

Tobias Bolch

Rezenter Gletscherschwund und Klimawandel im nördlichen Tien Shan (Kasachstan/Kyrgyzstan)*

mit 8 Abbildungen, 1 Foto und 5 Tabellen

1 Einführung

Das Klima der Erde ist seit jeher natürlichen Schwankungen unterworfen. Mit dem Ende der Kleinen Eiszeit Mitte des 19. Jahrhunderts sind die Durchschnittstemperaturen der Erde jedoch vergleichsweise dramatisch angestiegen (IPCC 2001), was ein zunehmendes Abschmelzen der Gletscher zur Folge hat (HAEERLI & BENISTON 1998; MAISCH 2000). Dieser Trend hat sich Ende des letzten Jahrhunderts deutlich verstärkt und die Gletscherflächen verringerten sich stark (KÄÄB ET AL. 2002; KHROMOVA ET AL. 2003; PAUL ET AL. 2004). Wenn die jetzige Entwicklung ungehindert fortschreiten sollte, wird die Klimaänderung besonders in sensiblen Regionen der Erde, wie etwa in Hochgebirgen oder ariden Räumen, drastische Auswirkungen auf die Lebensbedingungen der dort wohnenden Bevölkerung haben. Die Menschen werden sich z.B. auf die Verknappung der Wasserressourcen oder das vermehrte Auftreten von gravitativen Massenbewegungen einstellen müssen (BENISTON 2003; HAEERLI 1999). Die Gletscher der Erde genießen bei der Untersuchung der Klimaänderung hohe Priorität: Zum einen ist in den Gletschern ein großer Teil der Süßwasserreserven gespeichert, zum anderen reagieren sie sensibel auf das Klima und stellen somit einen wichtigen Zeiger für die Erfassung der Klimaänderung dar (OERLEMANS 1994). Da die Vermessung von Gletschern auf der Erde sehr zeitintensiv und daher teuer und auch Luftbildbefliegungen zur Gletscherkartierung mit hohem Aufwand verbunden sind, werden in jüngster Zeit besonders Satellitendaten zur flächendeckenden Erfassung und Analyse von Gletschern eingesetzt (BISHOP ET AL. 1998; BOLCH 2004; KHALSA ET AL. 2004; PAUL ET AL. 2002). Ende der 1990er Jahre wurde das *GLIMS* (*Global Land Ice Measurements from Space*) Projekt initiiert, dessen Hauptziel es

*) Der Verfasser möchte sich besonders bei Prof. Michael Richter (Universität Erlangen-Nürnberg) und Prof. Manfred Buchroithner (TU Dresden) für die Betreuung der Promotion bedanken, in deren Rahmen diese Publikation entstanden ist. Ein weiterer Dank geht an die russischen, kasachischen und kirgisischen Wissenschaftler für die Diskussionen und die Unterstützung beim Feldaufenthalt; dies sind insbesondere Irina Shesterova und Alexander Kokarev, Alissa, Volodya und Lina Uvarov, Sergei Marchenko, Mikhail Maximov, Mikhail Zubakin, Oleg Li sowie Valentina Sankova. Für die finanzielle Unterstützung bei den Reisekosten sei dem DAAD und ganz besonders der Zantner-Busch-Stiftung der Universität Erlangen-Nürnberg herzlichst gedankt.

ist, unter Verwendung von Fernerkundungsdaten die Gletscheränderung weltweit zu beobachten (BISHOP ET AL. 2004).



Foto 1: Aksu-Gletscher im Kungej Alatau mit deutlich erkennbaren Moränen der Kleinen Eiszeit

Aufnahme: Bolch 2003

2 Vorstellung des Arbeitsgebietes

Der Fokus dieser Arbeit richtet sich auf einen Raum, in dem die Klimaänderung besonders starke Auswirkungen hat: die in Zentralasien gelegenen Gebirgsketten Zailijskij und Kungej Alatau des nördlichen Tien Shan. Diese besitzen eine wichtige Funktion als Wasserspeicher und Wasserlieferant für die umgebenden ariden Gebiete, in denen meist Bewässerungsfeldbau betrieben wird.

Die West-Ost gerichteten Gebirgsketten Zailijskij und Kungej Alatau erstrecken sich von ca. 75,5° bis 79° Ost und 42,5° bis 43,5° Nord und sind die nördlichsten Ketten des Tien Shan (chinesisch: „Himmelsgebirge“), einem der höchsten Gebirge der Erde (Abb. 1). Sie befinden sich im kontinentalen Bereich des südlichen Kasachstans an der Grenze zu Kyrgyzstan. Von der kasachischen Steppe erhebt sich die Hauptgebirgskette des Zailijskij Alatau von einer Höhenlage um 600 m ü.M. bis auf knapp 5000 m ü.M. Ein zentraler Gebirgsknoten leitet zum maximal 4760 m ü. M. hohen Kungej Alatau über, der sonst durch die tief eingeschnittenen Täler des Chon-Kemin- und des Chilik-Flusses vom nördlichen Gebirgszug abgetrennt ist. Die Südgrenze des Kungej Alatau markiert ein intramontanes Becken, in dem der Issyk-Kul-See (1608 m ü.M.) liegt.

Die mittleren jährlichen Temperaturamplituden sind am nördlichen Gebirgsfuß ähnlich den umgebenden Steppen und Wüsten mit ca. 30 K charakteristisch für die kontinentale Lage. Die Hochgebirgsstationen weisen dagegen eine geringere mittlere Amplitude von ca. 20 K auf (Abb. 2). Die mittlere Jahrestemperatur liegt am Nordrand des Tien Shan bei rund 9°C und im Issyk-Kul-Becken bei 6-7°C. Die Gletscherstation Tujuksu (3434 m ü.M.) weist eine mittlere Jahrestemperatur von ca. -4°C auf. Die 0°-Jahresisotherme liegt bei rund 2900 m ü.M. Der Nordrand des Tien Shan ist bedeutend feuchter, da die Luftmassen, die von Westen und Norden



Abb. 1: Zur Lage des Untersuchungsgebietes; Klimastation mit Nummer, vgl. Abb. 2
 Kartengrundlagen: SRTM3-DGM, sowj. topographische Karte 1:500 000

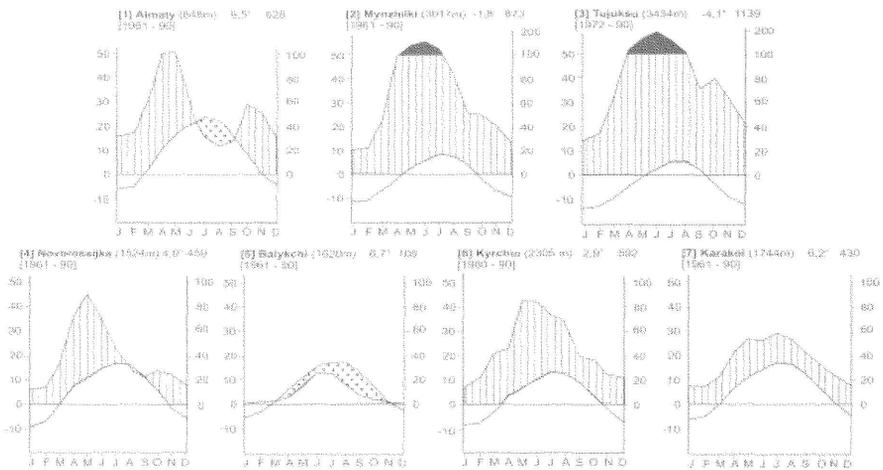


Abb. 2: Ausgewählte Klimadiagramme; zur Lage vgl. Abb. 1

über die Kasachische Steppe strömen, im nördlichen Tien Shan auf die erste Gebirgsbarriere treffen und Zyklonen in diesem Bereich bevorzugt okkludieren. Während der Wintermonate werden diese Gebirgszüge stark von der sibirischen Antizyklone

beeinflusst. Daraus resultieren geringere Winterniederschläge mit einem Minimum im Januar. Die höchsten Niederschläge fallen in der Fußstufe im Frühjahr im Zusammenhang mit zyklonalen Tätigkeiten (BÖHNER 1996). Das Maximum verlagert sich mit zunehmender Höhe von April bei Stationen unterhalb 1000 m bis Juni bei Stationen oberhalb von 3000 m. Auch die Niederschlagssummen steigen mit der Höhe an. Dies lässt sich an dem Transsekt Almaty (628 mm/a) - Tujuksu (1139 mm/a) sehr gut nachvollziehen und erklärt sich mit zunehmender Intensität advektiver und konvektiver Sommerniederschläge mit der Höhe. Abgeschildert von der Bergkette des Zailijskij Alatau weist der Kungej Alatau trockenere Verhältnisse mit noch dominanteren Sommerniederschlägen auf. Die Südabdachung ist von ariden Bedingungen geprägt, an deren westlicher Fußstufe nur knapp über 100 mm Niederschlag pro Jahr gemessen werden.

Die rezente Vergletscherung des Gebietes reicht bei einer durchschnittlichen Kammhöhe von 4500 m bis knapp unter 3500 m ü.M. Die Höhe der Gletschergleichgewichtslinie liegt um 3800 m ü.M. auf der Nordabdachung und bei 3900 – 4000 m ü.M. auf der Südabdachung der Gebirge. Untersuchungen am nordexponierten Tujuksu-Gletscher im Zailijskij-Alatau ergaben, dass dieser eher dem maritimen Gletschertyp (nach AGETA & HIGUCHI 1984) zuzuordnen ist, d.h. dass der größte Teil des Massenzuwachses in den Wintermonaten stattfindet. Die Gletscher der arideren Gebiete des Tien Shan entsprechen eher dem kontinentalen Typ, da ihr Massenzuwachs hauptsächlich im Sommer erfolgt (DYURGEROV ET AL. 1994).

Unterhalb der glazialen Zone schließt sich die periglaziale Zone mit einem ausgeprägten Formenschatz, wie z.B. Solifluktionsloben und mächtigen Blockgletschern an (GORBUNOV ET AL. 1996) an. Der nördliche Tien Shan ist weiterhin gekennzeichnet durch eine starke Murenaktivität, die eine große Gefahr für die Bevölkerung der dem Gebirge unmittelbar angrenzenden Siedlungen darstellt (GORBUNOV & SEVERSKIY 2001).

3 Datengrundlage und Methodik

Zur Analyse der Klimabedingungen standen 16 langjährige Temperatur- und Niederschlagszeitreihen zur Verfügung (Tab. 1). Damit liegt für den Raum eine relativ gute Datengrundlage vor. Dies gilt insbesondere angesichts der Tatsache, dass einige Stationen höher als 2000 m ü.M. und vier Stationen sogar über 3000 m ü.M. hoch gelegen sind.

Die Zeitreihen wurden ausgehend von den Daten der Station Almaty, die von BÖHNER (1996) homogenisiert wurden, durch Korrelationsanalysen und durch visuelle Überprüfung der Graphen kontrolliert. Inhomogenitäten, die z.B. durch Verlegungen der Stationen auftraten konnten so aufgedeckt werden. Die Korrelationsanalyse der einzelnen Zeitreihen untereinander diente zudem der Überprüfung der Übertragbarkeit von Datenreihen von Stationen, die einen längeren Zeitraum abdecken, auf andere Stationen und Gebiete.

Tab. 1: *Kenndaten der in die Analyse miteinbezogenen Klimastationen; Datenherkunft: BÖHNER (2004), GIESE (2004) veröffentlicht in GIESE & MOSSIG (2004), sowie Geographisches Institut Almaty und Hydrometeorologisches Institut Bishkek*

Nr.	Name	Lage	Höhe [m ü.M.]	Zeitraum
1	Almaty (Alma-Ata)	Gebirgsfuß	848	1879 -2000
2	Ust-Gorelnik	Zailijskij Alatau	1943	1938-1991
3	Verchnij-Gorelnik	Zailijskij Alatau	2272	1970-1989
4	Mynzhilki	Zailijskij Alatau	3017	1937-1996
5	Tujuksu	Zailijskij Alatau	3434	1972-1996
6	Bol. Alma Ozero	Zailijskij Alatau	2450	1932-1996
7	Assy	Zailijskij Alatau	2218	1952-1966 1981-1990
8	Novorosijka	Chon-Kemin-Tal	1524	1931-2000
9	Kyrchin	Kungej-Alatau	2305	1980-1999
10	Balykchi (Rybacha)	Issyk-Kul-Becken	1670	1931-2000
11	Cholpon-Ata	Issyk-Kul-Becken	1645	1929-2000
12	Krasnij Oktjabr	Issyk-Kul-Becken	1645	1946-1998
13	Karakol (Prshevsk)	Issyk-Kul-Becken	1744	1879-1996
14	Prokrovka	Issyk-Kul-Becken	1740	1951-2002
15	Karabatkak-Gletscher	Terskej Alatau	3415	1956-1999
16	Tien Shan	Terskej Alatau	3672	1930-2001

Die Niederschlags- und Temperaturdaten waren auch Grundlage für eine Regionalisierung der Daten, um die Klimabedingungen der Gletscher abzuschätzen. Die Regionalisierung erfolgte unter Verwendung des SRTM3-Geländemodells, welches eine Auflösung von 90 Metern besitzt, auf Basis von kalkulierten Vertikal- bzw. Horizontalgradienten. Da die Bedingungen in den einzelnen Gebirgsbereichen unterschiedlich sind, wurde das Gebiet in zwei (für die Temperatur), bzw. fünf Bereiche (für den Niederschlag) unterteilt. Um die Luv- und Leeeffekte des Niederschlages zu integrieren, wurde dieses Niederschlagsmodell mit dem von BÖHNER (2005) verschritten, welches diese Effekte hervorragend abbildet, jedoch bedeutend weniger

Klimastationen integriert hat, da es für das gesamte Hochasien gerechnet wurde. Da die Strahlung ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Vergletscherung ist, wurde die potenzielle direkte Sonneneinstrahlung mit dem Programm „Sunray“ (KASTNER 2005) modelliert.

Grundlage für die Erfassung der rezenten Vergletscherung war eine Landsat-ETM-Szene vom 08.08.1999, die vom *GLCF*-Server der University of Maryland heruntergeladen wurde und glücklicherweise nur sehr geringe Wolken- und Schneebedeckung aufwies. Zur Abgrenzung der Gletscher diente ein Ratio-Bild der Kanäle vier durch fünf mit einem Grenzwert von eins. Missklassifizierte Pixel in vegetationsbedeckten Bereichen und in Seen konnten anhand des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI: $(\text{NIR} - \text{ROT}) / (\text{NIR} + \text{ROT})$) ausgegrenzt werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde erfolgreich für das Schweizer Gletscherinventar getestet (PAUL ET AL. 2002). Probleme bereiten besonders schuttbedeckte Bereiche der Gletscher. Diese konnten manuell unter Zuhilfenahme morphometrischer Parameter, wie der Wölbung, großteils abgegrenzt werden (BOLCH ET AL. 2005). Grundlage hierfür waren ein ASTER- und das SRTM3-DGM. Eine Evaluation wurde für die Gletscher im Malaja-Almatinka-Tal durchgeführt, in dem im Jahr 1998 eine detaillierte Kartierung vorgenommen worden war (EDER ET AL. 2002). Betrachtet man die automatisch abgegrenzten Gletscher, so wird deutlich, dass die offenen Schnee- und Eisflächen sehr gut erfasst wurden. Hauptfehler treten durch zwei Wolken auf, die Teile des zentralen Tujuksu-Gletschers bedecken. Daneben wurden die schuttbedeckten Bereiche der Gletscherfront nicht erfasst. Das machte hier eine Nachbearbeitung notwendig. Der berechnete Flächenvergleich zeigt eine gute Übereinstimmung (Tab. 2).

Tab. 2: Vergleich der Gletscherflächen, abgegrenzt auf Basis der Satelliten-Szene und der topographischen Karte

Name	Fläche 1998 (Karte) [km ²]	Fläche 1999 (Landsat, original) [km ²]	Fläche 1999 (Landsat, verbessert) [km ²]	Fläche 1999 WGMS	Abweichung verbesserte Fläche/Fläche Karte absolut (in %)
Molodezhnyj	1,16	1,12	1,12	n.v.	-0,04 (-3,4%)
Zon Kosmodemjanskoj	0,24	0,22	0,22	n.v.	-0,02 (-8,3%)
Tsentralnyj Tujuksu	2,60	2,19	2,51	2,56	-0,09 (-3,5%)
Igli Tujuksu	1,21	1,12	1,19	n.v.	-0,02 (-1,7%)
Ordzhonikidze	0,25	0,24	0,24	n.v.	-0,01 (-4,0%)
Mayakovskogo	0,12	0,11	0,11	n.v.	-0,01 (-8,3%)
Manshik Mامتetovoj	0,32	0,33	0,33	n.v.	+0,01 (+3,0%)
gesamt	5,90	5,33	5,72	n.v.	-0,18 (-3,1%)

Neben der Erfassung der Gesamtvergletscherung wurden über 150 Gletscher in sechs ausgewählten Tälern (vgl. Abb. 4) mit unterschiedlichen Niederschlags- und Expositionsverhältnissen detailliert GIS-gestützt untersucht und mit den Daten von 1955

aus den Sowjetischen Gletscherkatalogen (*UdSSR Akadamija Nauk* 1966 bis 1983), die auch im World Glacier Inventory inventarisiert sind (BEDFORD & HAGGERTY 1996; NSIDC 1999, aktualisiert 2005) und mit den Veröffentlichungen des World Glacier Monitoring Service (*WGMS*, HAEBERLI ET AL. 1998, 1999, 2001, 2003) verglichen. Mehrere Geländeaufenthalte in allen Untersuchungstälern dienten zur Überprüfung der aus den Satellitendaten gewonnenen Ergebnisse. Den eigenen Schlussfolgerungen ist jeweils kurz der aktuelle Forschungsstand vorangestellt.



Abb. 3: Der zentrale Bereich des Zailijskij und Kungej Alatau mit abgegrenzter rezenter Vergletscherung und Lage der Untersuchungstäler
Kartengrundlage: SRTM3-DGM, sowj. topographische Karte 1:500 000, Landsat ETM-Szene vom 8.8.1999

4 Ergebnisse

4.1 Temperatur und Niederschlagsentwicklung

AIZEN ET AL. (1997) analysierten die Klimadaten des Zeitraumes 1940-91 von 110 Klimastationen, die im Bereich des Tien Shan liegen. Sie kommen zum Schluss, dass die Temperaturen im Schnitt um 0,01 K/a angestiegen sind. Im nördlichen Tien Shan verlief der Temperaturanstieg allerdings geringer. Unterhalb von 2000 m ü.M. betrug der Anstieg 0,006 K/a; Oberhalb 0,008 K/a. Der Niederschlag ist im gesamten Tien Shan um durchschnittlich 1,2 mm/a angestiegen. Im nördlichen Tien Shan errechneten die oben genannten Autoren einen Anstieg von 2,44 mm/a unterhalb und 0,84 mm/a oberhalb von 2000 m ü.M.

Eine umfangreiche und detaillierte statistische Analyse von Klimazeitreihen in Zentralasien stellen GIESE & MOSSIG (2004) vor; allerdings beziehen sie in ihre Analysen die Gebirgsstationen des Zailijskij Alatau nicht mit ein. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Jahresmitteltemperaturen bis Anfang der 1970er Jahre langfristigen zyklischen Schwankungen unterworfen sind, aber seit Anfang der 1930er, spätestens aber seit Anfang der 1950er ein allgemeiner längerfristiger Anstieg der Jahresmitteltemperaturen festzustellen ist, der allerdings nicht allmählich, sondern in Schüben erfolgt. Spätestens ab den 1970er Jahren ist eine systematische Erwärmung bei allen Stationen nachweisbar, die über die zyklischen Schwankungen eindeutig herausgeht. Die Erwärmung nimmt mit der Höhe ab und nach GIESE & MOSSIG (2004) ist oberhalb von 2700 m ü.M. sogar eine Temperaturabnahme zu verzeichnen. Die Erwärmung ist in den Wintermonaten stärker als in den Sommermonaten, was auf eine Abschwächung der Sibirischen Antizyklone zurückgeführt wird. Insgesamt kommen sie zum Schluss, dass der Trendkoeffizient der Jahresmitteltemperaturen für den Zeitraum 1950 – 2000 zwischen 0,015 K/a und 0,021 K/a lag.

Für die Entwicklung der Niederschlagsmengen lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. GIESE & MOSSIG (2004) widersprechen damit Ansichten von AIZEN ET AL. (1997), die von einer trendhaften Zunahme der Niederschlagsmengen sprechen und vertreten die Ansicht, dass insgesamt von einer unveränderten Niederschlagstätigkeit ausgegangen werden muss.

Für die eigenen Untersuchungen wurde auf Basis der Korrelationsanalysen die Auswertung der Zeitreihen auf vier repräsentative Stationen beschränkt. Ein weiteres Kriterium war die Verfügbarkeit von möglichst langjährigen Zeitreihen. Ausgewählt wurden die Station Almaty (848 m ü.M.), welche die Lage am Gebirgsfuß charakterisiert; die Station Mynzhilki (3017 m ü.M.) als Gebirgsstation im Zailijskij Alatau; Karakol (1744 m ü.M.) für die Lage im Issyk-Kul-Becken und Novorosijka (1524 m ü. M.) für das Chon-Kemin-Tal. Die vier Temperaturzeitreihen sind in Abbildung 4 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass im Durchschnitt eine Erwärmung stattgefunden hat, die jedoch nicht homogen verläuft, sondern dass es auch immer wieder Phasen der Abkühlung gegeben hat. In den 1970er Jahren sind die Temperaturen wiederum stark angestiegen und liegen seitdem z. T. deutlich über dem Durchschnitt von 1961-90. Besonders stark ist die Zunahme bei den Stationen Karakol und Almaty, also Stationen die nicht unmittelbar im Gebirge liegen. Der Anstieg der Gebirgsstationen ist dagegen geringer. Ähnlich verhält sich die Station Novorosijka, die zwar von der Höhenlage niedriger als Karakol liegt, aber dennoch eher den Charakter einer Gebirgsstation besitzt, was auch durch die Korrelationsanalyse bestätigt wird. Anzumerken ist, dass die Gebirgsrandstationen im Bereich von Städten oder größeren Siedlungen liegen. Einflüsse, die auf eine zunehmende Veränderung der Umgebung durch Bebauung zurückzuführen sind, können hier nicht ausgeschlossen werden. Die Tendenzen sind jedoch stimmig.

Bei der Bestimmung der Trendkoeffizienten kann festgehalten werden, dass die Stationen Almaty und Karakol den größten Trendkoeffizienten aufweisen und es

im Schnitt zu einer Abnahme der Trendkoeffizienten mit der Höhe kommt (Tab. 3). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass die Anfangs- und Endzeitpunkte von Bedeutung sind und diese so gewählt wurden, dass die Trends klar ersichtlich sind. Eine

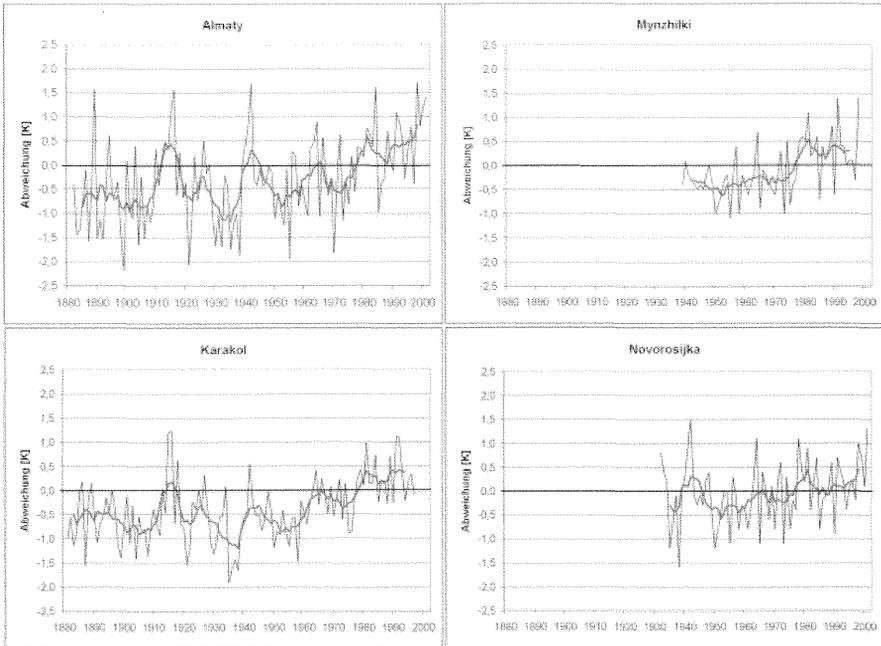


Abb. 4: Zeitreihen der Temperaturabweichung ausgewählter Klimastationen vom Durchschnitt der Klimanormalperiode 1961-90, dicke Linie: 7-jähriges gleitendes Mittel

Tab. 3: Trendkoeffizienten der Temperaturentwicklung für verschiedene Klimastationen

Klimastation	Höhe [m ü.M.]	Trendkoeffizienten [K/100 Jahre]				
		1900-2000	1952-1996	1972-1996	1972-1996 Sommerhj.	1972-1996 Winterhj.
Almaty	849	0,86	2,37	2,94	-1,25	+8,08
Mynzhilki	3017	n.b.	1,93	1,41	-2,14	+4,79
Novorosijka	1524	n.b.	0,97	0,92	n.b.	n.b.
Karakol	1740	n.b.	2,56	2,69	n.b.	n.b.

jahreszeitliche Analyse der Temperaturänderung zeigt auf, dass die Erhöhung der durchschnittlichen Jahrestemperaturen besonders auf einen starken Anstieg in den Wintermonaten zurückzuführen ist. Dieser Trend ist seit den 1970ern noch erheblich verstärkt.

Erfahrungsgemäß ist die Variation der Niederschläge sowohl räumlich als auch zeitlich wesentlich stärker als bei den Temperaturen. Einen einheitlichen Trend oder homogenen Verlauf der Niederschlagsentwicklung, wie er bei der Temperaturentwicklung zu erkennen war, ist beim Niederschlag nicht gegeben. Spätestens seit Anfang der 1950er Jahre steigt der Niederschlag bei den Stationen unterhalb von 2000 m ü.M. leicht an, während dieser bei den Hochgebirgsstationen seit spätestens Mitte der 1960er Jahre eher zurückgeht (Abb. 5). Für die Gletscherentwicklung ist es besonders wichtig, zu welcher Jahreszeit und in welcher Form die Niederschläge fallen. Wie für die Temperaturen wurden die Monate November bis März mit den Monaten April bis Oktober verglichen. Während im Zeitraum von 1950 – 1992 bei der Station Almaty Sommer- und Winterniederschläge in gleichem Maße gestiegen sind, ist der Rückgang der Niederschläge im Zeitraum 1972 – 1992 ausschließlich auf die starke Abnahme der Sommerniederschläge zurückzuführen, während die Niederschläge im Winterhalbjahr sogar angestiegen sind. In der Gebirgsstation Mynzhilki ist dieser Trend deutlicher festzustellen. In jüngster Zeit scheinen sich diese Trends allerdings wieder umzukehren, so dass nicht von einer generellen Änderung der Niederschlagsbedingungen gesprochen werden kann.

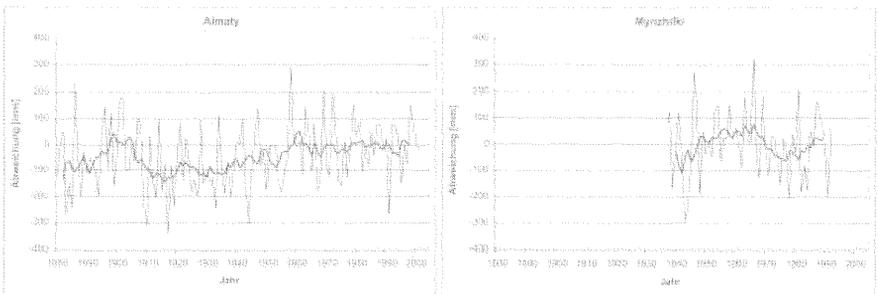


Abb. 5: Zeitreihen der Niederschlagsabweichung ausgewählter Klimastationen vom Durchschnitt der Klimanormalperiode 1961-90, dicke Linie: 7-jähriges gleitendes Mittel

4.2 Gletscherschwund

Ebenso wie die weit überwiegende Zahl der Gletscher weltweit schmelzen auch die Gletscher im gesamten, wie auch im nördlichen Tien Shan seit dem Ende der Kleinen Eiszeit im Durchschnitt zurück (Foto 1 u. Abb. 6). Während des Zeitraums von 1943 – 1977 stießen nur 3 von 210 untersuchten Gletschern im nördlichen Tien Shan vor, ca. 30 stagnierten und bei allen anderen war ein Rückschmelzen zu verzeichnen

(KOTLYAKOV 1997). VILESOV & UVAROV (2001) analysierten die Gletscheränderung der Nordabdachung des Zailijskij Alatau an Hand von Luftbildern der Jahre 1955, 1979 und 1990. Dabei stellen sie fest, dass die Gesamtfläche der Vergletscherung in der gesamten Untersuchungsperiode von 35 Jahren um 29,2% zurückging, wobei das Eisvolumen um 32,2% sank. Dabei schmolzen viele kleine Gletscher nach 1979 völlig ab, während sich einige mittelgroße in mehrere Teile auflösten. Wie an der Nordabdachung des Zailijskij Alatau verloren auch die Gletscher im Issyk-Kul-Becken in den letzten 50 Jahren ca. ein Drittel ihrer Fläche (DIKICH 2004).

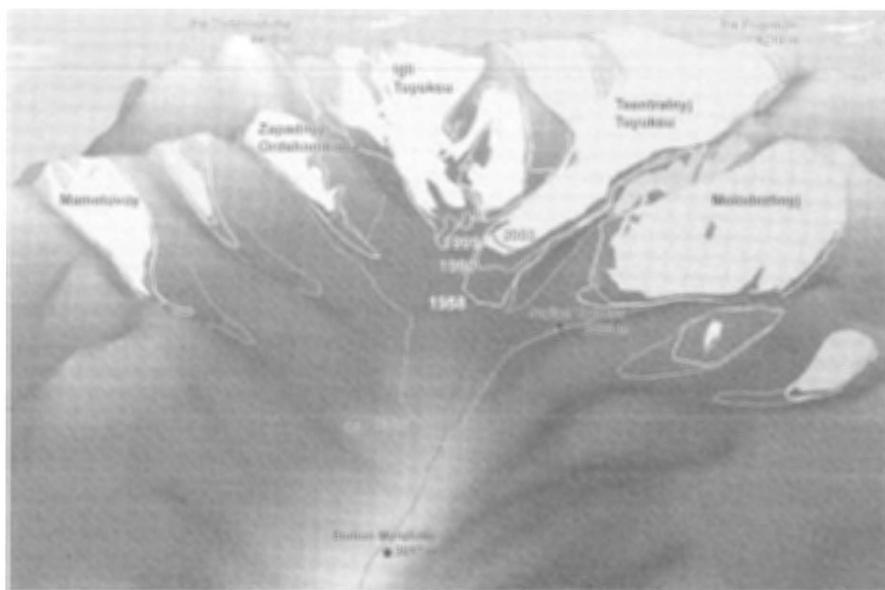


Abb. 6: Gletscherschwund im Malaja Almatinka Tal

Der am besten untersuchte Gletscher im Zailijskij Alatau ist der Tujuksu-Gletscher im Malaja Almatinka Tal. Seit 1957 werden jährliche Akkumulations- und Ablationsmessungen durchgeführt, sowie die Höhe der Gletscher-Gleichgewichtslinie (Equilibrium Line Altitude, ELA) und die Gletscherfläche bestimmt. Anhand von Messungen der Station Mynzhilki (3017 m) wurde die Massenbilanz rechnerisch für die Jahre 1937 – 1956 rekonstruiert (DYURGEROV ET AL. 1996). Die kumulative Massenbilanz zeigt einen fast ununterbrochenen Rückgang, der sich seit Anfang der 1970er Jahren drastisch verstärkt hat (Abb. 7 links). Dieser starke Knick in der Massenbilanzkurve seit den 1970er Jahren kann auch bei allen weiteren untersuchten Gletschern im Tien Shan nachgewiesen werden (CAO 1998). Vergleicht man die kumulative Massenbilanzkurve mit dem Rückgang der Gletscherfläche, so verläuft diese tendenziell ähnlich, jedoch beginnt der verstärkte Rückgang erst ca. 1980 (Abb. 7 rechts). Dies korreliert gut mit Untersuchungen von AIZEN & AIZEN (1994), die zeigten, dass zunächst die Eisoberflächen einsanken und seit Anfang der 1980er

(KOTLYAKOV 1997). VILESOV & UVAROV (2001) analysierten die Gletscheränderung der Nordabdachung des Zailijskij Alatau an Hand von Luftbildern der Jahre 1955, 1979 und 1990. Dabei stellen sie fest, dass die Gesamtfläche der Vergletscherung in der gesamten Untersuchungsperiode von 35 Jahren um 29,2% zurückging, wobei das Eisvolumen um 32,2% sank. Dabei schmolzen viele kleine Gletscher nach 1979 völlig ab, während sich einige mittelgroße in mehrere Teile auflösten. Wie an der Nordabdachung des Zailijskij Alatau verloren auch die Gletscher im Issyk-Kul-Becken in den letzten 50 Jahren ca. ein Drittel ihrer Fläche (DIKICH 2004).

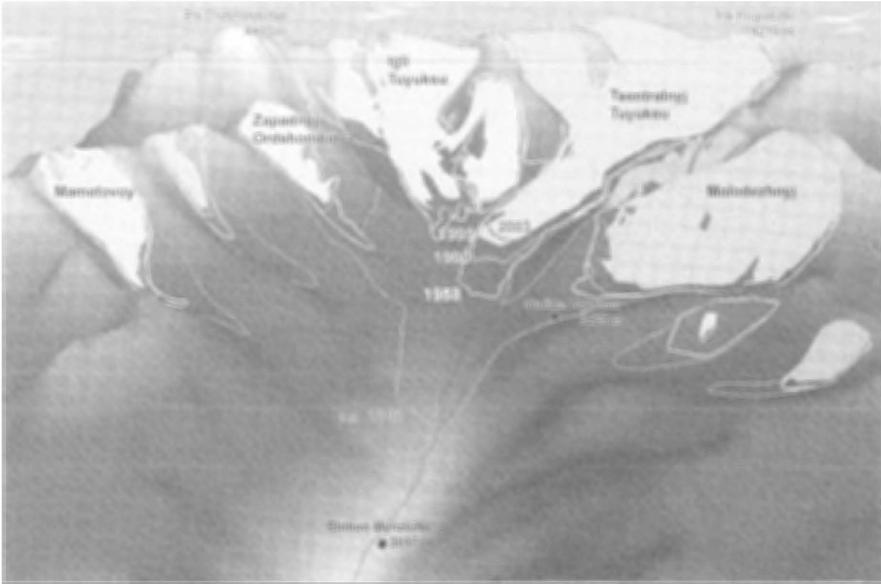


Abb. 6: Gletscherschwund im Malaja Almatinka Tal

Der am besten untersuchte Gletscher im Zailijskij Alatau ist der Tujuksu-Gletscher im Malaja Almatinka Tal. Seit 1957 werden jährliche Akkumulations- und Ablationsmessungen durchgeführt, sowie die Höhe der Gletscher-Gleichgewichtslinie (Equilibrium Line Altitude, ELA) und die Gletscherfläche bestimmt. Anhand von Messungen der Station Mynzhilki (3017 m) wurde die Massenbilanz rechnerisch für die Jahre 1937 – 1956 rekonstruiert (DYURGEROV ET AL. 1996). Die kumulative Massenbilanz zeigt einen fast ununterbrochenen Rückgang, der sich seit Anfang der 1970er Jahren drastisch verstärkt hat (Abb. 7 links). Dieser starke Knick in der Massenbilanzkurve seit den 1970er Jahren kann auch bei allen weiteren untersuchten Gletschern im Tien Shan nachgewiesen werden (CAO 1998). Vergleicht man die kumulative Massenbilanzkurve mit dem Rückgang der Gletscherfläche, so verläuft diese tendenziell ähnlich, jedoch beginnt der verstärkte Rückgang erst ca. 1980 (Abb. 7 rechts). Dies korreliert gut mit Untersuchungen von AIZEN & AIZEN (1994), die zeigten, dass zunächst die Eisoberflächen einsanken und seit Anfang der 1980er

Jahre ein massives Rückschmelzen der Gletscherzungen folgt. Die Fläche des Tujuksu-Gletschers ist von 1957-1999 um ca. 21% zurückgegangen.

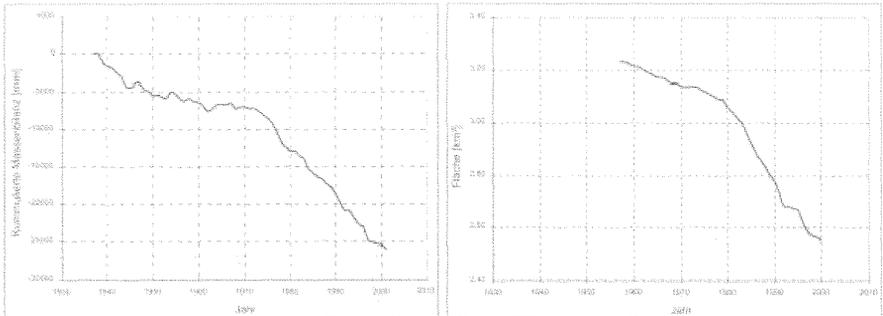


Abb. 7: Links: Kumulierte Massenbilanz des Tujuksu-Gletschers; 1937-56 modelliert aus Klimadaten, ab 1957 gemessene Daten; rechts: Flächenveränderung
Quellen: DYURGEROV ET AL. 1996, WGMS

Für die nachfolgend vorgestellten Zahlen des Flächenvergleiches von 1999 zum Gletscherkatalog der ehemaligen Sowjetunion (*UdSSR Akademija Nauk* 1966 bis 1983) sei darauf hingewiesen, dass eine Berechnung der Gletscherflächen einer topographischen Karte im Maßstab 1:10 000, die 1958 vom Malaja-Almatinka-Tal erstellt wurde (SIMON ET AL. 1961), geringere Werte als die des sowjetischen Gletscherkatalogs der gleichen Gletscher für das Jahr 1955 ergab. Grund könnte in der unterschiedlichen Interpretation der schuttbedeckten Bereiche des Gletschers und des Toteises liegen. So können sich an den vorgestellten genauen Zahlen leichte Abweichungen zur Realität ergeben, die Tendenzen sind jedoch stimmig.

Im Zeitraum von 1955 – 1999 sind in den sechs Untersuchungstälern 3 Gletscher leicht vorgestoßen, 7 blieben unverändert; bei den anderen 142 war ein z.T. deutliches Rückschmelzen festzustellen. Die vergletscherte Fläche ist durchschnittlich um 32,1% zurückgegangen. Der Gletscherrückgang ist jedoch nicht bei allen Gletschern gleich, sondern ist je nach Größe, Lage und Klimabedingungen unterschiedlich. Ein bedeutender Einflussfaktor ist dabei die Größe. Mächtigerer Gletscher reagieren allgemein langsamer auf veränderte Klimabedingungen und schmelzen in geringerem Maße zurück. Dies ist auch bei den untersuchten Gletschern deutlich zu beobachten (Abb. 8).

Weiterhin ist der Rückgang der Gletscherfläche von der Expositionsausrichtung des Nährgebietes abhängig. Der höchste Rückgang ist in Südostexposition mit über 40 % bei einer durchschnittlichen Fläche von 1,0 km² zu verzeichnen. Bei einer durchschnittlichen Fläche von 0,7 km² beträgt die Abnahme in Nordexposition dagegen nur knapp 26% (Tab. 4). Neben der Nordexposition geht die vergletscherte Fläche in den Westexposition mit ca. 30% leicht unterdurchschnittlich zurück. Dies dürfte an der Luvlage zu den niederschlagsbringenden Luftmassen liegen.

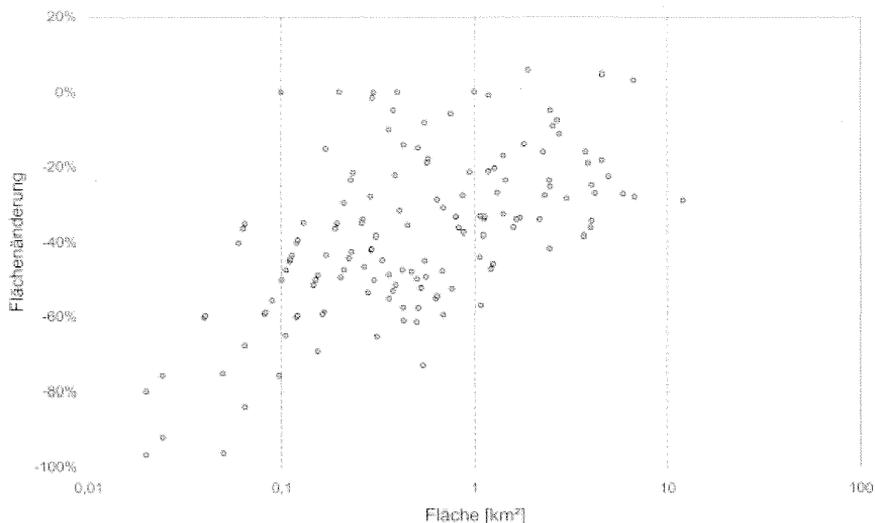


Abb. 8: Änderung der Gletscherfläche im Verhältnis zur Gletschergröße; man beachte die logarithmische Skala der Abszisse

Der Rückgang der Gletscherfläche in den einzelnen Untersuchungstälern lässt diese generellen Trends erkennen, weist aber auch Abweichungen auf (Tab. 5). Eine wichtige Einflussgröße ist die Gletscherfläche. Das Malaja Almatinka-Tal hat mit 0,63 km² die geringste durchschnittliche Gletschergröße. Der höchste Flächenschwund ist jedoch im Chon-Aksu-Tal zu verzeichnen, in dem die Gletscher die geringsten Niederschläge und die höchste Strahlungsenergie erhalten. In den nordexponierten Tälern mit hohem Niederschlag (Bolshaja Almatinka und Levyj Talgar) liegt die Verminderung der Gletscherfläche im Durchschnitt. Besonders betrachtet werden muss die Situation im oberen Chon-Kemin-Tal, da hier der Gletscherrückgang deutlich geringer als in den anderen Untersuchungstälern ist. Ein Grund hierfür liegt

Tab. 4: Der Gletscherrückgang in unterschiedlichen Expositionen

Exposition	Anzahl	durschnittl. Fläche [km ²]	Rückgang 1955-99 [%]
N	43	0,7	-25,9
NO	44	1,3	-32,0
O	18	0,7	-35,8
SO	10	1,0	-40,4
S	18	0,5	-39,1
SW	8	1,4	-32,0
W	17	0,5	-30,5
NW	25	0,9	-32,6

Tab. 5: Kennzahlen der Gletscher in den ausgewählten Untersuchungsältern

	Expositions- ausrichtung	Mittlere Höhe der Gletscher [m ü.M.]	Mittlere Strahlung [W/m ²]	Mittlere Jahres- durchschnitts- temperatur [°C]	Mittlerer Jahres- niederschlag [mm]	Durch- schnittl. Gletscher- fläche [km ²]	Vergletscherte Fläche		Gletscher- schwund	
							1955	1999	Abs.	(in%)
Malaja Almatinka	S-N	3767	154,6	-5,2	1354	0,63	9,1	5,7	-3,4	-37,6
Bolshaja Almatinka	S-N	3872	171,8	-5,7	1300	0,84	25,2	17,7	-7,5	-29,6
Levyj Talgar	S-N	3929	178,3	-6,0	1318	1,12	72,3	48,4	-23,9	-33,1
Turgen	SW-NO	3852	180,9	-5,6	1210	0,98	35,6	22,6	-13,0	-36,5
Oberes Chon- Kemin	W-O	3978	198,0	-6,3	1032	1,24	38,5	32,2	-6,3	-16,4
Chon- Aksu	W-O	4023	216,3	-7,3	872	0,97	62,8	38,8	-24,0	-38,2
Gesamt	-	3938	189,9	-6,2	1142	1,04	243,5	165,4	-78,1	-32,1

bei der starken Vergletscherung mit einer überdurchschnittlichen Gletschergröße. Einer der mächtigsten Gletscher dieses Tales, der östliche Aksu-Gletscher hatte seit 1955 mehrere Vorstoßphasen, zuletzt 1979-82 (SOLOMINA ET AL. 2004). Die Ursache für die insgesamt geringere Verminderung der Gletscherfläche ist auch in den klimatischen Bedingungen zu suchen. In diesem Tal handelt es sich um Gletscher des kontinentalen Typs, da dieses Tal insgesamt weniger Niederschläge erhält, die zum weit überwiegendem Teil im Sommer fallen. Hier ist zudem zu vermuten, dass im Talschluss die sommerlichen Konvektionsniederschläge im Niederschlagsmodell nicht genügend erfasst wurden. Auch die Täler des Zailijskij Alatau erhalten mehr Niederschläge im Sommer, doch ist hier die Dominanz nicht so stark ausgeprägt. Da die Temperaturerhöhung in den Winterhalbjahren deutlich stärker ist, als in den Sommerhalbjahren, wird die Massenbilanz der Gletscher im Chon-Kemin-Tal nicht so stark negativ beeinflusst.

5 Fazit und Ausblick

Die Jahresdurchschnittstemperatur ist spätestens seit den 1950er Jahren bei allen Klimastationen angestiegen. Seit Mitte der 1970er Jahre liegen die Temperaturen z.T. deutlich über dem Durchschnitt aller vorangegangenen Messungen. Der Temperaturanstieg ist im nördlichen Tien Shan höher als im globalen Durchschnitt, wobei die Temperaturerhöhung besonders auf den Anstieg der Wintertemperaturen zurückzuführen ist. In den Gebirgsbereichen ist der Temperaturanstieg geringer ausgeprägt als im Tiefland. Für die Niederschläge ergeben sich dagegen keine eindeutigen Trends.

Der Gletscherrückgang in den untersuchten Tälern des Zailijskij und Kungej Alatau zwischen 1955 und 1999 beträgt im Durchschnitt ca. 32% und ist damit etwas höher als der Rückgang von 23% zwischen 1973 und 2001 im Ak-Shirak-Gebirge des zentralen Tien Shan (KHROMOVA ET AL. 2003) und ebenfalls höher als in den Alpen, wo zwischen 1973-1998 ein durchschnittlicher Rückgang von ca. 20 % festgestellt wurde (PAUL ET AL. 2004).

Generell kann der Gletscherrückgang gut mit der gestiegenen Jahrestemperatur erklärt und korreliert werden. Der Gletscherrückgang verläuft in den Gebirgsketten jedoch nicht homogen, sondern ist neben der Gletschergröße in entscheidendem Maße vom Temperatur- und Niederschlagsregime sowie von der Strahlung abhängig. Tendenziell ist der Gletscherrückgang bei eher maritimen Gletschern, wie dies an der Nordabdachung des Zailijskij Alatau der Fall ist, stärker als bei kontinentalen Gletschern. Dies kann durch den stärkeren Temperaturanstieg im Winterhalbjahr und den dadurch geringeren Niederschläge in fester Form erklärt werden, die für die Ernährung der Gletscher des eher maritimen Typs wichtig sind. Bedeutend sind weiterhin die Strahlungs- und Niederschlagssummen. Hoher Strahlungsgenuss bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Jahersniederschlägen bedingen den starken Gletscherrückgang im Chon-Aksu-Tal.

Schreitet die jetzige Klima- und Gletscherentwicklung ungehindert voran, so werden große Teile des nördlichen Tien Shan spätestens 2100 eisfrei sein und die zur Verfügung stehende Wassermenge um ca. 16% geringer sein (VILESOV & UVAROV 2001). Daneben ist zu befürchten, dass durch die Zunahme der Gletscherseen und des gleichzeitig rückschmelzenden Permafrostes (MARCHENKO 1999) die Gefahr von gravitativen Massenbewegungen, insbesondere von Muren, eine erhöhte Gefahr für die zahlreichen direkt an den Gebirgsrändern liegenden Städte und Siedlungen darstellen.

Literatur

- AGETA, Y. & K. HIGUCHI. 1984: Estimation of mass balance components of a summer-accumulation type glacier in Nepal, Himalaya. In: *Geografiska Annaler, Series A* 66/3: 249-255.
- AIZEN, V.B. & E.M. AIZEN. 1994: Features of regime and mass exchange of some glaciers on central Asia periphery. In: *Bulletin of Glacier Research* 12: 9-14.
- AIZEN, V. B., E. M. AIZEN, J. M. MELACK & J. DOZIER. 1997: Climate and hydrologic changes in the Tien Shan, central Asia. In: *Journal of Climate* 10: 1393-1404.
- BEDFORD, D. & C. HAGGERTY. 1996: New digitized glacier inventory for the former Soviet Union and China. In: *Earth System Monitor* 6/3: 8-10.
- BENISTON, M. 2003: Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. In: *Climatic Change* 59: 5-31.
- BISHOP, M. P., J. F. SHRODER, B. L. HICKMAN & L. COPLAND. 1998: Scale-dependent analysis of satellite imagery for characterization of glacier surfaces in the Karakoram Himalaya. In: *Geomorphology* 21: 217-232.
- BISHOP, M. P., R. G. BARRY, A. B. G. BUSH, L. COPELAND et al. 2004: Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): Remote sensing and GIS investigations of the Earth's cryosphere. In: *Geocarto International* 19/2: 57-85.
- BÖHNER, J. 1996: Säkulare Klimaschwankungen und rezente Klimatrends Zentral- und Hochasiens. Göttingen (=Göttinger Geographische Abhandlungen, Bd. 101).
- BÖHNER, J. 2004: Klimadaten der Station Almaty freundlicherweise zur Verfügung gestellt.
- BÖHNER, J. 2005: General climatic controls and topoclimatic variations of Central and High Asia. In: *Boreas* (im Druck).
- BOLCH, T. 2004: Using ASTER and SRTM DEMs for Studying Glaciers and Rockglaciers in northern Tien Shan. In: *Teoretičeskije i Prikladnyje Problemy geografii na Rubešje Stoletij* (Theoretical and applied problems of geography on a boundary of centuries), Band 1, Almaty/Kasakhstan, S. 254-258.
- BOLCH, T., U. KAMP & J. OLSENHOLLER. 2005: Using ASTER and SRTM DEMs for Studying Geomorphology and Glaciation in High Mountain Areas. In: M. OLUIC (Hg.): *New Strategies for European Remote Sensing*. Rotterdam: 119-127.
- CAO, M. S. 1998: Detection of abrupt changes in glacier mass balance in the Tien Shan Mountains. In: *Journal of Glaciology* 44/147: 352-358.
- DIKICH, A. N. 2004: Gletscherwasserressourcen der Issyk-Kul-Region (Kirgistan), ihr gegenwärtiger und zukünftiger Zustand. Giessen (=Schriftenreihe des Zentrums internationale Entwicklungs- und Umweltforschung, Bd. 19).
- DYURGEROV, M. B., V. N. MIKHALENKO, M. G. KUNAKHOVICH, L. CHAOHAI, & X. ZICHU. 1994: On the cause of glacier mass balance variations in the Tien Shan Mountains. In: *Geo Journal* 33/2/3: 311-317.

- DYURGEROV, M. B., V. N. UVAROV & T. E. KOSTJASHKINA. 1996: Mass Balance and Runoff of the Tuyuksu Glacier and the North Slope of the Zailiyskiy Alatau Range, Tien Shan In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 32: 41-54.
- EDER, K., T. GEISS & H. HORNIK. 2002: Neukartierung und DGM-Aufbau für das Tujuksu-Gletschergebiet im Tian Shan. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 38/2: 129-138.
- GIESE, E. 2004: Klimadaten von Stationen in Kirgizstan freundlicherweise zur Verfügung gestellt.
- GIESE, E. & I. MOSSIG. 2004: Klimawandel in Zentralasien. Giessen (=Schriftenreihe des Zentrums internationale Entwicklungs- und Umweltforschung, Bd. 17).
- GORBUNOV, A. P., E. V. SEVERSKIY & S. N. TITKOV. 1996: Geokriologicheskije Uslovija Tjan-Shanja i Pamira (=Geokryologische Bedingungen des Tien Shan und Pamir). Irkutsk.
- GORBUNOV, A. P. & E. W. SEVERSKIY. 2001: Selij v Almatu (=Muren in Almaty). Almaty.
- HAEBERLI, W. & M. BENISTON. 1998: Climate Change and its impacts an glaciers and permafrost in the Alps. In: *Ambio* 27/4: 258-265.
- HAEBERLI, W., M. HOELZLE, H. SAURER & R. FRAUENFELDER (Hg.). 1998: Fluctuation of Glaciers 1990 - 1995 (Vol. VII).
- HAEBERLI, W. 1999: Hangstabilitätsprobleme im Zusammenhang mit Gletscherschwund und Permafrostdegradation im Hochgebirge. In: *Relief, Boden, Paläoklima* 14: 11-30.
- HAEBERLI, W., M. HOELZLE & R. FRAUENFELDER (Hg.). 1999: Glacier Mass Balance Bulletin, No. 5 (1996-1997), IAHS (ICSI) - UNEP - UNESCO - WMO.
- HAEBERLI, W., R. FRAUENFELDER & M. HOELZLE (Hg.). 2001: Glacier Mass Bulletin No. 6 (1998-1999). Zürich, IAHS (ICSI) - UNEP - UNESCO - WMO.
- HAEBERLI, W., R. FRAUENFELDER, M. HOELZLE & M. ZEMP (Hg.). 2003: Glacier Mass Bulletin No. 7 (2000-2001), IAHS (ICSI) - UNEP - UNESCO - WMO.
- IPCC (Hg.). 2001: Climate Change 2001 - the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge.
- KÄÄB, A., F. PAUL, M. MAISCH, M. HOELZLE & W. HAEBERLI. 2002: The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: II. First results. In: *Annals of Glaciology* 34: 362-366.
- KASTNER, R. 2005: Erstelltes ArcView-Skript „Sunray“ zur Strahlungsberechnung freundlicherweise zur Verfügung gestellt.
- KHALSA, S. J. S., M. DYURGEROV, T. E. KHROMOVA, B. RAUP & R. G. BARRY. 2004: Space-based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42/10: 2177-2182.
- KHROMOVA, T. E., M. DYURGEROV & R. G. BARRY. 2003: Late-twentieth century changes in glacier extent in the Ak-shirak Range, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. In: *Geophysical Research Letters* 30/16 1863, doi:10.1029/2003GL017233.
- KOTLYAKOV, V. M. (Hg.). 1997: World Atlas of Snow and Ice Resources, Vol. 2. Moscow.
- MAISCH, M. 2000: The longterm signal of climate change in the Swiss Alps: Glacier retreat since the end of the Little Ice Age and future ice decay scenarios. In: *Geografia fisica e dinamica quaternaria* 23/2: 139-152.
- MARCHENKO, S. S. 1999: Sovremennoje i ozhidaemje v 21. V. Izmenenije merzlotno-klimaticheskikh Uslovnij b severnom Tjan-Shanje (= Permafrost-klimatische Bedingungen im nördlichen Tien Shan: Rezent und erwartete Veränderungen im 21. Jahrhundert). In: *Criosfera Semli* 3/2: 13-21.
- NSIDC. 1999, aktualisiert 2005: World Glacier Inventory, World Glacier Monitoring Service and National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Boulder, CO. Digital media.
- OERLEMANS, J. 1994: Quantifying global warming from the retreat of glaciers. In: *Science* 264: 243-245.

- PAUL, F., A. KÄÄB, M. MAISCH, T. KELLENBERGER & W. HAEBERLI. 2002: The new remote sensing derived Swiss Glacier Inventory: I. Methods. In: *Annals of Glaciology* 34: 355-361.
- PAUL, F., A. KÄÄB, M. MAISCH, T. KELLENBERGER & W. HAEBERLI. 2004: Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. In: *Geophysical Research Letters* 31(21): L21402, doi:10.1029/2004GL020816.
- SIMON, N., J. TÖPPLER & W. PILLEWITZER. 1961: Zur kartographischen Aufnahme des Gletschergebietes Tjuksu. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 4: 310-317.
- SOLOMINA, O. N., R. BARRY & M. BODNYA. 2004: The retreat of Tien Shan glaciers (Kyrgyzstan) since the Little Ice Age estimated from aerial photographs, lichenometric and historical data. In: *Geografiska Annaler, Series A* 86/2: 205-216.
- UdSSR Akadamiya Nauk* (Hg.). 1966 bis 1983: Katalog Lednikov SSSR (=Gletscherkatalog der UdSSR). Leningrad.
- VILESOV, E. N. & V. N. UVAROV. 2001: Evoljutsija sovremennogo oledeninja Zailijskogo Alatau v XX Veke (=Entwicklung der rezenten Vergletscherung des Zailijskij Alatau im 20. Jahrhundert). Almaty.

Internetadressen

- GLCF*: Server des Institutes für Global Land Cover Facility (GLCF) der University of Maryland: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>
- GLIMS*: Global Land Ice Measurements from Space: www.glims.org
- SRTM*: Server mit den prozessierten Daten der Shuttle Radar Topographic Mapping Mission: <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>
- WGMS*: World Glacier Monitoring Service: <http://www.wgms.ch>