'</u>						
14	Suusamyr	2091	0,006	-0,096	0,018	0,092
15	Naryn	2045	0,009	-0,061	0,066	0,075
16	Tjan'-Šan' (bis 1996)	3614	-0,004	-0,147	0,069	0,046
<u>5) Westlicher Tjan'-Šan'</u>						
17	Žalal Abad	971	0,048	-0,023	0,078	0,103
18	Isfana	1160	0,009	-0,040	0,007	0,067
19	Paca Ata	1529	0,024	-0,054	0,043	0,108
<u>6) Südlicher Tjan'-Šan'</u>						
20	Ak-Saj (1952 - 1997) *)	3135	-0,042	-0,174	0,057	-0,023
21	Sary-Taš *)	3155	0,018	-0,070	0,044	0,077

*) Klimastationen Ak-Saj und Sary-Taš liegen in hochgelegenen Bergsenken, bilden Ausnahmen

Abb. 27: Zusammenhang zwischen den Trendkoeffizienten der Monatsmitteltemperaturen 1972-2000 des Monats April und der Höhenlage ausgewählter Klimastationen*) in Zentralasien



*) Klimastationen Ak-Saj und Sary-Taš wurden nicht berücksichtigt

3.3 Auswirkungen auf die Gletscherentwicklung

Kuz'micenok (2002) und Dikich (2002) haben getrennt voneinander Berechnungen der Gletscherentwicklung im kirgisischen Teil des Tjan'-Šan' vorgenommen. Ausgangspunkt und Grundlage der Berechnungen von Kuz'micenok sind der „Katalog der Gletscher der UdSSR“ (Katalog lednikov SSSR) und die Karte der „Gegenwärtigen Vergletscherung“ (Sovremennoe oledenenie) im Maßstab 1:500.000 aus der Reihe „Naturressourcen der Kirgisischen SSR“ (Prirodnye resursy Kirgizskoj SSR). Die Gletscher Kirgistans sind in 25 Bänden einschließlich eines ergänzenden Katalogs dargestellt. Da die Bearbeitung der Bände in den Jahren von 1968 bis 1982 erfolgte und auf Luftaufnahmen und topographischen Karten basiert, die ab 1943 gemacht wurden, nimmt Kuz'micenok an, dass mit dem Gletscherkatalog der Zustand der Gletscher Kirgistans in den 60er Jahren wiedergegeben wird. Danach gab es in Kirgistan 8.208 Gletscher mit einer Fläche von 8.077 km² und einem Volumen von 494,7 km³.

Kuz'micenok operiert bei seinen Berechnungen zur Gletscherentwicklung in Kirgistan mit verschiedenen Varianten. Er führt seine Modellrechnungen unter Zugrundelegung der beiden Parameter 'Durchschnittliche Lufttemperatur in der sommerlichen, warmen

Jahreszeit' (Index für die Ablation) und 'Jährliche Niederschlagsmenge' (Index für die Akkumulation) durch. Unterstellt man einen Anstieg der Sommertemperaturen (Durchschnitt der Monate Juni - August) seit den 60er Jahren bis zum Jahr 2050 um 5 °C und geht davon aus, dass die jährlichen Niederschlagsmengen konstant bleiben, dann soll die Firngrenze der Gletscher um durchschnittlich 724 m nach oben wandern, die Zahl der Gletscher in Kirgistan um 19,5 % sinken, die Gletscherfläche um 39,5 % und das Gletschervolumen um 31,6 % schrumpfen. Unterstellt man hierbei, dass die jährliche Niederschlagsmenge in dieser Zeit um 10 % ansteigt, dann wird die Firngrenze um 570m nach oben wandern, die Zahl der Gletscher um 5,6 % sinken, die Gletscherfläche um 30,7 % und die Gletschermasse um 25,2 % zurückgehen.

Dikich (2002) hat sich speziell und sehr detailliert mit dem Schrumpfungsprozess der Gletscher im Issyk-Kul'-Becken (Kungej- und Terskej Ala-Too, vgl. Abb. 1) beschäftigt, die in der Zeit von 1980 bis 1995 um durchschnittlich 2,5 bis 6,2 m pro Jahr zurückgegangen sind (Talgletscher 6,2 m; Kargletscher 3,1 m; Hanggletscher 2,5 m). Da in den letzten 20 Jahren, besonders in den letzten 10 Jahren das Tempo der Erwärmung zugenommen hat - die berechneten Trendkoeffizienten der Sommertemperaturen wurden von Dikich (2002, II, S. 13) für das Issyk-Kul'-Becken für den Zeitraum von 1981 - 2000 mit 0,023 °C/Jahr, für den Zeitraum von 1991 - 2000 mit 0,058 °C/Jahr angegeben, für die Hochgebirgszone entsprechend mit 0,073 °C/Jahr und 0,139 °C -, nimmt Dikich an, dass sich der Gletscherrückgang weiter fortsetzt. Sollte das Tempo der Erwärmung der letzten 20 Jahre anhalten, käme es bis zum Jahr 2025 zu einer Erhöhung der Sommertemperaturen um 1,5 - 2,0 °C. Diese Entwicklung würde auf den südlichen Hängen des Kungej Ala-Too katastrophale Auswirkungen haben. Die Gletscherfläche würde hier auf 23,4 % der Fläche schrumpfen, auf den Nordhängen des Terskej Ala-Too auf 68,1 % zurückgehen. Der damit verbundene Massenverlust der Gletscher (Reduktion auf 26,5 % bzw. 61,6 %) hätte langfristige Auswirkungen auf den Wasserabfluss in die vorgelagerten Beckenbereiche, die Entwicklung des Wasserspiegels des Issyk-Kul' und die wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten des Wassers.

Derartige Rechnungen besitzen einen stark spekulativen Charakter. Bei den Modellrechnungen werden Trendkoeffizienten unterstellt, deren Ableitung aus der vorausgegangenen Entwicklung bereits mit Problemen verbunden ist und zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen geführt hat. Ein Anstieg der Sommertemperaturen ist nicht zu leugnen. Nach den Ergebnissen der obigen Zeitreihenanalyse fällt dieser aber wesentlich schwächer aus als bei den vorgestellten Modellrechnungen unterstellt wird. Je nachdem, welcher Anfangs- und Endzeitpunkt für die Trendanalyse gewählt wird, erfolgen divergierende Einschätzungen sowohl der vergangenen als auch der zukünftigen Entwicklung.

Glazirin et al. (2002) haben auf der Basis von 18 Gletschergebieten im westlichen und südlichen Tjan'-Šan' gleichfalls versucht, eine Abschätzung der Veränderung der Vergletscherung im Tjan'-Šan' auf Grund von Klimaveränderungen vorzunehmen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass - die Jahresniederschläge als konstant vorausgesetzt - in den Gletschergebieten mit kleineren Gletschern von 15 bis 60 km² Fläche bereits bei einer Erhöhung der Sommertemperaturen von +0,5 °C eine Reduktion der Gletscherfläche um bis zu 30 % eintreten wird, bei einer Erhöhung der Sommertemperaturen von +1,0 °C sogar mit einer Halbierung der vergletscherten Fläche gerechnet werden muss (Glazirin et al. 2002, S. 73). Eine Angabe zum zeitlichen Bezug fehlt.

Bedeutsamer für den Schmelzprozess der Gletscher als die Erhöhung der Sommertemperaturen scheint die Verlängerung der Wärmeperiode (Ablationsperiode) zu sein. Wie Dikich (2002; II, S. 7) berichtet, bildete sich in der Regel im Zungenbereich der Gletscher Ende August bis zum 10. - 15. September eine stabile Schneedecke. Seit Mitte der 80er Jahre hat sich der Zeitabschnitt, in der sich eine dauerhafte Schneedecke bildete, in die 2. - 3. Septemberwoche verschoben, was zu einer Verlängerung der Ablationsperiode geführt hat.

4 Atmosphärische Niederschläge

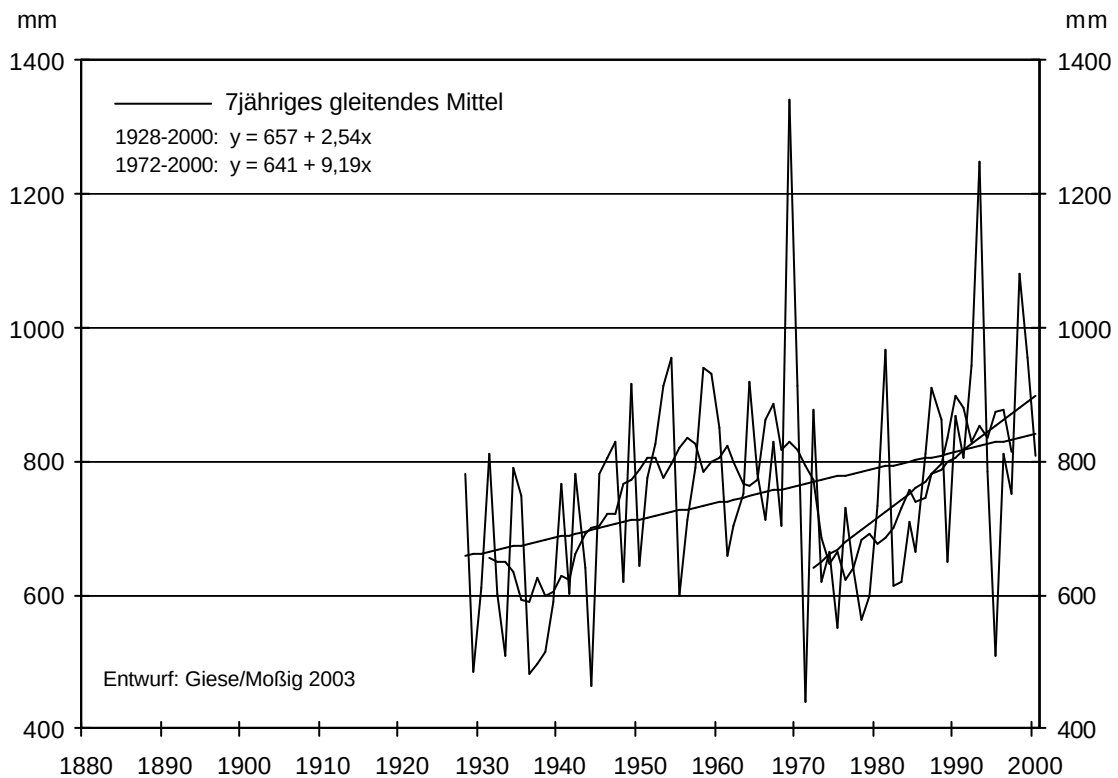
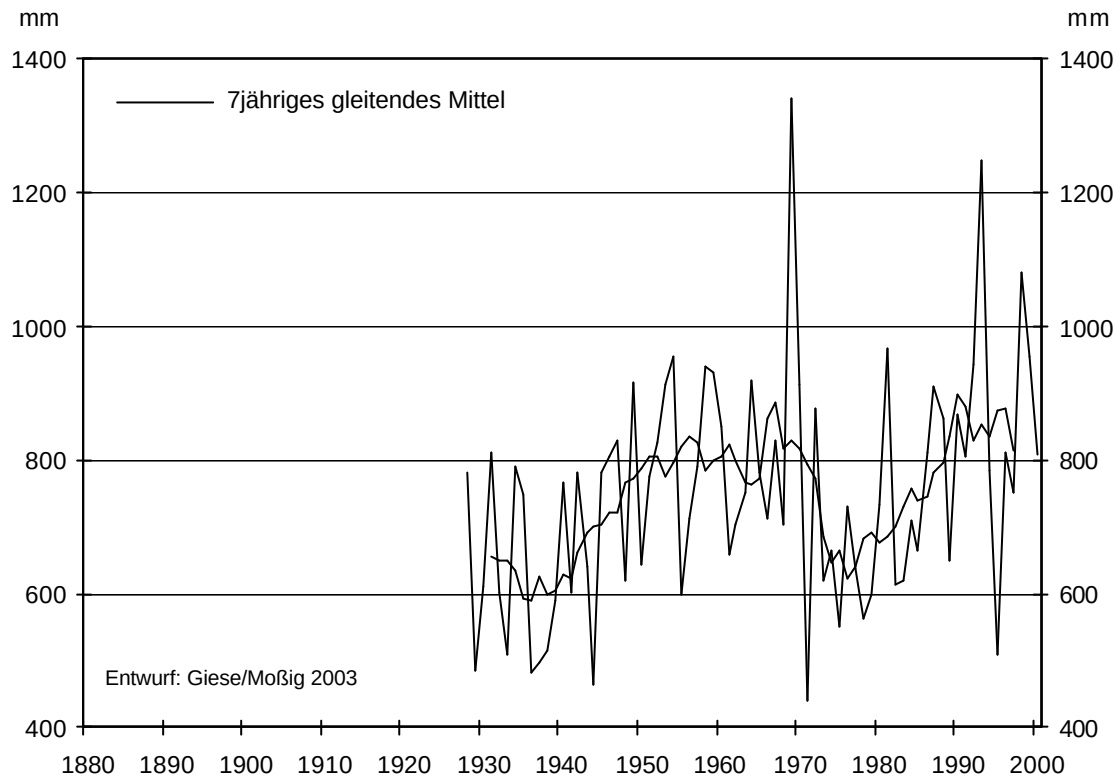
Neben dem thermischen Regime werden die Abflussmengen der Flüsse und das Wasserdargebot in den Vorlandbereichen der Gebirges vor allem durch das Regime der atmosphärischen Niederschläge beeinflusst. Aizen et al. (1997, S. 1396 - 1399) kommen bei ihren Recherchen zu dem Ergebnis, dass die Niederschlagsmengen im Tjan'-Šan' im Zeitraum von 1940 - 1991 allenthalben zugenommen haben, unterhalb von 2.000 m stärker als oberhalb von 2.000 m, im westlichen und nördlichen Tjan'-Šan' dabei deutlich stärker als in den zentralen Bereichen des Tjan'-Šan': 2,45 mm/Jahr gegenüber 0,71 mm/Jahr.

Zu einem ähnlichen, aber differenzierteren Ergebnis gelangt Romanovskij (2002, S. 6/7) bei seiner Zeitreihenanalyse. Sie bezieht sich auf die jüngere Entwicklung von 1972 - 2001. Die stärkste Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen stellt Romanovskij mit durchschnittlich 4,7 mm/Jahr im westlichen Tjan'-Šan' fest. Dabei fällt besonders die Station Paca-Ata (Westabdachung der Ferganskij-Kette) mit einer Zunahme der jährlichen Niederschlagssumme von 9,2 mm/Jahr auf. Sie soll vor allem durch Strömungen feuchter Luftmassen aus westlichen Richtungen in den Sommermonaten (Mai - Juli) hervorgerufen werden. Eine Erhöhung der jährlichen Niederschlagsmengen wird auch für die nördlichen Bereiche des Tjan'-Šan' (Biškek, Bajtik, Novorosijka, Talas, Tjuja-Ašuu) festgestellt (im Durchschnitt +1,15 mm/Jahr). Auch hier wird die Zunahme auf eine verstärkte Niederschlagstätigkeit in der sommerlichen Zeit, vor allem im Juli zurückgeführt.

Die zentralen Bereiche des Tjan'-Šan' liegen zumeist im Niederschlagsschatten, so dass hier eine Reduzierung der jährlichen Niederschlagsmengen beobachtet wird (Susamyr -2,6 mm/Jahr; Tjan'-Šan' -1,6 mm/Jahr). Sie vollzieht sich vor allem in der sommerlichen Zeit (April - Juni bzw. Mai - September). Eine Ausnahme stellt die Station Naryn dar, bei der die jährlichen Niederschlagsmengen im Zeitraum von 1972 - 2001 zugenommen haben. Die Zunahme wird dadurch erklärt, dass feuchte Luftmassen aus westlicher Richtung durch einen Korridor im Ferganskij-Gebirge in das Naryntal einzudringen vermögen.

Mit den Untersuchungen von Aizen et al. (1997) sowie Romanovskij (2002) ist ein Problem verbunden, das bereits im Abschnitt 3.1 erörtert wurde und die Festlegung der Zeitabschnitte berührt, die den Trendanalysen zugrunde gelegt wurden. Aus langfristigen Entwicklungsverläufen der jährlichen Niederschlagsmengen werden relativ „beliebig“ Zeitabschnitte herausgegriffen und darauf bezogen Trendberechnungen durchgeführt. Betrachten wir zu diesem Zweck die Station Paca-Ata, für die Romanovskij für den Zeitraum von 1972 - 2001 eine starke Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen von über 9 mm/Jahr ermittelt hat. Wie man der Abbildung 28 entnehmen kann, verläuft die langfristige Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge zyklisch.

Abb. 28: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Station Paca-Ata 1928 - 2000, Fergana-Becken, Westabdachung der Ferganskij-Kette, 1529 m



Die Veränderung des Anfangszeitpunktes der Trendanalyse um wenige Jahre beeinflusst deshalb das Ergebnis der Trendanalyse erheblich. Würde man die Trendanalyse in den Jahren 1969 oder 1970 ansetzen, ergäben sich Trendkoeffizienten von lediglich 4,5 mm/Jahr bzw. 8,5 mm/Jahr, dagegen in den Jahren 1971 oder 1973 angesetzt sogar von 10,4 mm/Jahr bzw. 11,1 mm/Jahr. Setzt man die Trendanalyse jedoch längerfristig an, zum Beispiel in den Jahren 1934, 1935 oder 1936, ergibt sich ein deutlich schwächerer Anstieg der jährlichen Niederschlagsmenge von 2,30 mm/Jahr bis 2,55 mm/Jahr oder bei einem Anfangsjahr 1949 -1952 sogar nur 0,53 mm/Jahr bis 0,86 mm/Jahr.

Fazit: Vor Durchführung einer Trendanalyse sollte geprüft werden, ob der Zeitreihe ein Trend inhärent ist und für welchen Zeitabschnitt er zutreffend ist.

4.1 Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen

Betrachten wir wie zuvor bei der Zeitreihenanalyse der Jahresmitteltemperaturen die durch Glättung erzeugten generalisierten Kurvenverläufe der jährlichen Niederschlagsmengen. Die Kurven oszillieren stark, so dass eine Interpretation der Niederschlagskurven erst nach einer Glättung der Werte möglich wird. Die jährliche Niederschlagsmenge der Klimastation Almaty beispielsweise schwankte in den letzten 50 Jahren (1950 - 2000) zwischen 360 mm (1991) und 890 mm (1969) bzw. 980 mm pro Jahr (1958). Bei einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von $\bar{x} = 651$ mm betrug die Standardabweichung $s = 124$ mm (vgl. Tab. 8).

Die Interpretation der geglätteten Kurvenverläufe (7jährige, 15jährige und 30jährige gleitende Mittel) erlaubt folgende Feststellungen:

- Die langfristige Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen vollzieht sich in einem unregelmäßigen Rhythmus von Auf- und Abschwüngen (vgl. Abb. 29 - 32: Kazalinsk, Almaty, Karakol, Naryn).
- Ein synchroner Verlauf der geglätteten Kurven wie bei den Jahresmittelwerten der Lufttemperatur ist dabei nicht feststellbar (vgl. Abb. 33).
- Bei bestimmten Gruppen von Klimastationen, die nach Lage und Exposition Ähnlichkeiten aufweisen, schimmert ein synchroner Verlauf der Kurven durch. Das gilt einmal für die Klimastationen der nördlichen Gebirgs- und Gebirgsvorlandbereiche des Tjan'-Šan' wie Almaty, Biškek, Bajtik und Novorosijka (vgl. Abb. 34), zum anderen für Klimastationen wie Paca-Ata, Isfana, Sary-Taš und Ak-Saj, die den westlichen bzw. südlichen Bereichen des Tjan'-Šan' zuzurechnen sind und vornehmlich südwestexponierte Lagen einnehmen (vgl. Abb. 35). Einen annähernd synchronen Verlauf der Kurven weisen auch die Klimastationen der zentralen Bereiche des Tjan'-Šan' auf: Klimastationen Tjan'-Šan', Suusamyrla und bedingt auch Naryn.

Tab. 8: Kennwerte zum Niederschlag ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1970-2000

Nr Klimastation		Höhe in m	Niederschlagsmenge 1970-2000			Hauptniederschlagszeit	
			Durchschnitt pro Jahr (mm)	Standard- abweichung (mm)	Variations- koeffizient (%)	(Monate)	(Jahreszeit)
<u>1) Tiefländische Beckenlagen, nördliche Vorgebirgsbereiche des Tian'-Šan'</u>							
1	Kazalinsk	68	121,6	32,1	26,4%	IV; XI+XII	Frühjahr+Winter
2	Taškent	478	424,6	106,91	25,2%	IV+V; XII-II	Frühjahr (Winter)
3	Biškek	771	438,1	82,7	18,9%	IV+V; X+XI	Frühjahr (Winter)
4	Almaty	825	648,5	117,6	18,1%	II-VI; X+XI	Frühjahr (Winter)
<u>2) Nördlicher Tjan'-Šan'</u>							
5	Bajtik	1590	557,7	103,1	18,5%	III-VII; X+XI	Frühjahr
6	Novorosijka	1524	455,7	86,7	18,8%	IV-VII	Frühjahr
7	Tjuja-AŠuu (bis 1998)	3120	765,4	123,6	16,2%	IV-XII; X+XI	Frühjahr/Sommer
<u>3) Issyk-Kul-Becken</u>							
8	Balykši (Rybac'e)	1670	132,0	47,5	35,9%	VI-VIII	Sommer
9	Colpon-Ata	1620	279,3	71,6	25,6%	V-VIII	Sommer
10	Krasnyj Oktjabr' (bis 1998)	1645	658,5	104,8	15,9%	V-VIII	Sommer
11	Karakol (Prževal'sk)(bis 1996)	1718	432,5	69,3	16,0%	V-VIII	Sommer
12	Pokrovka	1740	412,9	111,4	27,0%	V-VIII	Sommer
13	Kara-Batkak	3415	--	--	--		
<u>4) Zentraler Tjan'-Šan'</u>							
14	Suusamyr	2091	317,8	97,1	30,5%	V+VI	Sommer
15	Naryn	2045	292,0	68,6	23,5%	V-VII	Sommer
16	Tjan'-Šan' (bis 1996)	3614	267,7	83,9	31,3%	V-VIII	Sommer
<u>5) Westlicher Tjan'-Šan'</u>							
17	Žalal Abad	971	496,7	119,7	24,1%	II-V; X-I	Frühjahr (Winter)
18	Isfana	1160	431,5	100,5	23,3%	II-V	Frühjahr
19	Paca Ata	1529	764,2	173,3	22,7%	III-VI	Frühjahr
<u>6) Südlicher Tjan'-Šan'</u>							
20	Ak-Saj (bis 1998)	3135	261,6	63,7	24,4%	V-VIII	Sommer
21	Sary-Taš	3155	377,1	79,7	21,1%	IV-VII	Sommer

Abb. 29: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Kazalinsk 1885 - 2001, Mündungsbereich des Syr-darja in den Aral-See, 68 m

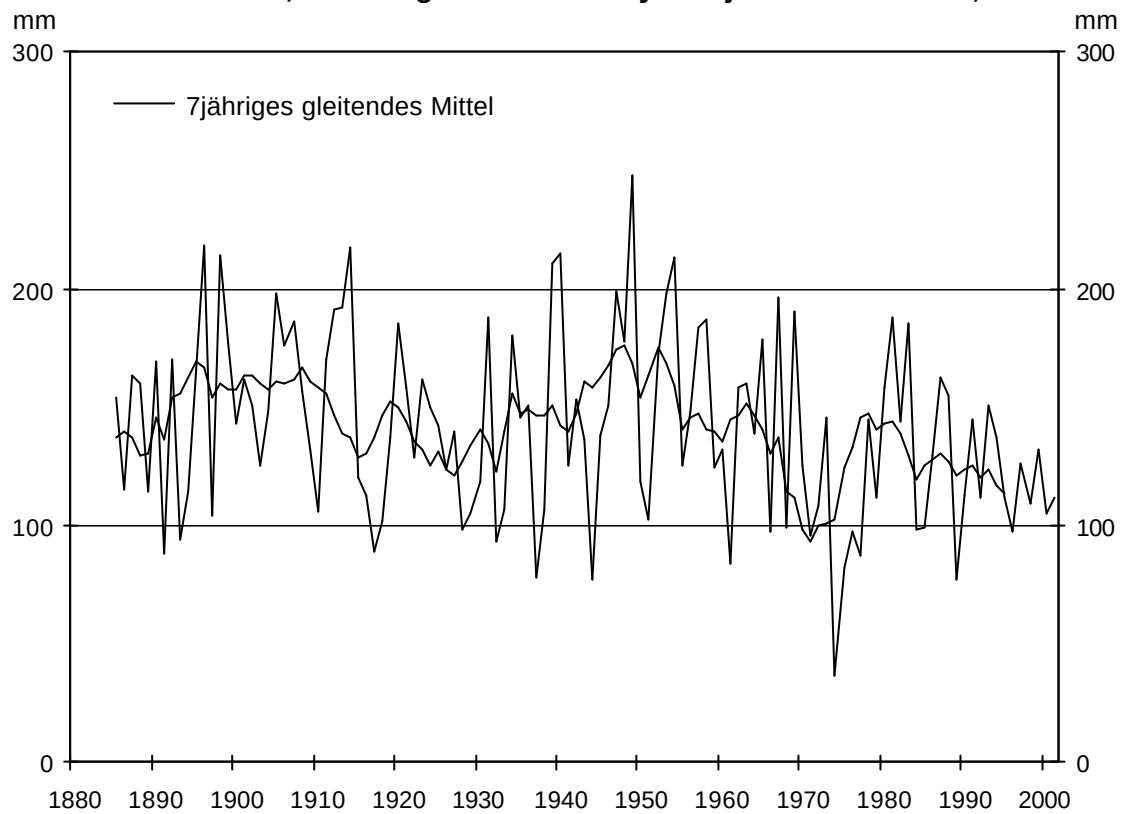


Abb. 30: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Almaty (Alma-Ata) 1887 - 2001, Gebirgsfußfläche des Zailijskij-Ala-Too, Nordabdachung des Tjan'-Šan, 825 m

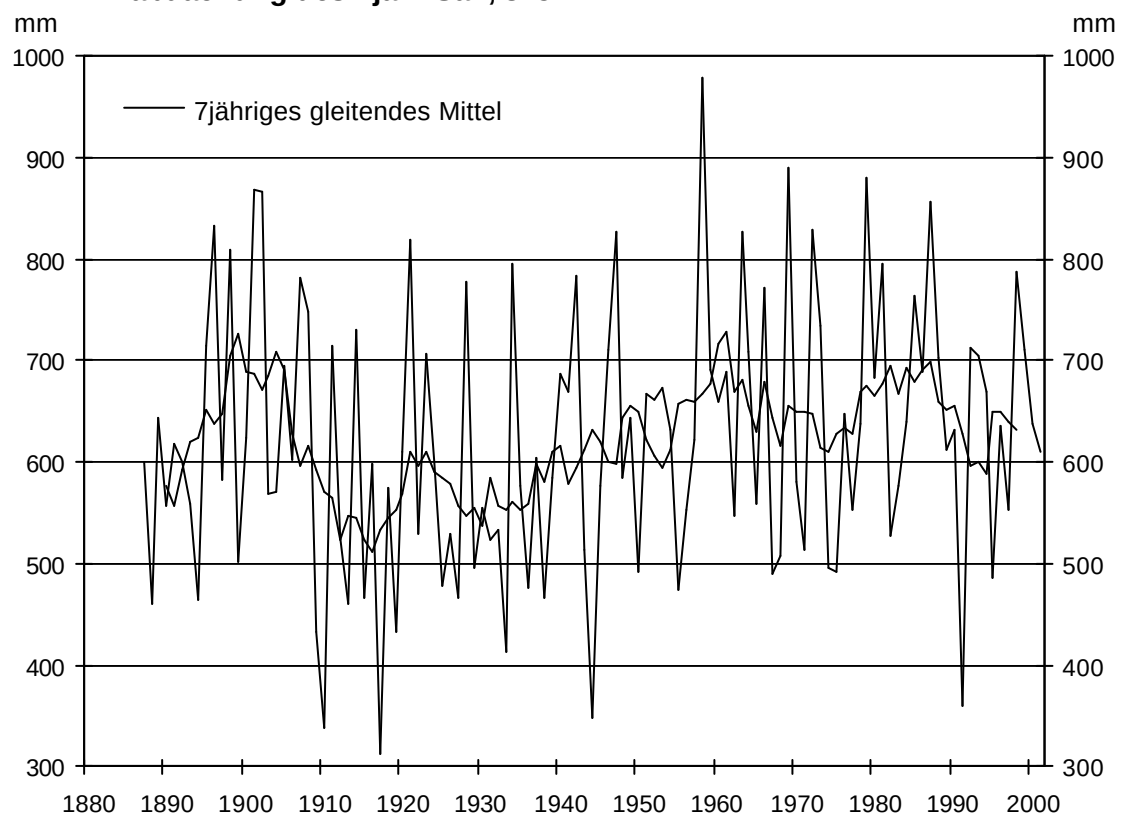


Abb. 31: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Karakol (Prževal'sk) 1883 - 1996, Issyk-Kul'-Becken, östlicher Rand, 1718 m

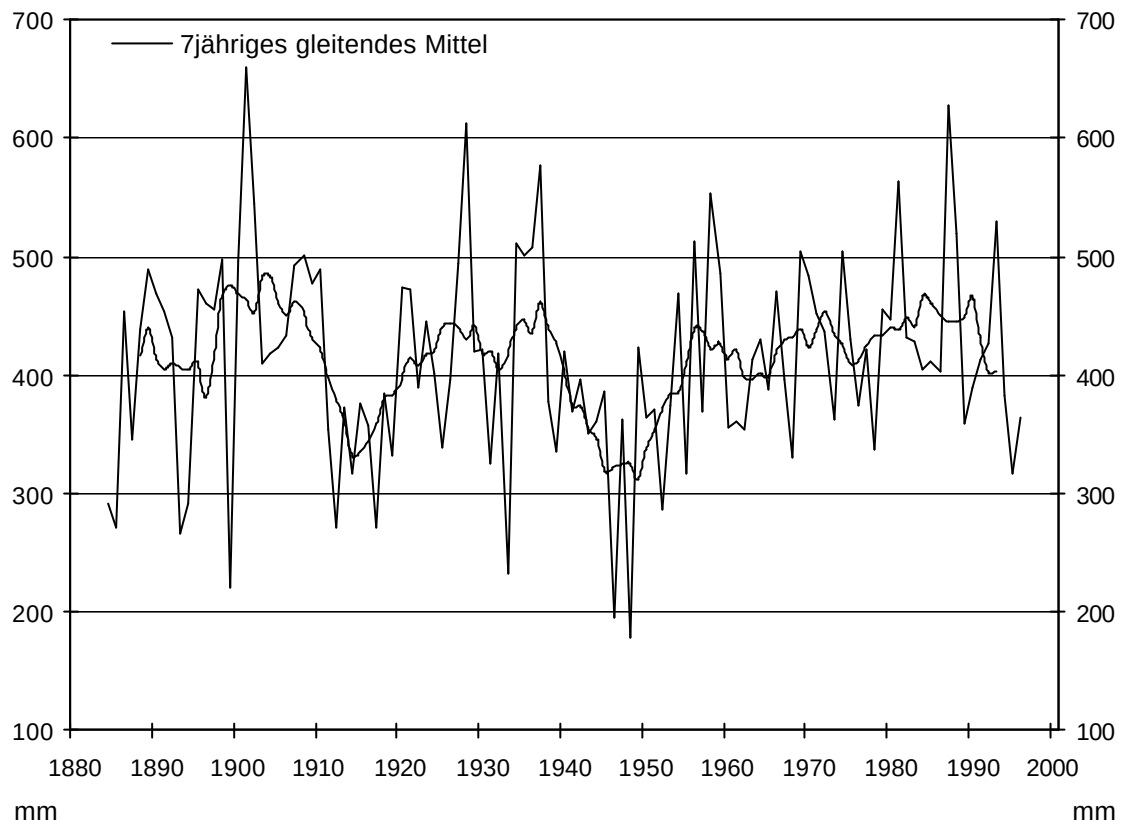
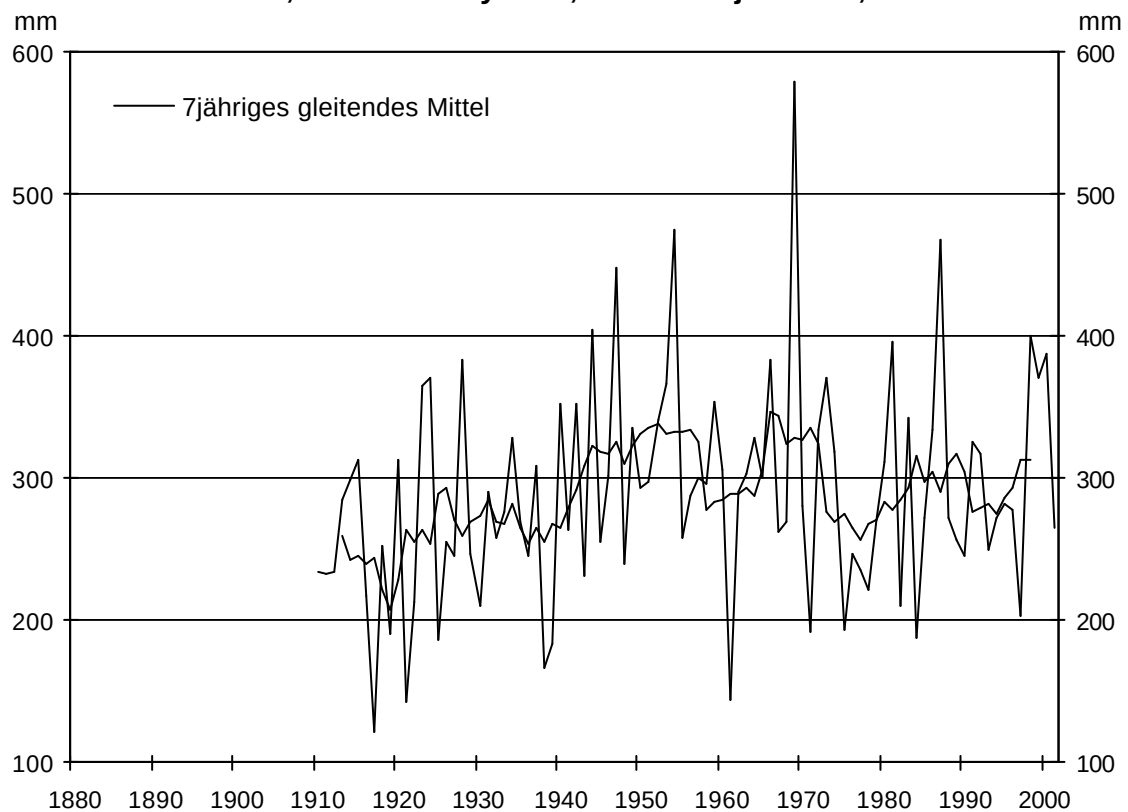
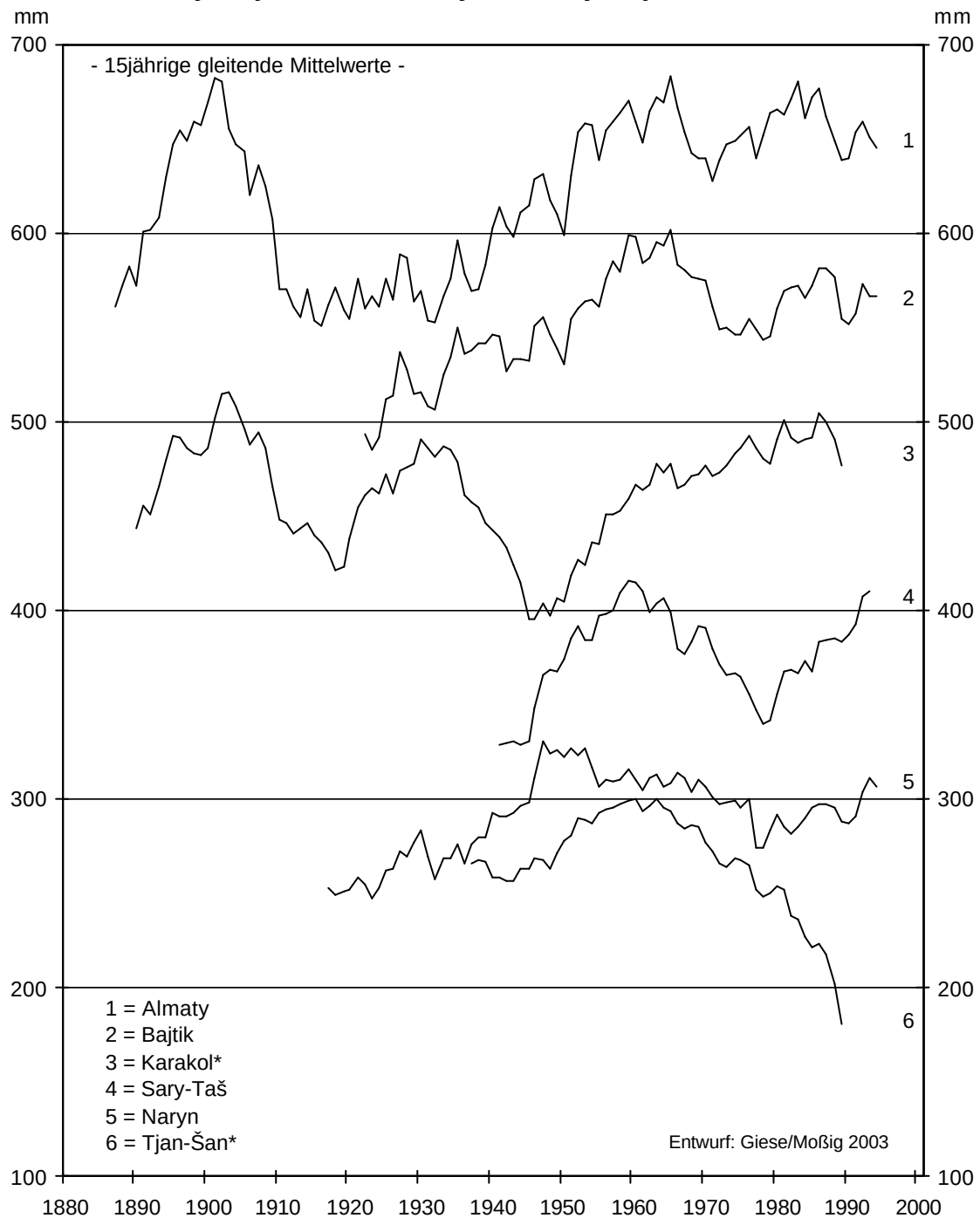


Abb. 32: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station Naryn 1910 - 2001, mittleres Naryn-Tal, zentraler Tjan'-Šan', 2045 m



**Abb. 33: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Klimastationen
Almaty, Bajtik, Karakol, Sary-Taš, Naryn, Tjan-Šan 1880-2000**

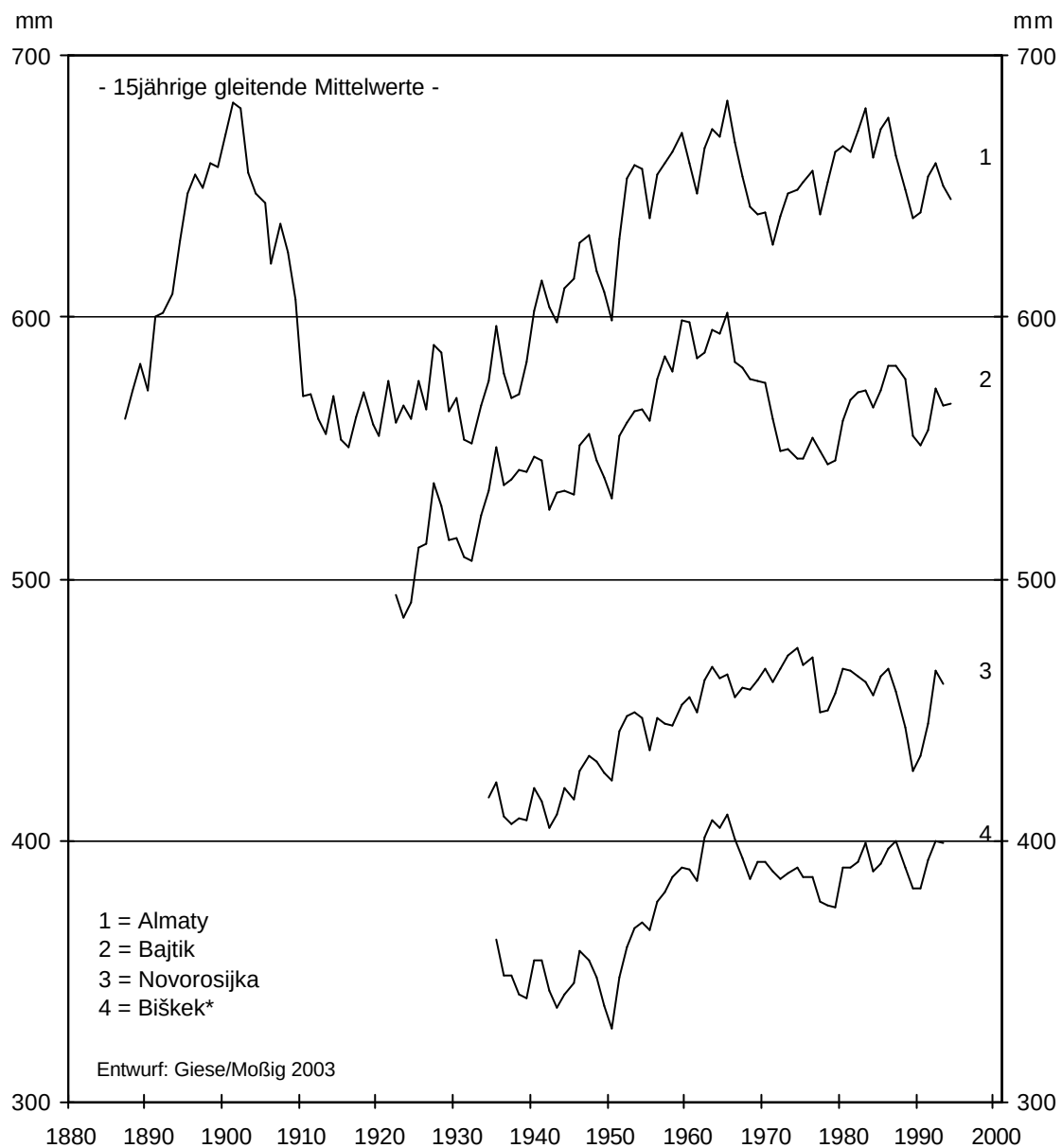


* Die Werte der Station Karakol wurden aus Darstellungsgründen um 50 mm nach oben verschoben, die der Station Tjan-Šan um 50 mm nach unten.

- Nach den Untersuchungen von Aizen et al. (1997) und Romanovskij (2002) sollen die Niederschlagsmengen in der jüngeren Vergangenheit (ab 1941 bzw. 1970) im Tjan'-Šan' und seinen Vorlandbereichen - zentrale Bereiche des Tjan'-Šan' ausgeschlossen - zugenommen haben. Beide Autoren unterstellen dabei ein trendhaftes Verhalten der Niederschlagsentwicklung. Nach den vorliegenden Kurvenverläufen lässt sich die Annahme einer trendhaften Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen in der jüngeren Vergangenheit aber nicht aufrechterhalten. Insgesamt muss von einer unveränderten Niederschlagstätigkeit ausgegangen werden. Diese Aussage wird gestützt, wenn man die Zeitreihen der monatlichen Niederschlagsmengen betrachtet, die zumeist in der Tendenz eine relativ gleichbleibende Oszillation um einen festen Mittelwert zeigen (vgl. Abb. 6.1 - 6.21, Anhang).

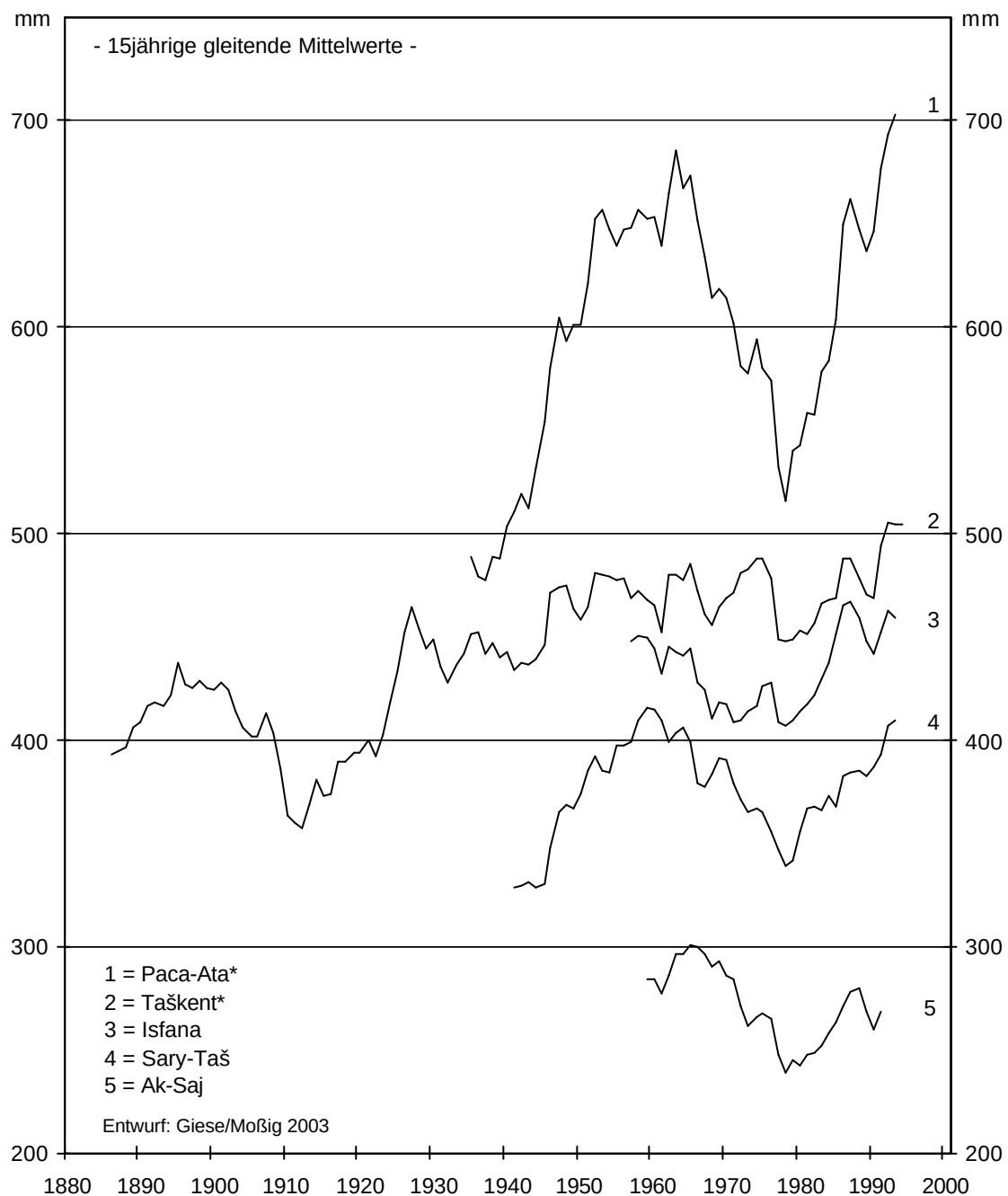
Wie bereits oben erwähnt, hängt die Beantwortung der Frage, ob ein Trend angenommen werden kann oder nicht, wesentlich vom gewählten Zeitabschnitt ab, auf den sich die Berechnung bezieht. Im Fall der Station Taškent kann man eine trendhafte Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen annehmen, wenn man den Kurvenverlauf seit Beginn der Aufzeichnungen ab 1880 in Augenschein nimmt. Hier ist ein Anstieg der jährlichen Niederschlagsmengen von durchschnittlich 320 mm Anfang der 80er Jahre des 19. Jh. auf durchschnittlich 450 mm in den 90er Jahren des 20. Jh. auszumachen. Betrachtet man den Zeitablauf ab 1950, ist kein trendhafter Anstieg der jährlichen Niederschlagsmengen mehr erkennbar; die jährlichen Niederschlagsmengen schwanken vielmehr geringfügig um einen konstanten Mittelwert von $\bar{x} = 427$ mm/Jahr ($s = 111$ mm/Jahr; $v = 26$ %). Umgekehrt stellt sich die Entwicklung für die Station Kazalinsk dar. Hier ist bis 1960 kein Trend feststellbar, ab 1950 dafür aber ein trendhafter Rückgang der jährlichen Niederschläge von durchschnittlich 174 mm/Jahr auf 113 mm/Jahr. Die auch andernorts zu beobachtende zunehmende Aridität des Klimas der tiefländischen Beckenbereiche Zentralasiens wird hiermit bestätigt.

**Abb. 34 : Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge der Klimastationen
Almaty, Bajtik, Novorosijka und Biškek (nördliche Gebirgs- und
Vorgebirgsbereiche des Tjan'-Šan) 1880-2000**



* Die Werte der Station Biškek wurden aus Darstellungsgründen um 50mm nach unten verschoben.

Abb. 35: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Klimastationen Paca-Ata, Taškent, Isfana, Sary-Taš und Ak-Saj (westliche und südliche Gebirgsbereiche des Tjan'-Šan) 1880-2000



* Die Werte der Station Paca-Ata wurden aus Darstellungsgründen um 150mm nach unten verschoben, Taškent um 50mm nach oben.

Abb. 36: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge ausgewählter Klimastationen in Zentralasien 1880-2000



* Die Werte der Station Biškek wurden aus Darstellungsgründen um 100mm nach oben verschoben, Taškent um 70mm nach oben, Sary-Tash um 10mm nach unten, Suusamyr um 35mm nach unten, Naryn um 30mm nach unten.

Ein negativer Trend der jährlichen Niederschlagsmengen ist ebenso für die zentralen Bereiche des Tjan'-Šan', die durch hohe Gebirgsketten eingegrenzt werden (Station Suusamyr und Tjan'-Šan') und den Einzug feuchter Luftmassen verhindern, zu beobachten, so dass im Winter geringe Niederschläge fallen (durchweg unter 20 bis 30 mm/Monat); der Hauptniederschlag erfolgt im Sommer (durchschnittlich 40 - 60 mm/Monat, zum Teil bis zu 100 mm/Monat) in Form von Konvektionsniederschlägen. Das obere Naryntal, das ebenso dem zentralen Tjan'-Šan' zuzurechnen ist, ist nach Westen geöffnet und kann so eher von westlichen zyklonalen Strömungen, die feuchte Luftmassen nach Zentralasien bringen, erfasst werden, so dass der seit Mitte der 50er Jahre gleichfalls zu beobachtende Rückgang der jährlichen Niederschlagsmengen moderater als bei den Klimastationen Suusamyr und Tjan'-Šan' ausfällt (vgl. Abb. 36).

4.2 Niederschlagswirksamkeit atmosphärischer Zirkulationsprozesse

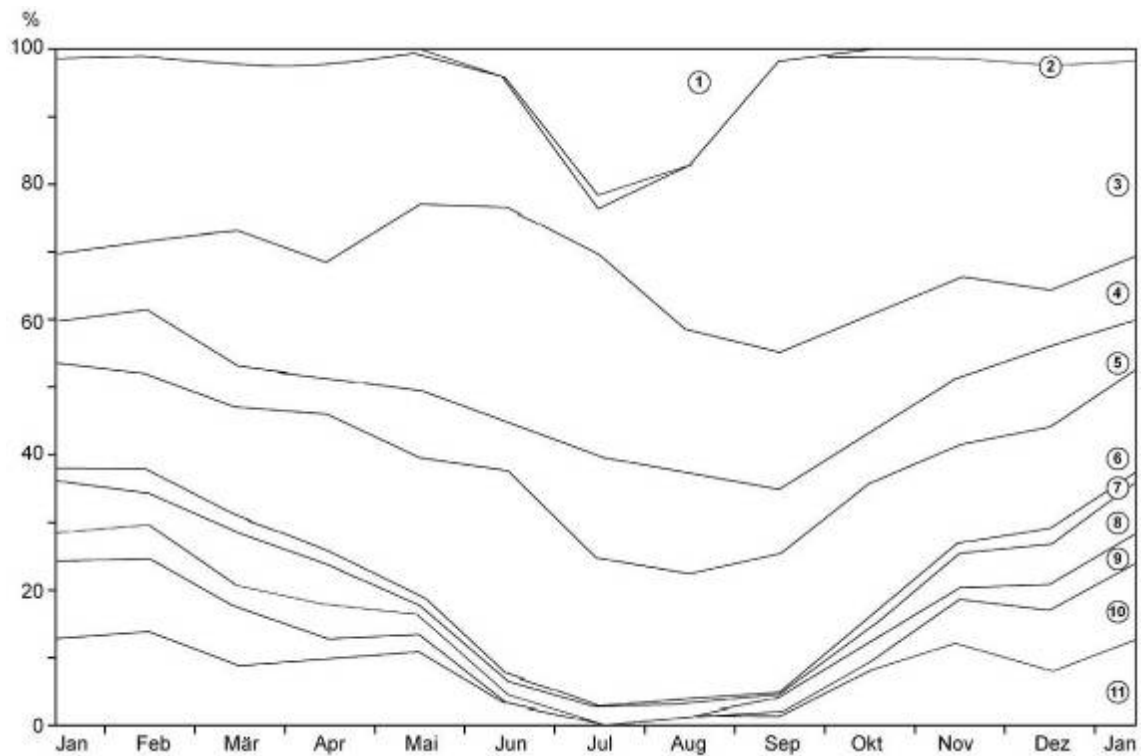
In der regionsspezifischen Übereinstimmung der Kurvenverläufe (Vgl. Abb. 34 und 35) wird deutlich, dass die Niederschlagstätigkeit durch großräumige Zirkulationsprozesse und die besondere Orographie des Raumes bestimmt wird. Darauf deuten auch die jahreszeitlich unterschiedlichen Hauptniederschlagszeiten hin. Die nord- und west-exponierten Gebirgs- und Vorgebirgsbereiche erhalten ihren Hauptniederschlag in der kalten Jahreszeit (Frühjahr und Winter), die zentralen und südlichen Bereiche des Tjan'-Šan' dagegen im Sommer (vgl. Abb. 5.1 - 5.21, Anhang).

Die Niederschlagstätigkeit ist in Zentralasien vor allem mit vier typischen Wetterlagen verknüpft. Sie werden in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt.

4.2.1 Südwestliche Randlage des sibirischen Hochs

Die erste typische Wetterlage ist an die sibirische Antizyklone gebunden, die sich mit ihrem Kern in der kalten Jahreszeit bis in die nördlichen und nordöstlichen Randgebiete Zentralasiens (Südkazachstan) verschiebt. Zentralasien liegt dann in einer südwestlichen Randlage des sibirischen Hochs (Typ 3; vgl. Abb. 37). Dieser Zustand der Atmosphäre ist nicht nur im Winter, sondern auch in den Übergangsjahreszeiten für Zentralasien wetterbestimmend. Die südwestliche Randlage des sibirischen Hochs ist durchgehend von September bis April die vorherrschende Wetterlage in Zentralasien.

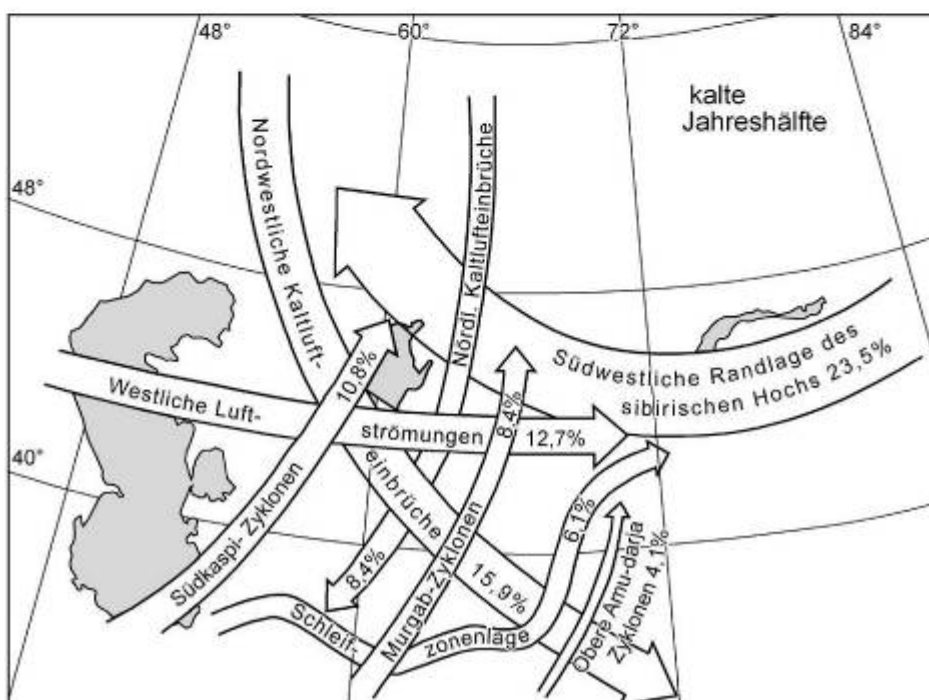
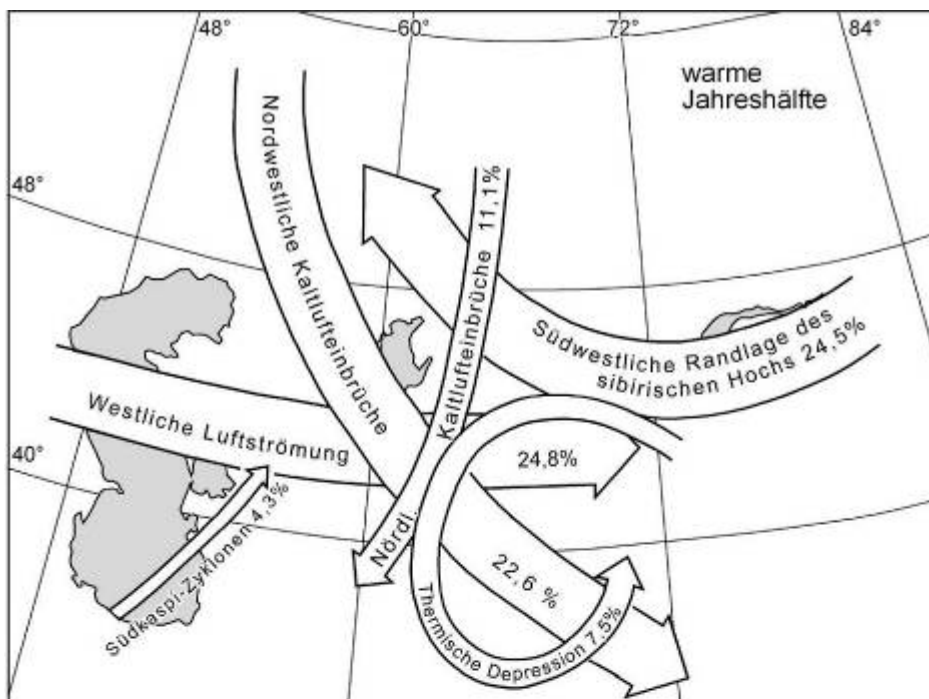
Abb. 37: Dauer und Häufigkeit des Auftretens typischer Wetterlagen in Zentralasien



Wetterlagen	Jährliche Häufigkeit
Typ 1 = Thermische Depression	3,8 %
Typ 2 = Einfließen von Warmluft auf breiter Front	- -
Typ 3 = Südwestliche Randlage des sibirischen Hochs	27,4 %
Typ 4 = Westliche Luftströmungen	18,7 %
Typ 5 = Nördliche Kaltlufteinbrüche	9,7 %
Typ 6 = Nordwestliche Kaltlufteinbrüche	19,2 %
Typ 7 = Schwachmobile Zyklone im Norden Mittelasiens	1,5 %
Typ 8 = Schleifzonenlage	3,9 %
Typ 9 = Obere Amudarja-Zyklonen	2,7 %
Typ 10 = Murgab-Zyklonen	4,6 %
Typ 11 = Südkaspi-Zyklonen	7,4%

Quelle: Bugaev 1957, S. 453 und 456

Abb. 38: Atmosphärische Zustände und Prozesse in Zentralasien



Quelle: Bugaev 1957, Fig. 167 und 168.

Bildet sich die sibirische Antizyklone stark aus, schiebt sie sich mit den Ausläufern ihrer südwestlichen Peripherie bis an den Südrand Zentralasiens vor. In solchen Phasen hält beinahe auf dem gesamten Territorium Zentralasiens kräftiges, wolkenloses Frostwetter mit scharf ausgebildeten Temperaturinversionen an. In den Fällen, wo die sibirische Antizyklone schwach entwickelt ist, wirkt sich die antizyklonale Randlage auf die südlichen Landesteile kaum aus. Aufgrund der Nachbarschaft stark abgekühlter kontinentaler Luftmassen aus dem kazachstanischen Bereich und sehr warmer, tropischer Luftmassen über Indien, Afghanistan und dem Iran kommt es dann in den südlichen Gebieten Zentralasiens zur Ausbildung der planetarischen Frontalzone und mit ihr zur Ausbildung von Zyklonen. Mit dem Auftreten von Zyklonen setzt in den südlichen tiefländischen Landesteilen (Südturkmenistan, Südkazachstan, Tadschikistan) die Regenzeit ein. Sie beginnt im November/Dezember, erreicht ihren Höchststand im März und endet im April (vgl. Abb. 5.2, Anhang). In dieser Zeit fallen ca. 70 - 80 % der jährlichen Niederschläge. Dieses gilt nicht für die nördlichen und nordöstlichen Bereiche Zentralasiens, so u.a. für die nördlichen Vorlandbereiche des Tjan'-Šan'. Hier fällt die Hauptregenzeit in die Übergangsjahreszeiten, vor allem in das Frühjahr (Monate April, Mai; vgl. Abb. 5.3 - 5.7; Anhang).

4.2.2 Nördliche und nordwestliche Kaltlufteinbrüche

Neben der südwestlichen Randlage des sibirischen Hochs, die in den entsprechenden Monaten über 25 % des Wettergeschehens in Zentralasien prägen, spielen nordwestliche und nördliche Kaltlufteinbrüche eine wichtige Rolle. Bei den nordwestlichen Kaltlufteinbrüchen handelt es sich um atmosphärische Prozesse, bei denen kalte Luftmassen aus arktischen oder gemäßigten Breiten aus nordwestlicher Richtung (aus dem westlichen Kazachstan und vom Ustjurt-Plateau) nach Zentralasien vordringen. Nördliche Kaltlufteinbrüche, die man seltener beobachtet, lassen entsprechende Luftmassen aus dem Bereich des Ural, Westsibiriens und Kazachstans nach Zentralasien einfließen.

Nordwestliche Kaltlufteinbrüche (Typ 6, vgl. Abb. 37) rufen gewöhnlich schnell eine Wetterverschlechterung hervor. Es kühlt sich stark ab, Wolken bilden sich, und im Falle relativ feuchter Luftmassen aus gemäßigten Breiten setzt in Verbindung mit stürmischen Winden vielfach eine bedeutende Niederschlagstätigkeit, oft als Schneegestöber, ein. In einzelnen Fällen, wenn der Einfall der Kaltluftmassen nicht dynamisch genug verläuft, können Niederschläge fehlen. Letzteres ist vor allem bei sommerlichen Kaltlufteinbrüchen der Fall, wenn Bewölkung und Niederschläge in den östlichen Gebirgsbereichen Zentralasiens zwar einen bedeutenden Umfang erreichen, der Durchzug der Kaltfront über den tiefländischen Bereichen aber oft bei wolkenlosem Himmel erfolgt und nur von starken Winden oder Staubstürmen begleitet wird. Erhalten

die tiefländischen Bereiche beim Durchzug der Kaltfront nordwestlicher Kaltlufteinbrüche nicht immer Niederschläge, so kommt es in diesen Fällen auf Grund des orographischen Effekts in den Gebirgs- und Vorgebirgsbereichen fast immer zu bedeutenden Niederschlägen.

Nördliche Kaltlufteinbrüche (Typ 5, vgl. Abb. 37) sind weniger stetig als nordwestliche und bringen den tiefländischen Bereichen auch nicht immer Niederschläge. Sie sind auch nach der Menge unbedeutender. Größere Niederschlagsmengen fallen bei nördlichen Kaltlufteinbrüchen im Grunde nur in den Gebirgsbereichen und hier vor allem im Sommer in Form von Gewittergüssen. Hervorzuheben sind der Džungarskij Alatau und der Tjan'-Šan', insbesondere seine nördlichen Ketten (Kirgizskij-Kette, Zailijskij Alatau), in denen es bei sommerlichen nördlichen Kaltlufteinbrüchen häufig zu starken Regengüssen kommt. Nicht zuletzt auf Grund dieser Kaltlufteinbrüche heben sich diese Gebirgsbereiche Zentralasiens als „Sommerregengebiete“ von den übrigen Bereichen ab.

Am häufigsten treten nördliche Kaltlufteinbrüche im Hochsommer auf (Juli - 15,2 %; August 15,4 %), daneben aber auch in den Übergangsjahreszeiten (vgl. Abb. 37). Nordwestliche Kaltlufteinbrüche treten in den Sommermonaten (Juni - 31,2 %; Juli - 22,3 %) sowie in den Übergangsjahreszeiten (etwa 20 % der Fälle) am stärksten auf. Nordwestliche Kaltlufteinfälle gehören zu den am häufigsten beobachteten atmosphärischen Prozessen in Zentralasien. Zu über 19 % bestimmen sie das Wetter in Zentralasien. Zusammen mit den nördlichen wurden Kaltlufteinbrüche an fast 30 % der Beobachtungstermine registriert.

4.2.3 Westliche Luftströmungen

Gleichfalls auf die warme Jahreshälfte konzentriert sind die für den Witterungsverlauf in Zentralasien bedeutsamen westlichen Luftströmungen (Typ 4, vgl. Abb. 37). Bei ihnen dringt Luft gemäßigter Breiten, seltener arktische Luft, von Westen über den Kaukasus und das Kaspische Meer nach Zentralasien vor. Im Sommer erzeugen westliche Luftströmungen gewöhnlich eine Abkühlung des vorherrschenden heißen und schwülen Wetters und bringen kräftige Winde und Stabstürme mit sich. In der kalten Jahreszeit sind westliche Luftströmungen nur von geringem Temperaturabfall, aber fast immer mit Niederschlägen begleitet.

Über diese allgemeinen Kennzeichen hinaus ergibt sich auch bei diesen Wetterlagentypen hinsichtlich des thermischen und hygrischen Effekts zwischen Gebirgs- und Tieflandbereichen ein wesentlicher Unterschied. Während westliche Luftströmungen in den westexponierten Vorgebirgsbereichen Zentralasiens oft und in

den Gebirgsbereichen nahezu immer Niederschläge verursachen, fallen im Tiefland nicht bei jeder westlichen Luftströmung Niederschläge.

Westliche Luftmassen treten am häufigsten im Spätfrühjahr und Hochsommer auf, wenn durchschnittlich 6-10 Tage in den Monaten Mai - August durch diese Wetterlage gekennzeichnet sind (vgl. Abb. 37; Mai 27,1 %, Juni 32,9 %, Juli 29,5 %, August 20,5 %). Westliche Luftströmungen im Winter sind selten, sie treten in den Wintermonaten im allgemeinen nicht mehr als an 3 Tagen auf.

4.2.4 Durchzug südlicher Zyklonen

Neben den bisher genannten atmosphärischen Prozessen und Zuständen sind noch die besonders wetterwirksamen Zyklonen hervorzuheben, die Zentralasien auf SW-NO-Bahnen durchziehen (knapp 15 % der jährlichen Wetterlagen, vgl. Abb. 37 und 38). Unter ihnen treten am häufigsten die Südkaspi-Zyklone (27 %), die Amu-darja-Zyklone (11 %) und die Murgab-Zyklone (20 %) auf. Viele von Süden auf das Territorium Zentralasiens eintretende Zyklonen okkludieren und erlöschen im Gebirge des Pamir-Alaj, des Tjan'-Šan' und des Altaj, so dass nur ein Teil der im Süden Mittelasiens erscheinenden Zyklonen weiter nach Nordosten in das kazachstanische und westsibirische Gebiet vorstößt, wo sie sich dann auflösen.

a) Südkaspi-Zyklonen

Als Südkaspi-Zyklonen (Typ 11, vgl. Abb. 42) bezeichnet man einen atmosphärischen Zustand, bei dem die Zyklonen über dem südlichen Teil des Kaspischen Meeres oder ein wenig östlicher erscheinen und im Verlauf von 1,5 - 2 Tagen Zentralasien in nördlicher Richtung durchkreuzen (Zugbahn: östliches Mittelmeer - unterer Jenissej).

Die Südkaspi-Zyklone besitzt bei ihrem Erscheinen in Zentralasien immer einen Warmsektor, der aus tropischen Luftmassen mit niedriger relativer Feuchte gebildet ist. Zwar ist das Passieren der Warmfront der Zyklone über den tiefländischen Bereichen Zentralasiens von Bewölkung der oberen und mittleren Luftschichten begleitet, nur selten jedoch von Niederschlägen. Bei Annäherung des Warmsektors der Zyklone an das Gebirge verdichtet sich die Bewölkung und es erscheinen hohe Schicht- und Schichtregenwolken über Tadschikistan und dem südlichen Uzbekistan. Diese Gebirgs- und Vorgebirgsbereiche erhalten nachfolgend auch Niederschläge.

Der Durchzug der Kaltfront der Zyklone wird ebenfalls von Niederschlägen begleitet. Starke Niederschläge entwickeln sich beim Durchzug von Südkaspi-Zyklonen mit nachfolgender Regeneration an einer Kaltfront.

Schnelle Erwärmung im Winter und frühjährliche Hochwasserbildung in den Flüssen des südlichen Zentralasien sind im Zusammenhang mit dem Einbruch der Südkaspi-Zyklonen zu sehen. Sie sind neben den Murgab-Zyklonen vor allem die Ursache der

Konzentration der Niederschläge in den westlichen und südwestlichen Bereichen Zentralasiens in den Monaten Dezember bis April mit dem Maximum im März. Der Einbruch von Südkaspi-Zyklonen tritt am häufigsten in den Wintermonaten auf, insbesondere im Januar und Februar (13,1 % bzw. 14,2 %), daneben aber auch in den Frühjahrsmonaten März, April und Mai (10,9 %). Im Sommer kommen sie nur in seltenen Fällen vor.

b) Murgab-Zyklonen

Murgab-Zyklonen entstehen über dem Iran oder über dem Irak, treten von dort nach Überschreiten der Turkestanisch-Chorasanischen Berge in das Tedžen- und Murgabtal ein und bewegen sich in nordöstlicher Richtung weiter. Wie die Südkaspi-Zyklone wird die Murgab-Zyklone fast ausschließlich im kalten Halbjahr beobachtet. Am häufigsten tritt sie im Dezember - März auf, kommt jedoch im Gegensatz zur Südkaspi-Zyklone im Frühjahr nur noch selten vor und fehlt in den Sommer- und Herbstmonaten fast ganz.

Wie die Südkaspi-Zyklone besitzt die Murgab-Zyklone bei ihrem Erscheinen über dem Murgabtal einen Warmluftsektor, der aus Luftmassen tropischen Ursprungs besteht. In der Folge des Passierens des Warmluftsektors und der Warmfront der Murgab-Zyklone tritt eine starke Temperaturerhöhung ein, die im allgemeinen zu intensiver Schneeschmelze sowohl in den tiefländischen Bereichen als auch im Gebirge führt. Zusammen mit den beim Durchzug der Zyklone entstehenden Niederschlägen kommt es infolge der anfallenden Schmelzwässer in vielen Flüssen (vor allem in solchen mit Schnee- und Regenernährung) zu einer Abflussspitze. Der Anstieg der mittleren Tagestemperaturen kann 11°-12 °C betragen. Bewölkung tritt nur in den oberen Luftschichten ein. Je weiter die Warmfront der Zyklone nach Nordosten und in Gebirgsbereiche vordringt, desto stärker wird die Bewölkung, und es treten örtliche Niederschläge ein. Bei geringer spezifischer Feuchte der tropischen Luft im Warmsektor der Zyklone fallen in den tiefländischen Bereichen keine Niederschläge. Diese kann man lediglich in den Gebirgsbereichen beobachten, aber auch hier nicht immer. Bei großer spezifischer Feuchte der tropischen Luft des Warmluftsektors treten im Gebirge Niederschläge stärker in Erscheinung, im Tiefland dagegen weniger. Insgesamt ist die mit dem Warmluftsektor der Murgab-Zyklone verbundene Niederschlagsmenge gering. Das ändert sich aber mit dem Auftreten der Kaltfront der Zyklone.

Bereits über den Ebenen Südturkmenistans tritt an der Kaltfront der Murgab-Zyklone Bewölkung auf; dort setzt gewöhnlich auch schon der Niederschlag ein. Je mehr sich die Kaltfront dem Gebirge nähert, um so stärker wird der Niederschlagsfall. Die Niederschlagsmenge kann bei Vorhandensein hinreichend feuchter tropischer Luft bedeutende Ausmaße annehmen (bis zu 10-12 mm). Mit dem Beginn der Okklusion der Zyklone verstärken sich die Niederschläge, lassen im weiteren dann aber sehr schnell nach. Über den Tieflandbereichen des südlichen und südöstlichen Kazachstan fallen kaum noch Niederschläge. Unter anderen ist das vorzeitige Okkludieren der

Zyklone als Grund dafür anzuführen, dass in diesen Gebieten, insbesondere im Ili-Balchaš-Becken, die Konzentration der Niederschläge gegenüber den westlich und südwestlich anschließenden Bereichen Zentralasiens nicht so sehr in den Wintermonaten und in der ersten Frühjahrshälfte stattfindet, sondern sich mehr auf die zweite Frühjahrshälfte und den Sommeranfang verlagert. Beinahe immer erhalten das östliche Pamirhochland und der Altaj Niederschläge. Niederschläge treten vor allem in den Gebirgsrandbereichen auf, weniger im Innern der Gebirge. Das Vorhandensein einer zweiten Kaltfront an der Rückseite der Zyklone bewirkt gleichfalls verstärkten Niederschlagsbefall.

c) Amu-darja-Zyklonen

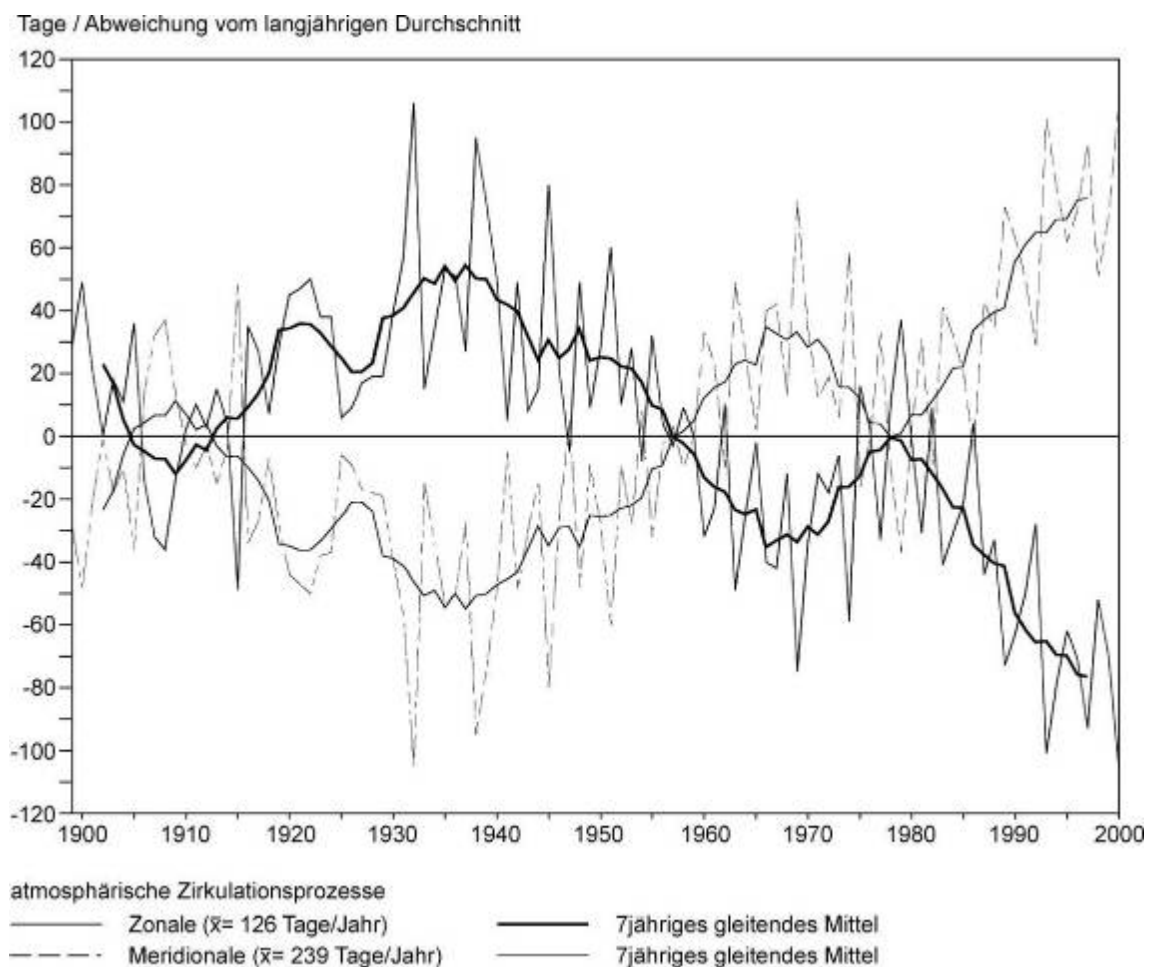
Als obere Amu-darja-Zyklonen (Typ 9, vgl. Abb. 37) bezeichnet man solche Zyklonen, die aus dem Südwesten des Iran oder Pakistan kommend sich über den Hindukusch langsam und träge nach Norden oder Nordosten vorschieben und schließlich über Tadžikistan erscheinen. Mit ihrem Auftreten sind in ganz Tadžikistan Bewölkung und langanhaltende Niederschläge verbunden, während im übrigen Zentralasien trockenes, klares und wolkenloses Wetter herrscht. Vor allem sind es die Gebirgs- und Gebirgsrandbereiche Tadžikistans unter Einschluss des Ferganabeckens und des Pamirhochlandes, die beim Auftreten der oberen Amu-darja-Zyklone Niederschläge erhalten. Ein Vorstoß der Zyklone über die Zentralasien im Südosten berandenden Gebirgsbarrieren findet im allgemeinen nicht statt. Im Durchschnitt erscheinen Amu-darja-Zyklonen sehr selten über Zentralasien (Vgl. Abb. 37) und dann im allgemeinen nur in der winterlichen Zeit (Dezember - Mai), wo sie im Durchschnitt an 1-2 Tagen im Monat vorkommen.

Die zusammenfassende These lautet: Sollte eine erkennbare trendhafte Veränderung der Niederschlagstätigkeit eingetreten sein, müsste diese in einer entsprechenden Veränderung der atmosphärischen Zirkulationsprozesse bemerkbar sein.

Der kurze Überblick über die Niederschlagswirksamkeit atmosphärischer Prozesse in Zentralasien beruht auf Arbeiten von V. A. Bugaev, B. A. Džordžio, E. M. Kozik, M. A. Petrosjanic, A. JA. Pšenišnyj, N. N. Romanov und O. N. Cernyševa, die ihre Untersuchungsergebnisse in einer umfangreichen Monographie (Hrsg. V. A. Bugaev 1957) und einem zugehörigen synoptischen Atlas (Hrsg. V. A. Bugaev 1954) zusammengefasst haben. Nachfolgend wurden weitere Klassifikationen atmosphärischer Zirkulationsprozesse vorgenommen, wobei sich diese auf die gesamte Nordhalbkugel (tropische Zone ausgeschlossen) beziehen. Eine im russischen Sprachbereich anerkannte Klassifikation stammt von B. L. Dzerdzeevskij (1975). Er unterscheidet 41 elementare Zirkulationsprozesse. Nach dieser Methodik werden in der Abteilung für Klimatologie des Instituts für Geographie der Russischen

Akademie der Wissenschaften in Moskau alle Zirkulationsprozesse der nördlichen außertropischen Hemisphäre nach dem Zeitpunkt und der Dauer ihres Auftretens aufgezeichnet. Rückwirkend wurde zudem auf der Basis vorliegender synoptischer Karten ein Kalender erarbeitet, der Auskunft über das Auftreten der Zirkulationsprozesse seit 1899 ermittelt, so dass lange Zeitreihen über den Zeitpunkt und die Dauer des Auftretens der 41 Zirkulationsprozesse erstellt werden können (vgl. Tursunov, Achmetova 2002).

Abb. 39: Jährliches Auftreten zonal und meridonal ausgerichteter atmosphärischer Zirkulationsprozesse auf der Nordhalbkugel



Quelle: Tursunov, Achmetova 2002, S. 17; ergänzt.

Teilt man die 41 Zirkulationsprozesse in meridional und zonal ausgerichtete Prozesse ein und stellt danach in zwei Zeitreihen die Häufigkeit ihres jährlichen Auftretens (nach Tagen) von 1899 - 2000 dar (vgl. Abb. 39), dann lassen sich daraus aufschlussreiche Informationen gewinnen (vgl. Tursunov, Tursunov 2003). Einmal lassen sich den

Kurvenverläufen mit den Wendepunkten jene Zeitpunkte entnehmen, in denen eine längerfristige Änderung des Witterungsgeschehens eingetreten sein muss. Es handelt sich nach Abbildung 39 um die Jahre 1907, 1934 und 1969. Diese Wendepunkte der Entwicklung traten bei den durchgeführten Zeitreihenanalysen immer wieder in Erscheinung und finden somit ihre Bestätigung. Zum anderen fällt auf, dass die Kurven sich Ende der 70er Jahre anders als im Jahre 1957 nicht mehr kreuzen, sondern auseinanderdriften. Meridionale Zirkulationsprozesse nehmen seither sukzessive zu, zonale dagegen ab. Das bedeutet, dass anstatt des weiterhin erwarteten Temperaturanstiegs seit Anfang der 80er Jahre auf der Nordhalbkugel eine Abkühlung eingetreten sein muss. Da die bis zum Jahre 2000 dargestellte Entwicklung keinen Hinweis auf einen Wendepunkt gibt, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Prozess in den folgenden Jahren so weiterlaufen wird.

Im vorliegenden Zusammenhang ist die Entwicklung solcher Zirkulationsprozesse von Interesse, die mit einer Zyklonalentwicklung und Niederschlagstätigkeit verbunden sind, beispielsweise meridional ausgerichtete Zirkulationsprozesse, die feuchte und warme Luftmassen tropischen Ursprungs nach Norden in arktische Gebiete transportieren und in Eurasien zur Niederschlagsbildung führen. Die winterliche Ausprägung dieses Zirkulationstyps, nach der Klassifikation von Dzerdzeevskij Typ 13z, hat seit 1952, insbesondere seit 1978 erheblich an Einfluss auf das Witterungsgeschehen der Nordhemisphäre gewonnen. Registrierte man diesen Witterungstyp in den 50er Jahren an etwa 20 Tagen im Jahr, so in den 90er Jahren bereits an über 60 Tagen im Jahr (vgl. Tursunov, Achmetova 2002; Tursunov, Tursunov 2003, S. 6).

Bislang hat man die Wetterwirksamkeit atmosphärischer Zirkulationsprozesse großräumig betrachtet. Welche Auswirkungen die festgestellten Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationsprozesse auf der Nordhalbkugel auf Zentralasien haben, wurde bislang nicht untersucht, so dass ungeklärt ist, warum zum Beispiel die jährlichen Niederschlagsmengen in den Sommerregengebieten der zentralen Gebirgsbereiche des Tjan'-Šan' seit Ende der 60er Jahre / Anfang der 70er Jahre sukzessive abnehmen. Wenn das Witterungsgeschehen auf der Nordhalbkugel seit Ende der 70er Jahre in zunehmendem Maße durch meridional ausgerichtete Zirkulationsprozesse, insbesondere südlichen Ursprungs beeinflusst wird, müsste diese Entwicklung in Zentralasien in einer zunehmenden Niederschlagstätigkeit zum Ausdruck kommen. Dem ist offensichtlich so, dass bezüglich der ursächlichen Wirkungszusammenhänge viele Fragen offen bleiben und einer Bearbeitung harren.

Tursunov (2003b) hat das Abflussverhalten linksseitiger Ili-Zuflüsse untersucht und dieses in Beziehung gesetzt zu den Zirkulationsprozessen nach Dzerdzeevskij, die den Zustrom feuchter Luftmassen in den Südosten Kazachstans bewirken. Für den Ili-

Zufluss wurden die jährlichen Abflussmengen der Flüsse Karkara, Šilik, Šaryn, Turgen', Narynkol, Bajankal und Malaja Almatinka für den Zeitraum von 1946 bis 2000 ermittelt und zusammengefasst. Diesen Daten wurde die Dauer (Zahl der Tage pro Jahr) des Auftretens adäquater atmosphärischer Zirkulationsprozesse nach Dzerdzeevskij gegenübergestellt, wobei mit drei verschiedenen Varianten der Zusammenstellung gerechnet wurde.

Die dargestellten Kurvenverläufe zeigen eine weitgehende Übereinstimmung, wobei auffällt, dass die Dauer des Auftretens der ausgewählten Zirkulationstypen seit Anfang der 80er Jahre und die jährlichen Abflussmengen der linksseitigen Ili-Zuflüsse seit 1987 deutlich zugenommen haben. Die Zunahme der Abflussmengen setzt also mit einem time-lag von drei bis fünf Jahren gegenüber dem verstärkten Zustrom feuchter Luftmassen ein.

Durchgeführte Korrelationsanalysen ergaben bei der ersten Variante (16 zugrunde gelegte Zirkulationstypen) mit $r = 0,78$, bei einem time-lag von drei und vier Jahren das beste Ergebnis. Bei der zweiten Variante (16 alternativ zusammengestellte Zirkulationstypen) wurde bei einem time-lag von einem Jahr mit $r = 0,65$ das beste Ergebnis erzielt. Die verstärkte Abflussbildung der linksseitigen Ili-Zuflüsse seit 1987 lässt sich also in erheblichem Umfang auf eine Veränderung des Witterungsgeschehens zurückführen.

5 Zusammenfassung

- Zyklische Schwankungen der Jahresmitteltemperaturen ohne regelhafte Periodizität bis Anfang der 1970er Jahre:

Die tiefpassgefilterten Zeitreihen der Jahresmitteltemperaturen (7jährige gleitende Mittelwerte) weisen auf eine langfristige zyklische Schwankung der Temperaturwerte hin (vgl. Abb. 9-12 sowie die Zusammenschau in Abb. 13). Dieses gilt zumindest für die Entwicklung bis Anfang der 1970er Jahre. Warm- und Kaltphasen verlaufen dabei zwischen den Stationen synchron. Eine Regelmäßigkeit bezüglich der Länge der Zyklen konnte jedoch nicht festgestellt werden. Durchgeführte Fourieranalysen lieferten lediglich schwache Hinweise auf eine Periodenlänge von 20-24 Jahren.

Ein Zusammenhang zu den 11- bzw. 22-jährigen Zyklen der Solarstrahlung, gemessen anhand der Sonnenflecken-Relativzahlen nach Wolf, besteht nicht.

Die Zyklizität der Entwicklung wird im wesentlichen durch den Temperaturverlauf in der kalten Jahreszeit hervorgerufen, weniger durch Temperaturschwankungen in der warmen Jahreszeit verursacht.

- Zunahme der Jahresmitteltemperaturen seit Anfang der 1970er Jahre:

Seit Anfang der 1930er, spätestens seit Anfang der 1950er Jahre ist ein allgemeiner längerfristiger Anstieg der Jahresmitteltemperaturen festzustellen. Dieser ist zunächst als Teil eines regelhaft wiederkehrenden Anstiegs zu interpretieren. Der Anfang der 70er Jahre erneut einsetzende Anstieg der Jahresmitteltemperaturen hebt sich von der vorherigen Entwicklung aber ab, als jetzt bei allen Klimastationen, für die hinreichend lange Zeitreihen vorliegen, die bisherigen Temperaturspitzen der zyklischen Schwankungen dauerhaft überschritten werden (vgl. Abb. 14-17). In Kazalinsk überschreiten die tiefpassgefilterten Temperaturwerte die langjährige Schwankungsbreite zum aktuellen Beobachtungszeitpunkt um + 0,32°C, in Taškent um + 0,68°C, Karakol um + 0,23 (bis 1996) und Naryn um + 0,58 °C.

Die systematische Abweichung (Erwärmung) von der langjährigen Entwicklung ist somit spätestens seit Anfang der 1970er Jahre eindeutig feststellbar. Der Befund der zunehmenden Gletscherschmelze und des verstärkten Wasserabflusses (vgl. Abb. 2-4) bestätigt diese Aussage. Da mit dem Abschmelzprozess eine zeitliche Verzögerung einhergeht, kann davon ausgegangen werden, dass die Erwärmungsphase bereits früher eingesetzt hat. Die 30jährigen gleitenden Mittelwerte (vgl. Abb. 20) deuten bereits Anfang der 1950er Jahre auf einen Anstieg hin, der offenbar über die langjährigen Schwankungen hinausgeht.

Die Erwärmung des Klimas hat sich in Zentralasien sehr viel intensiver als im globalen Mittel vollzogen. Nach den Daten des Intergovernmental Panel on Climate Change wird die Zunahme der Globaltemperatur für den Zeitraum von 1950 - 2000

auf $+0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ geschätzt. Für Zentralasien ergibt sich dagegen für den gleichen Zeitraum ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen von $+1,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Erwärmung des Klimas im Innern des asiatischen Kontinents fällt somit 3-4mal stärker aus als im globalen Mittel.

- Hinweise auf eine trendhafte Erwärmung in Schüben:

Eine Zeitreihe kann in drei Komponenten zerlegt werden: eine trendhafte, eine zyklische und eine unbestimmte Restkomponente. Das Zusammenspiel dieser drei Komponenten ist im Fall der festgestellten Erwärmung in Zentralasien sehr komplex, da die jährlichen Fluktuationen sehr groß sind und die zyklische Komponente keine konstante Periodenlänge aufweist.

Der Trend einer Zeitreihe wird in der Regel über eine Regressionsanalyse ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass dabei die Wahl der Zeitpunkte, an denen die Regressionsanalysen ansetzen, den Trendwert erheblich beeinflusst. Zum Teil werden unsinnige Ergebnisse erzeugt. Eine Fortschreibung der Trends ohne Berücksichtigung der zyklischen Schwankung ist äußerst fragwürdig, da es keinen Hinweis darauf gibt, weshalb der Trend die bisherigen zyklischen Schwankungen ersetzen sollte. Auch sind die Korrelationskoeffizienten der Trendberechnungen auf Grund der starken Fluktuationen sehr niedrig. Um die festgestellte Erwärmung dennoch quantifizieren zu können, sind die linearen Regressionskoeffizienten für verschiedene Zeitschnitte berechnet worden (vgl. Tab. 4-6). Geht man einen Schritt weiter und berechnet man für variable Anfangsjahre systematisch sämtliche Regressionskoeffizienten zu einem festen Endjahr (vgl. Abb. 21 und Abb. 22), so wird unabhängig vom gewählten Anfangsjahr der Trendberechnung deutlich, dass sich eine Erwärmung in mehreren Schüben vollzogen hat (vgl. Abb. 23 und Abb. 24). Drei Schübe sind auszumachen: ab Anfang der 30er, der 50er und 70er Jahre. Der stärkste Anstieg ist Anfang der 70er Jahre erfolgt. Bezogen auf 100 Jahre bewegen sich die berechneten linearen Trendkoeffizienten zwischen $3,1$ und $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Abnahme der Erwärmung mit der Höhenlage:

Mit der Höhe nehmen die Trendkoeffizienten ab. In einer Höhenlage von etwa 2.700m erreichen sie die 0°C -Grenze und wechseln oberhalb dieser Grenze von positiven in negative Werte. Die höchsten Temperaturanstiege sind in den tiefländischen Becken- und Vorgebirgsbereichen ermittelt worden.

- Erwärmung vor allem in der kalten Jahreszeit:

Die Analyse der Monatsmitteltemperaturen zeigt, dass die Erwärmung des Klimas in Zentralasien vor allem auf eine Erhöhung der Lufttemperatur in der kalten Jahreszeit zurückzuführen ist. Diese Entwicklung ist vor allem in den Monaten November und Dezember zu beobachten. Am deutlichsten tritt die winterliche Erwärmung in den tiefländischen Beckenlagen (Priaral) sowie den nördlichen Vorgebirgsbereichen des

Tjan'-Šan' zutage. Sie wird auf eine Abschwächung der Sibirischen Antizyklone zurückgeführt.

Auch in der warmen Jahreszeit ist ein Anstieg der Lufttemperaturen feststellbar, er ist aber deutlich schwächer ausgeprägt als in den Monaten November und Dezember. Auffällig ist der Temperaturanstieg im September. Er ist mit einer Verlängerung der Wärmeperiode und damit der Ablationszeit verbunden.

Im Unterschied zum Winter weisen die Frühjahrsmonate eine Tendenz zur Abkühlung auf. Dieses trifft vor allem auf den April zu. Eine Folge dieser Entwicklung besteht darin, dass sich die Frostperiode im Frühjahr ausgeweitet hat. Die Veränderung wird auf verstärkte Einbrüche kalter Fronten aus dem Norden und Nordwesten in der frühjährlichen Zeit zurückgeführt.

Eine generelle Verschiebung der Jahreszeiten konnte aus den Daten jedoch nicht ermittelt werden.

- Anthropogener Einfluss auf die Klimaerwärmung:

Die Tatsache, dass seit Anfang der 1970er Jahre in Zentralasien eine Klimaerwärmung bzw. ein verstärkter Wärmeschub eingesetzt hat, legt den Schluss nahe, dass dieser Prozess in einem Zusammenhang mit anthropogenen Einflüssen steht. Denn in den 1960er Jahren setzt eine exzessive Ausweitung des Bewässerungsfeldbaus ein. Sie führt allein im Becken des Aralsees zu einer Erweiterung der Bewässerungsflächen von 4,5 Mio. ha (1960) auf 8 Mio. ha (2000) (vgl. Abb. 6). Damit verbunden ist ein enormer Anstieg des Wasserverbrauchs – er wird in dieser Zeit fast verdoppelt –, so dass den abflusslosen Endseen (Aralsee, etc.) kaum noch Wasser zufließt und sie verlanden (vgl. Giese, Bahro, Betke 1998, S. 79 ff.). Auf diese Weise wurden große Sandflächen ehemaliger Seeböden freigelegt – am Aralsee alleine über 52.000 qkm –, die nun den Sand- und Staubstürmen ausgesetzt sind und zur Verwirbelung der zum Teil salzhaltigen Stäube und Sande in große Höhen beitragen. Nach Angaben von Tursunov und Tursunov (2003, S. 3.) sollen in der Zeit von 1970 bis 1990 allein vom Trockenboden des Aralsees und des Karabogaz-Gols (Bucht am Kaspischen Meer) ca. 2,8 Mrd. Tonnen Feinstaub und -salz (Sulfate und Chloride) in die Atmosphäre der Nordhalbkugel befördert worden sein. Da die Aerosole vom Boden des Aralsees sehr leicht sind, können sie in große Höhen verfrachtet und weit verbreitet werden, so dass sie einen Treibhauseffekt erzeugen. Tursunov (2002) vergleicht die Wirkung der Sand- und Staubstürme in Zentralasien mit dem Effekt von Vulkanausbrüchen. Dieses würde beinhalten, dass nach einer vorläufigen Erwärmungsphase eine Abkühlungsphase des Klimas einsetzen müsste. Diese sollte nach der Entwicklung zonal und meridional ausgerichteter atmosphärischer Zirkulationsprozesse auf der Nordhalbkugel (vgl. Abb. 39) bereits in den 80er Jahren eingesetzt haben. Das Innere der asiatischen Landmasse ist derweil aber von einer starken Erwärmung des Klimas betroffen. So bleiben viele Fragen offen.

- Entwicklung der Niederschlagsmengen räumlich unterschiedlich:
 So wie die Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen sich in einem unregelmäßigen Rhythmus von Auf- und Abschwüngen vollzieht, trifft dieses auch für die langfristige Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen zu. Ein synchroner Verlauf der geglätteten Kurvenabläufe wie bei den Jahresmittelwerten der Lufttemperatur ist hierbei insgesamt nicht erkennbar. Für Klimastationen, die sich auf Grund ihrer Lage und Exposition ähneln, sind jedoch ähnliche Entwicklungen feststellbar. Das gilt für die Klimastationen der nördlichen Gebirgs- und Vorgebirgsbereiche des Tjan'-Šan' sowie für die Klimastationen der zentralen Bereiche des Tjan'-Šan'. Sie weisen weitgehend synchrone Entwicklungsabläufe auf (vgl. Abb. 34).
 Eine trendhafte Zu- bzw. Abnahme der jährlichen Niederschlagsmengen, wie es verschiedene Autoren für die jüngere Vergangenheit glauben nachweisen zu können, ist generell nicht belegbar.
 Für einzelne Klimastationen lässt sich allerdings eine trendhafte Veränderung der Niederschlagstätigkeit ausmachen. So ist für Kazalinsk (tiefländischer zentraler Beckenbereich) seit 1950 ein trendhafter Rückgang der jährlichen Niederschlagsmengen feststellbar, ebenso für die Klimastationen der zentralen Bereiche des Tjan'-Šan' (Suusamyr, Tjan'-Šan', Naryn) (vgl. Abb. 29 und 36).

Abschließend sei auf den korrespondierenden Kurvenverlauf der Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen und jährlichen Niederschlagsmengen hingewiesen, so wie er den Abbildungen 40 und 41 zu entnehmen ist. Die langfristige Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen und Jahressummen der Niederschläge scheint sich in einer gegenläufigen Korrespondenz zu vollziehen. Von Rybski für die beiden Klimastationen Taškent und Karakol (vgl. Abb. 40, 41) durchgeführte Synchronisationsanalysen bestätigen die Annahme, so dass dem Phänomen der gegenläufigen Korrespondenz der Kurvenverläufe der Jahresmitteltemperaturen und jährlichen Niederschlagsmengen weiter nachgegangen werden soll.

Abb. 40: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen und der Jahresmitteltemperaturen der Station Taškent 1882-1998

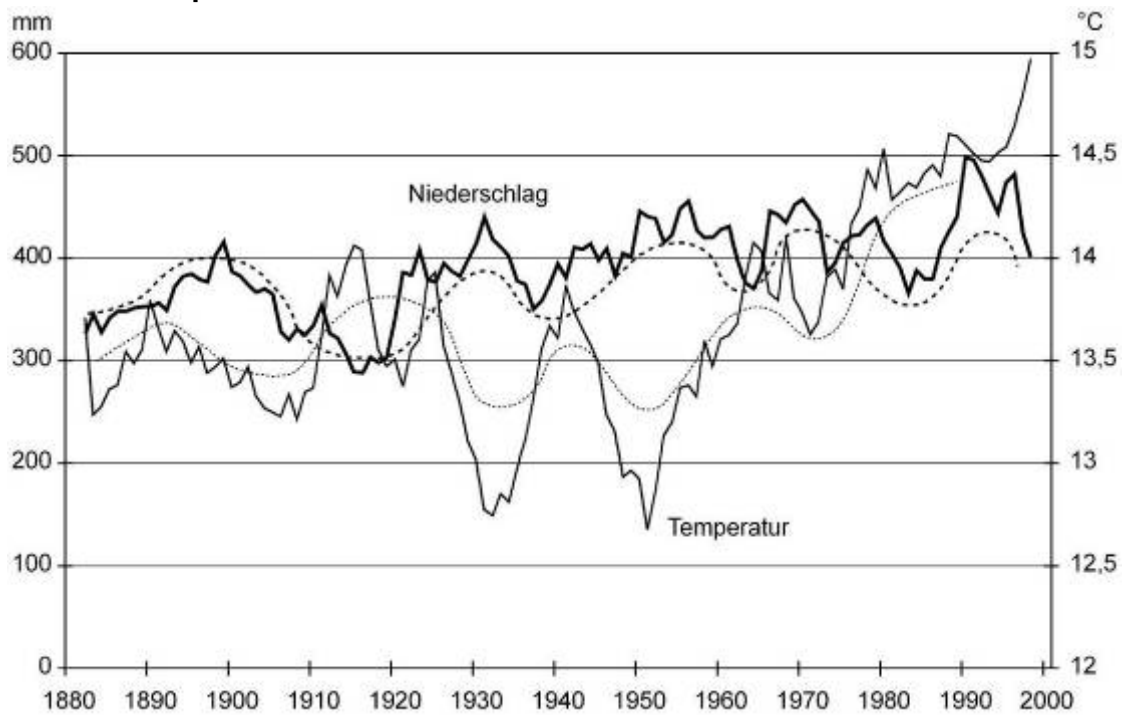
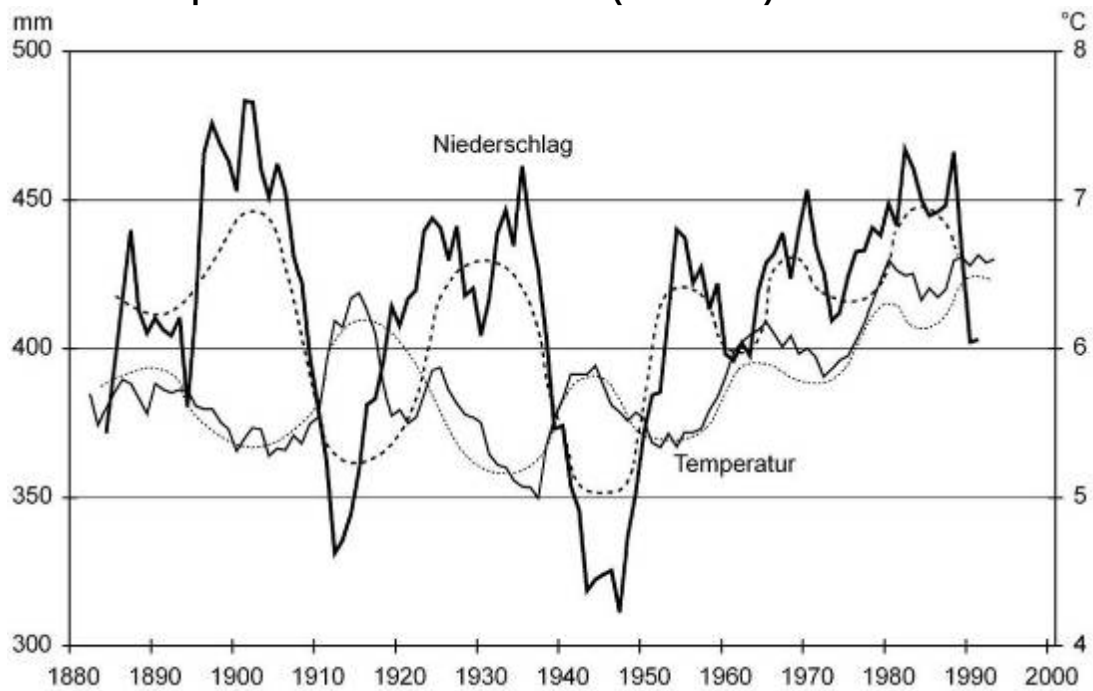


Abb. 41: Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen und der Jahresmitteltemperaturen der Station Karakol (Prževal'sk) 1883-1993



6 Literaturverzeichnis

- Aizen, V.: Aizen, E.; Melack, J. M. and Dozier, J. (1997): Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia. In: Journal of Climate, Vol. 10(6), 1997, pp. 1393-1404.
- Braun, L. N. (1999): The distribution of high alpine glaciation and its impact on water resources. In: Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Band 65, Bayreuth, S. 79-95
- Bugaev, V. A. (1954) (Hrsg.): Atlas tipichnykh sinopticeskich processov Srednej Azii. Taškent 1954.
- Bugaev, V. A. (1957) (Hrsg.): Sinopticeskie processy Srednej Azii. Taškent 1957.
- Celpanova, O. M. (1963): Klimat SSSR, vyp. 3, Srednjaja Azija Leningrad 1963
- Dikich, A. N. (2002): Sovremennoe oledenenie Issyk-Kul'skoj kotloviny: režim i balansovoe sostojanie. (Unveröffentlichtes Manuskript; Forschungsbericht VW-Projekt AZ: II/76927, Teil II) Biškek 2002
- Dikich, A. N. (2002): Lednikovyj stok rek Issyk-Kul'skoj kotloviny. (Unveröffentlichtes Manuskript; Forschungsbericht VW-Projekt AZ: II/76927, Teil III) Biškek 2002
- Diskyn M. N. (1970): On the computer evaluation of Thiessen weights. In: Journal of Hydrology, 11, 1970, 69 - 78.
- Finaev, A. (1999): Climatic changes in the mountain galcier area of Pamir. In: Ice Physics and the Natural Environment, ed. by J. S. Wettlaufer, J. G. Dash and N. Untersteiner. NATO ASI Series: Vol. 156, 1999, pp. 289-295.
- Fiziko-geograficeskij Atlas Mira. Moskva 1964
- Giese, E. (1981): Wetterwirksamkeit atmosphärischer Zustände und Prozesse in Mitelasien. In: Westfälische Geographische Studien, Band 37, Münster 1981, S. 395 - 409.
- Giese, E.; Bahro, G.; Betke, D. (1998): Umweltzerstörungen in Trockengebieten Zentralasiens (West- und Ost-Turkestan). Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. Erdkundliches Wissen, Heft 125, Stuttgart 1998, 189 S.
- Glazirin, G. E. (1997): Calculation of glacierization response of Soviet Central Asia to potential climate changes. In: 34 Selected Papers on Main Ideas of the Soviet Glaciology, 1940s - 1980, ed. by V. M. Kotlyakov. Glaciological Association, Moscow, 1997, pp. 382 - 387.
- Glazirin, G. E., Braun, L. N. and Shchetinnikov, A. S. (2002): Sensitivity of mountain glacierization to climatic changes in Central Asia. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 38, Heft 1, 2003, S. 71-76.

- Gleick, P. H. (1993): Water crisis guide to the world's fresh water resources. New York, Oxford 1993
- Hagg, W. (2003): Auswirkungen von Gletscherschwund auf die Wasserspende hochalpiner Gebiete, Vergleich Alpen-Zentralasien. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München, München 2003
- Konovalov, V. G. (2002): Formation and utilization of the Pamirs rivers flow. In: Data of Glaciological Studies, Vol. 92, 2002, pp. 158 - 163.
- Kuz'micenok, V. A. (2002): Matematiko - kartograficeskoe modelirovanie vozmožnych izmenenij vodnych resursov i oledeneniya Kyrgyzstana pri prognozirovannyh izmenenijach klimata. (Unveröffentlichtes Manuskript; Kyrgyzskaja Nacional'naja Akademija Nauk. Institut Vodnych Problem i Gidroénergetiki, Biškek 2002.)
- Mamatkanov, D. M.; Dikich, A. N.; Romanovskij, V. V.; Sujunbaev, M. N.; Šambetov, Z. S. (1997): Sovremennye tendencii temperatury vozducha i reakcija na nich razlicnyh vidov vodnych resursov Issyk-Kul'skoj kotloviny. In: Izvestija Nacional'noi Akademii Nauk Kyrgyzskoj Respubliki, Nr. 2 - 3, 1997, S. 96 - 101.
- Micklin, Ph. P.; Williams, W. D. (eds) (1996): The Aral Sea Basin. Berlin, Heidelberg, New York 1996
- Ressl, R.; Deck, S. W. (1996): Aufbau eines fernerkundungsbasierten Geographischen Informationssystems. In: DLR-Nachrichten, Heft 82, 1996, S. 32 - 37
- Romanovskij, V. V. (2002): Sovremennye izmeneniya klimata na Tjan'-Šane. Kyrgyzskaja Nacional'naja Akademija Nauk. Institut Vodnych Problem i Gidroénergetiki, Biškek 2002.
- Rybski, D.; Havlin, Sh.; Bunde, A. (2003): Phase synchronization in temperature and precipitation records. In: Physica A 320 (2003), S. 601 - 610.
- Tursunov, A. A. (2002): Ot Arala do Lobnura: Gidrologija besstocnyh bassejnov Centralnoj Azii, Almaty 2002, 383 S.
- Tursunov, A. A.; Achmetova, G. S. (2002): Tipizacija cirkul'jacionnyh processov v atmosfery po B. L. Dzerdzeevskomu i ich ispal'zovanij v gidrologiceskich rascehtach stoka reki Ili (Unveröffentlichtes Manuskript; Forschungsbericht VW-Projekt AZ: II/76 927), Almaty 2002
- Tursunov, A. A.; Tursunov, Ajs. (2003): Vlijanie usychajuščego Aral'skogo Morja na global'nye izmeneniya klimata (Unveröffentlichtes Manuskript; Forschungsbericht VW-Projekt AZ: II/76 927), Almaty 2003
- Tursunov, Ajs. (2003): Opyt sravnenija stoka vody levoberežnyh pritokov r.Ili i cirkuljacii atmosfery po B. L. Dzerdzeevskomu. (Unveröffentlichtes Manuskript; Forschungsbericht VW-Projekt AZ: II/76 927), Almaty 2003

Wang, R.; Giese, E.; Gao, Q. (2003): Seespiegelschwankungen des Bosten-Sees (VR China). Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung (ZEU) der Justus-Liebig-Universität Gießen, Diskussionsbeiträge, Nr. 13, Gießen 2003.

Ward, R. C. (1975): Principles of Hydrology, McGraw Hill, 1975, 367 pp.

Abbildungen im Anhang

- 1 Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen der Station ...
 - 1.1 Kazalinsk
 - 1.2 Taškent
 - 1.3 Biškek
 - ...
 - 1.21 Sary-Taš
- 2 Entwicklung der Monatsmitteltemperaturen der Station ...
 - 2.1 Kazalinsk
 - 2.2 Taškent
 - 2.3 Biškek
 - ...
 - 2.21 Sary-Taš
- 3 Abweichung der durchschnittlichen Monatsmitteltemperaturen der Station Kazalinsk im Zeitabschnitt 1971 - 2000 zum Zeitabschnitt 1941 - 1970 in °C
 - 3.1 Kazalinsk
 - 3.2 Taškent
 - 3.3 Biškek
 - ...
 - 3.21 Sary-Taš
- 4 Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmengen der Station ...
 - 4.1 Kazalinsk
 - 4.2 Taškent
 - 4.3 Biškek
 - ...
 - 4.21 Sary-Taš
- 5 Jahreszeitliche Verteilung der monatlichen Niederschlagsmengen der Station Kazalinsk im Durchschnitt der Jahre 1970 - 2000, 68 m
 - 5.1 Kazalinsk
 - 5.2 Taškent
 - 5.3 Biškek
 - ...
 - 5.21 Sary-Taš
- 6 Entwicklung der monatlichen Niederschlagsmengen der Station Kazalinsk im 1882 - 2001, 68 m
 - 6.1 Kazalinsk
 - 6.2 Taškent
 - 6.3 Biškek
 - ...
 - 6.21 Sary-Taš