

# Paläoklima, Umwelt und Klimawandel in Zentralasien

Jens Mingram, Stefan Lauterbach, Sushma Prasad, Gerd Helle, Birgit Plessen, Georg Schettler  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Central Asia holds a key position for understanding the interplay of geodynamic and climate processes. The region provides a natural laboratory to monitor environmental risks related to water excess and shortage, and high seismicity. Here we investigate natural climate archives (lake sediments, trees, speleothems), and develop regional monitoring systems as a key requirement for the palaeoclimatic interpretation of analytical data derived from these archives. As there is no modern analogue for the predicted future climate change investigating palaeo-records is particularly important to understand the natural recurrence frequency of disastrous events like floods, droughts, landslides and earthquakes and the full range of natural climatic variability. Results from lake sediment core analyses indicate that the regional climate was, in contrast to monsoonal Asia, characterized by a rather moderate drying trend since the mid-Holocene. We got similar results, plus details of interannual rainfall patterns, from speleothems for the last 5000 years. Tree-ring features of Central Asian long-lived tree species like juniper provide annually resolved information on past climate dynamics and adaption to recent global change. They can be likewise used for dating palaeoseismic events. Dust monitoring aims at a better understanding of the long-range transport of mineral aerosols across Eurasia in relation to seasonal changes in the hemispherical atmospheric circulation, and on the impact of aeolian dust on lake ecosystems and tree growth.*



Zentralasien mit seinen bis über 7000 m aufragenden Gebirgen befindet sich an der klimatischen Schnittstelle zwischen dem Einfluss der Zonal Westerlies, des sibirisch-polaren Systems sowie der asiatischen Monsun-Klimadynamik. Damit ist es eine Schlüsselregion für das Verständnis der Kontinent-Atmosphären-Wechselbeziehung Eurasiens. In einem integrierten Ansatz aus Untersuchungen von Paläoklimaarchiven (Seesedimente, Baumringe, Speläotheme) und parallelem See-, Dendro-, Speläo- und Staubmonitoring sollen neben der regionalen Klimavariabilität auf unterschiedlichen Zeitskalen sowie anthropogenen Rückkopplungsprozessen auch Amplituden und Wiederholraten von klimatisch und tektonisch verursachten Extremereignissen (Dürren, Hochwasser, Erdbeben, Bergstürze) untersucht werden. Natürliche Klimaarchive eröffnen die Möglichkeit, weit über den zeitlichen Rahmen instrumenteller oder historischer Daten hinaus zu agieren und somit auch den natürlichen Hintergrund der Klimavariabilität zu verstehen. In einer klimatisch und ökologisch sensitiven Hochgebirgsregion wie Zentralasien, in der zudem gesellschaftliche Prosperität noch in hohem Maß von natürlichen Ressourcen abhängt, ist dieses Verständnis von besonderer Bedeutung, um die Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels auch auf regionaler Ebene abschätzen zu können.

Gibt es Änderungen in der isotopischen Signatur und damit der Herkunft feuchter Luftmassen? In welchem Maß sind auch scheinbar noch unberührte Seen bereits durch äolischen Eintrag von Nährstoffen und Schadstoffen belastet? Wie alt und wie stabil sind natürliche Bergsturzseen wie z.B. der Sary-Chelek? Wie reagieren Bäume auf den Klimawandel im Hochgebirge, und welche Arten passen sich besonders gut an? Wie sah die natürliche Vegetation Zentralasiens vor dem massiven Eingriff des Menschen aus, und gibt es noch Refugien? Wie weit schmolzen die Gletscher in früheren Warmphasen, und wie schnell kehrten sie zurück? Das alles sind Fragen, die lange Datenreihen erfordern und die das Deutsche GeoForschungs-Zentrum GFZ in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Region in seinem Forschungsprogramm bearbeitet. Unsere Untersuchungen konzentrieren sich derzeit auf Kirgisistan (Abb. 1) und werden vom Zentralasiatischen Institut für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) in Bischkek maßgeblich unterstützt.

*Links: Arbeitsplattform auf dem Sary-Chelek-See  
(Foto: J. Mingram, GFZ)*

*Left: Lake Sary-Chelek with working raft*

## See-Monitoring in Kirgisistan

Sedimentablagerungen aus Seen können eine Fülle an Daten zu Umwelt- und Klimaveränderungen liefern. Die zeitliche Auflösung reicht dabei von nur Stunden dauernden Ereignissen über Jahreszeiten bis hin zu lückenlosen Sedimentprofilen von zehntausenden und mehr Jahren. Die mit verschiedensten sedimentologischen, biologischen, chemischen und physikalischen Methoden gewonnenen Daten sind jedoch noch keine realen Klimadaten, sondern sogenannte Proxydaten, d. h. sie bilden reale Klimaparameter wie z. B. Lufttemperatur oder Jahresniederschlag indirekt und gefiltert ab. Zum Verständnis der in einem See ablaufenden sehr komplexen Prozesse – und letztendlich zur Rekonstruktion realer Klimadaten – können die aus Sedimenten gewonnenen Proxydaten an Instrumentendaten geeicht werden. Das kann entweder mit Hilfe einer größeren Anzahl von Seen aus unterschiedlichen Klimabereichen geschehen, oder über den Vergleich von Daten aus einem langen, saisonal aufgelösten Sedimentprofil eines Sees. Problematisch ist dabei, dass in aller Regel nur die üblichen meteorologischen Daten von Wetterstationen verfügbar sind und im Fall von Ländern wie Kirgisistan mit ausgedünnten Stationsnetzen die Daten zumeist auch nicht aus der Nähe der untersuchten Seen stammen. Abhilfe schafft hier nur ein eigenes, auf die Bedürfnisse der Seesedimentanalyse zugeschnittenes Monitoringprogramm. Langfristig angelegte Strukturen wie das Erdsystem-Observatorium Zentralasien des GFZ bilden die ideale Grundlage für ein solches Monitoring, das normalerweise den zeitlichen Rahmen von befristeten Projekten sprengt.

Im Sommer 2011 wurde eine erste Thermistorenkette zur Aufzeichnung der Wassertemperaturen im 3000 m hoch gelegenen Son-Kul ausgebracht. Wind, Wetter und Vandalismus können dabei das Seemonitoring immer wieder erschweren. Strömungen in den Tiefen eines Sees können Moorings (im Seeboden verankerte und mittels Auftriebskörpern im Wasser „stehende“ Seile mit daran befestigten Geräten) versetzen, ebenso driftendes Eis, das die Oberflächenbojen erfasst und mit ihnen das Mooring verschleppt oder zerstört. Neugierige Besucher wollen ein Souvenir mitnehmen, oder Angler entwenden eine Boje oder ein Stück Seil und vernichten damit die Daten eines Jahres und tausende Euro an Werten. Daher wurden besonders wertvolle und empfindliche Geräte für Eis und Besucher unerreichbar verankert. An der Seeoberfläche befindet sich keine Boje zum Auffinden und Bergen des Moorings, sondern das gesamte System hängt an einem sogenannten „Releaser“, der es erst nach Empfang eines codierten Schallimpulses an die Seeoberfläche zurückschickt.



**Kontakt:** J. Mingram  
(jens.mingram@gfz-potsdam.de)





Abb. 1: Karte mit Paläoklima-Untersuchungsstandorten des GFZ in Kirgisistan

Fig. 1: Map with palaeoclimate investigation sites of GFZ in Kyrgyzstan

Das Monitoringprogramm konzentriert sich auf den Sary-Chelek und seine südlichen Nebenseen, da hier im Herbst 2013 die ersten rezenten jahreszeitlich geschichteten Sedimente (Warven) gewonnen werden konnten. Seit September 2013 stehen im Sary-Chelek zwei Moorings mit Temperaturloggern bei 200 m und 90 m Wassertiefe, eine automatische Sedimentfalle bei 90 m Wassertiefe (Abb. 2), und ein Mooring mit Leitfähigkeits- und Sauerstoffgehaltsloggern bei 200 m Wassertiefe. Im Aram-Köl, einem der Nebenseen des Sary-Chelek, hängt zudem eine einfache Zylinderfalle und ein weiteres Mooring mit Temperatur-, Leitfähigkeits- und Sauerstoffloggern. Seespiegeländerungen können über im Wasser angebrachte Drucksensoren erfasst werden. Zur Aufzeichnung von Wetterdaten wurde direkt am Seeufer eine kleine Wetterstation aufgebaut, die neben den Standardparametern Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag (nur Regen), rel. Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Windgeschwindigkeit auch die Globalstrahlung und die sogenannte photosynthetisch aktive Strahlung (engl. Photosynthetically Active Radiation, PAR) misst. Auf dem Gelände der Wetterstation wurden dazu noch zwei Passiv-Staubsammler aufgestellt, deren Proben monatlich gewonnen werden.

Neben den automatisch laufenden Langzeitmessungen, für die einmal jährlich zum Auslesen der Daten, Proben- und Batteriewechsel alle Moorings gehoben werden müssen, werden während jeder Feldsaison Profile diverser Wasserparameter an

verschiedenen Stellen des Sees mit Sonden gemessen (Abb. 3), eine Driftboje mit Datentransfer via Satellit gibt Auskunft über die Oberflächenströmungen des Sees, und mittels Unterwasserkamera werden Videoaufnahmen des Seebodens gemacht.



Abb. 2: Ausbringen einer automatischen Sedimentfalle (Technicap PPS 3/3) mit 0,125 m<sup>2</sup> Auffangöffnung auf dem Sary-Chelek (Foto: J. Mingram, GFZ)

Fig. 2: Deploying of an automatic sediment trap (Technicap PPS 3/3) with 0.125 m<sup>2</sup> collecting aperture at Lake Sary-Chelek

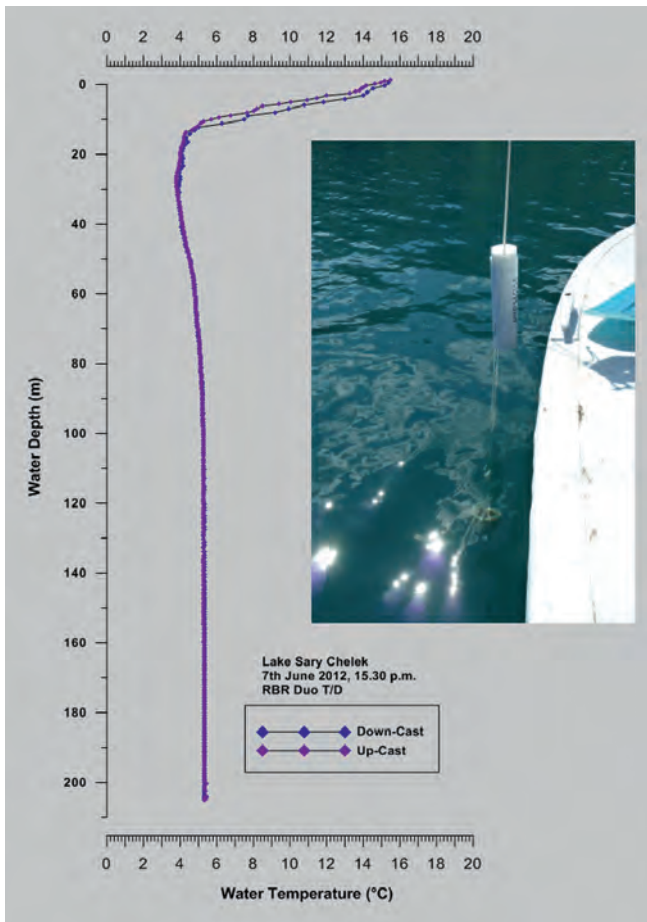


Abb. 3: Schnelle Sonde (RBR Duo T/D) zur Messung von Temperatur und Druck, und das erste vollständige Temperaturprofil des Sary-Chelek vom Juni 2012 (Foto: J. Mingram, GFZ)

Fig. 3: Fast-response probe (RBR Duo T/D) for measurement of temperature and pressure, and very first complete temperature profile of Lake Sary-Chelek obtained in June 2012

## Staubmonitoring

Atmosphärische Staubeinträge stellen eine wesentliche Komponente in der Sedimentzusammensetzung zentralasiatischer Seen dar. Seit Sommer 2010 führt das GFZ kontinuierliche Messungen der Korngrößenzusammensetzung des Staubs und meteorologischer Parameter in einer hohen zeitlichen Auflösung mittels einer mobilen Messstation im nördlichen Vorgebirge des Tien Shan auf einer Höhe von 1740m durch (Abb.4). Die Daten werden täglich unter Nutzung des BEGAN-Satellitensystems an das GFZ übermittelt. Zusätzlich wird die Partikelfraktion  $>2,5\mu\text{m}$  mit Hilfe eines „High-Volume-Impactors“ über Intervalle von drei Tagen zur anschließenden analytischen Bearbeitung gesammelt. Aus den gewonnenen Daten, der Berechnung von „Rückwärts-Trajektorien“ und optischen Satellitendaten werden

Zusammenhänge zwischen der Staubkonzentration, physikalischen, chemischen und isotopischen Staubparametern und der saisonalen Variabilität der atmosphärischen Zirkulation über Eurasien, bzw. zu den Quellgebieten des Staubs unter dem gegenwärtigen Klimaregime abgeleitet (Schettler et al., J. Asian Earth Sci., in review).

Am Nordrand des Tien Shan überlagern lokale tageszeitliche Variationen von Temperatur, Windrichtung und -stärke Variationen in der hemisphärischen Zirkulation. Besonders im Sommer herrscht lokal Wind aus nördlichen Richtungen vor, der sich im Lauf des Tages verstärkt, sich nachts abschwächt und vornehmlich hangabwärts aus südlichen Richtungen weht. An der Meßstation geht damit eine Verringerung der Staubkonzentration einher.

Die regionale Staubkonzentration wird durch Silt ( $2\mu\text{m}$  bis  $<63\mu\text{m}$ ) dominiert. Die Massekonzentration dieser Partikelfraktion übersteigt die feinerer Partikel um das nahezu Zehnfache. Über das Jahr zeigt die Korngrößenzusammensetzung der Siltfraktion typischerweise ein Maximum zwischen  $2$  und  $4\mu\text{m}$  und ein Minimum bei  $8\mu\text{m}$  (Abb. 5). Der Gehalt an löslichen Salzen in der dominanten Siltfraktion betrug für den Monitoringzeitraum Juli 2010 bis Oktober 2012 im Mittel 14% und variierte zwischen 1 und 47%. Dabei überstieg der Molanteil von Nitrat mit durchschnittlich 60% den von Sulfat (28%) und Chlorid (10%). Die hohen Nitrat- und Sulfatgehalte reflektieren eine extensive Wechselwirkung des karbonathaltigen Staubs mit Salpetersäure- und Schwefelsäureaerosolen in der Atmosphäre. Es kann zwischen primärem pedogenem Gips und sekundär gebildetem Calciumsulfat unterschieden werden. Saisonale hohe Nitrat- und erhebliche Gehalte an löslichem Phosphor und Eisen belegen einen signifikanten Einfluss des äolischen Nährstoffeintrags auf die aquatischen Ökosysteme Zentralasiens.



Abb. 4: Mobile Staubmonitoringstation bei Bischkek (Foto: G. Schettler, GFZ)

Fig. 4: Mobile dust monitoring station near Bishkek



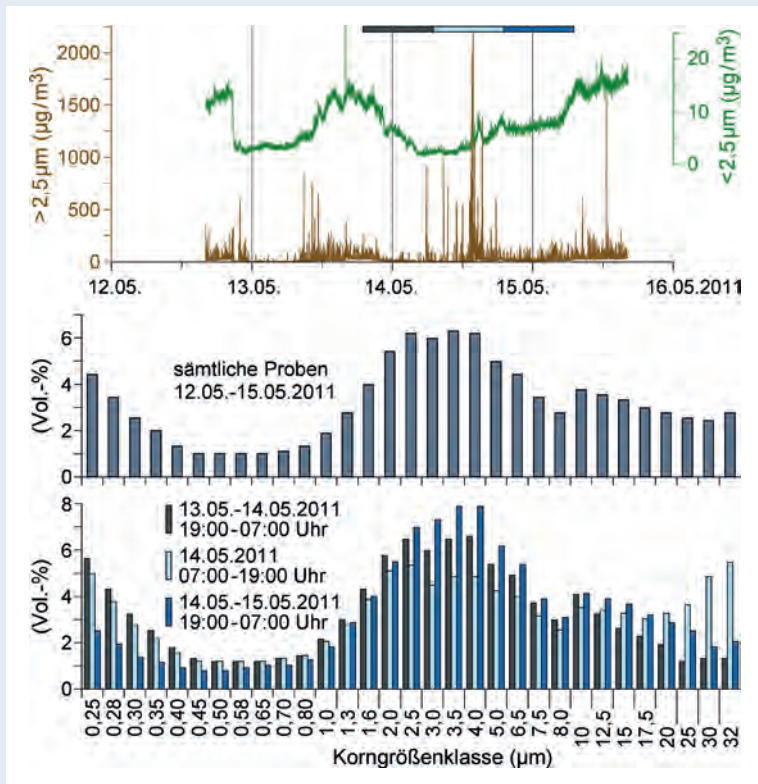


Abb. 5: Tageszeitliche Variationen in der Korngrößenzusammensetzung und der atmosphärischen Staubkonzentration für einen ausgewählten Zeitraum von drei Tagen im Mai 2011

Fig. 5: Diurnal variations in the atmospheric dust concentration and grain-size composition for a selected 3-days monitoring period in 2011

Eine weitere Charakteristik des Staubs stellt die erhebliche Anreicherung volatiler Spurenmetalle (Cd, Pb, Tl, Bi, Sn) gegenüber der mittleren Zusammensetzung der oberen Erdkruste dar (Tab. 1). Die Spurenelementanreicherung ist anthropogenen Ursprungs und reflektiert die Emission dieser Elemente während der Hochtemperaturverbrennung organischen Materials und während metallurgischer Prozesse.

Die Staubzusammensetzung und lokale meteorologische Daten werden mit der Herkunft der Luftmassen korreliert, die die Beobachtungstation erreichen. Zwischen dem 7. und 10. April 2011

verlagerte sich z.B. die Herkunft der Luftmassen und ihre Trajektorien südwärts (Abb. 6). Diese Veränderungen in der hemisphärischen Zirkulation korrelierten mit einer Verringerung der Luftfeuchte, einer Vergrößerung in der Korngrößenzusammensetzung, einer Zunahme im Gehalt an pedogenem Gips und Calciumkarbonat sowie einem verringerten Anteil an Partikeln von industriellen Emissionen. Eine Verringerung des Nitratgehalts wurde nicht festgestellt, weil die Luftmassen Lokalitäten mit hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen entlang des Persischen Golfs und entlang der urbanen Zentren in Usbekistan (Taschkent, Ferganabecken) passierten.

Tab. 1: Ausgewählte chemische Charakteristiken (Me/Al[Staub]/Me/Al[UCC]; UCC = Zusammensetzung der oberen kontinentalen Kruste (Upper continental crust composition) nach Rudnick und Gao (2003)) der mittels High-Volume-Impactor während eines Intervalls vom 12. bis 15. Mai 2011 gesammelten Staubfraktion (>2,5 µm)

Tab. 1: Selected chemical characteristics (Me/Al[Dust]/Me/Al[UCC]; UCC = Upper continental crust composition after Rudnick und Gao (2003)) of dust collected from 12<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> of May 2011 using an High-Volume Impactor

Cd/Al	Pb/Al	Zn/Al	Bi/Al	Sn/Al	Tl/Al	Ni/Al	Cu/Al	V/Al	Co/Al	Sc/Al
171	19,2	6,6	9,5	4,0	1,4	3,3	3,0	1,2	1,1	1,1

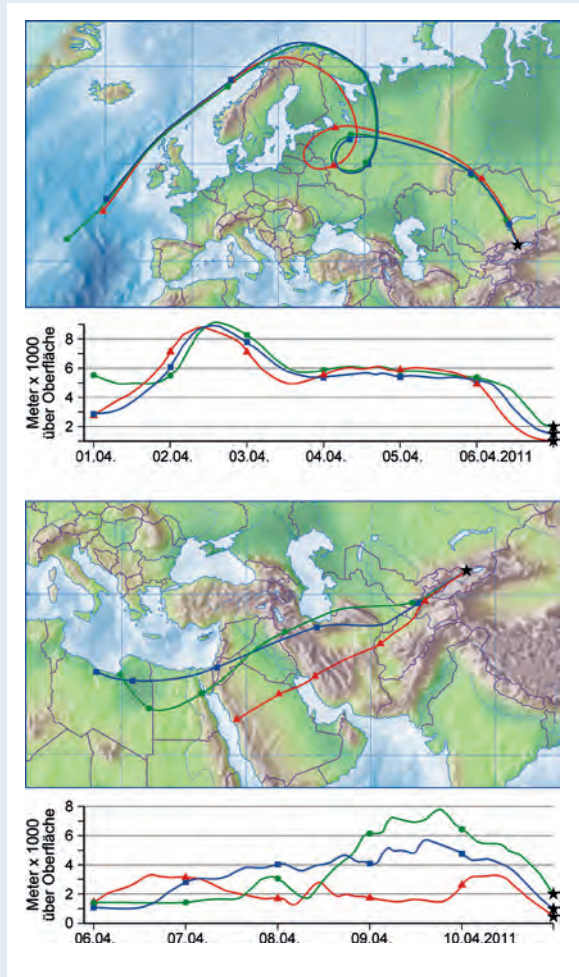


Abb. 6: Beispiel für die Herkunftsverlagerung und Trajektorien der Luftmassen, die Anfang April 2011 Kirgisistan erreichten; Berechnungen basierend auf dem Modell NOAA HYSPLIT (Draxler, R. R. und Hess, G. D., 1997), Job IDs: 385608 und 315661

Fig. 6: Example of backward trajectory calculations based on NOAA HYSPLIT model (Draxler, R. R. and Hess, G. D., 1997), Job IDs: 385608 and 315661 for two periods in April 2011

## Paläoklimaforschung an Seesedimenten aus Kirgisistan

Als Teil der paläoklimatischen Forschungsaktivitäten in Zentralasien werden zurzeit im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts „Central Asian Climate Dynamics“ (CADY) mehrere Seesedimentbohrkerne analysiert, die während der vergangenen beiden Jahre in Kooperation mit dem ZAIAG aus dem Son Kul, dem Chatyr Kul und dem Sary-Chelek gewonnen werden konnten. Zur Anwendung kommen dabei am GFZ vorrangig sedimentologisch-geochemische Analysemethoden (z. B. Mikrofaziesanalysen anhand von Großdünnschliffen, geochemische Untersuchungen mittels hochauflösendem  $\mu$ XRF-Scanning, Messungen des organischen Kohlenstoffgehalts und der Verhältnisse stabiler Isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) in den Sedimenten), die durch mikropaläontologische (TU Braunschweig und Senckenberg Forschungsstation für Quartärpaläontologie, Weimar) und biogeochemische Untersuchungen (Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena) ergänzt werden. Ziel dieser Arbeiten ist die möglichst umfassende Rekonstruktion der regionalen Klimaentwicklung während der letzten 10 000 Jahre.

Die Analyse eines Sedimentbohrkerns aus dem Son Kul in Zentralkirgisistan, der etwa den Zeitraum der letzten 6000 Jahre abdeckt, zeigt deutliche, teils zyklische Veränderungen verschiedener Proxyparameter, die höchstwahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit Klimaveränderungen stehen. So lässt sich anhand der biogeochemischen Daten feststellen, dass die Klimaentwicklung im kirgisischen Tien Shan seit dem Mittelholozän durch einen nur relativ leichten Rückgang der Sommerniederschläge gekennzeichnet ist. Dies ist weitgehend konsistent mit anderen regionalen Paläoklimadatensätzen und steht vermutlich mit dem dominanten regionalen Einfluss der seit dem Mittelholozän verstärkten Westwindzirkulation in Zusammenhang. Interessanterweise zeigen die Analysen der Sedimente des Son Kul neben der graduellen Aridisierung bzw. Abnahme der Sommerniederschläge auch mehrere Phasen erhöhten Eintrags von Bodenmaterial aus dem Einzugsgebiet in den See. Der erhöhte terrestrische Eintrag tritt sowohl während feuchter als auch trockener Episoden auf und ist somit offenbar nicht an die



Abb. 7: Laminierte Seesedimente aus einem Sedimentbohrkern aus dem Chatyr Kul in Südkirgisistan. Der dargestellte Abschnitt zeigt den Bereich zwischen 5,10 und 5,50 m Kerntiefe. Eine  $^{14}\text{C}$ -Datierung an einem Holzstück aus 5,28 m Kerntiefe ergab ein Alter von etwa 10 000 Jahren vor heute (Foto: GFZ).

Fig. 7: Laminated sediments from a sediment core from Lake Chatyr Kul in southern Kyrgyzstan. The displayed section shows the interval between 5.10 and 5.50 m core depth. Radiocarbon dating of a piece of wood from 5.28 m core depth yielded an age of about 10 000 years before present.



generelle Entwicklung der Sommerniederschläge, sondern an einen anderen Auslösemechanismus gekoppelt. Dabei handelt es sich vermutlich um verstärkte Schneeschmelzereignisse während periodisch auftretender Phasen erhöhter Winterniederschlagsintensität. Dies deutet auf einen – zumindest phasenweise – auch während der Wintermonate starken Einfluss der Westwindzirkulation hin, obgleich die klimatischen Mechanismen hinter der beobachteten Periodizität noch unklar sind.

Die Sedimente eines 6,25 m langen Sedimentbohrkerns aus dem Chatyr Kul in Südkirgisistan sind bis auf die obersten 0,6 m durchgehend feinelaminiert (Abb. 7) und decken ersten Datierungen zufolge mindestens die letzten 10 000 Jahre ab. Aus diesem Grund stellen sie ein für diese Region bisher einzigartiges und vielversprechendes Klimaarchiv dar, das für detaillierte und zeitlich hochauflösende Vergleiche mit anderen regionalen Paläoklimadaten genutzt werden kann.

Da der oberste Abschnitt dieses Sedimentbohrkerns aufgrund der fehlenden Lamination jedoch keinen direkten Vergleich mit Rezentdaten zulässt, musste weiter nach einem See mit rezenten Warven gesucht werden. Diese konnten im Herbst 2013 aus einem über 200 m tiefen Becken des Sary-Chelek erbohrt werden. Dort kann dann mittels des Seemonitorings auch eine Kalibrierung der erhobenen Proxydaten an realen Klimaparametern vorgenommen werden.

## Aspekte dendrochronologischer Forschung im Tien Shan Zentralasiens

In Zentralasien sind in jüngster Zeit Forschungsansätze in den Fokus gerückt, welche lange Datenreihen aus Baumjarringanalysen nutzen, die über die instrumentelle Zeitperiode hinausgehen. Mit Hilfe dieser Dendrochronologie lassen sich Veränderungen von Stoffflüssen in Wasser- und Kohlenstoffkreislauf in Interaktion mit regionalen bis globalen Klimaveränderungen in einzigartiger Weise erforschen. Als Teil der terrestrischen Biosphäre befinden sich Bäume im menschlichen Lebensraum an der wichtigen Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre, der sogenannten kritischen Zone. Im Holz der Baumjahre werden Informationen über die Dynamik von Klima, Wasser- und Kohlenstoffkreislauf gespeichert, welche sich durch chemisch-physikalische Analysen entschlüsseln lassen. Die bis zu 2000 Jahre alten Baumbestände (Wacholder, Abb. 8) in den Hochlagen von Tien Shan und Pamir erlauben deshalb die jahrgenaue Analyse der Temperatur- und Niederschlagsvariabilität in dieser von Wassermangel gekennzeichneten Region. Durch statistische Kalibrierungs- und Verifizierungsverfahren mittels instrumenteller Daten des 20. Jahrhunderts können Zeitreihen von Jahrringparametern helfen, die lokalen bis regionalen Auswirkungen des globalen Wandels in Zentralasien abzuschätzen und so hydroklimatische Prognosemodelle zu verbessern. Zudem haben Studien gezeigt, dass die Jahrringanalyse geeignet ist, die Intensität und Häufigkeit von Erdbeben, Hangrutschungen oder Steinschlag in der Region zu rekonstruieren.



Abb. 8: Achthundert-jährige Wacholderbäume (*Juniperus turcestanica*) eines Baumgrenzstandorts im Tien Shan (rund 3500 m ü. NN) (Foto: G. Helle, GFZ)

Fig. 8: 800-year old juniper trees (*Juniperus turcestanica*) at a timberline site of the Tien Shan (ca. 3500 m asl)

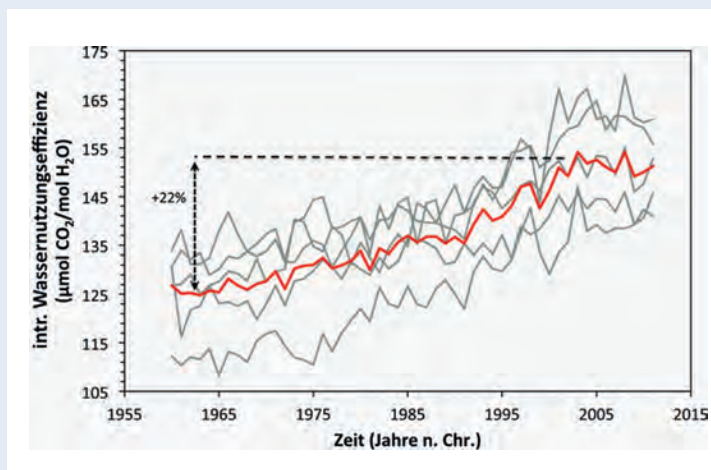


Abb. 9: Verlauf der intrinsischen Wassernutzungseffizienz von fünf Wacholderbäumen des Standorts Sary-Chelek (nach Jivcov, 2013). Zwischen 1960 und 2002 ist ein mittlerer Anstieg von etwa 22 % zu beobachten. Seit 2002 stagniert die intrinsische Wassernutzungseffizienz der untersuchten Bäume aus dem Tien Shan, oder ist sogar leicht rückläufig.

Fig. 9: Trends in the intrinsic water-use efficiency of five juniper trees from Sary-Chelek (after Jivcov, 2013). On average, the intrinsic water-use efficiency has increased by 22 % during the period from 1960 to 2002. Since 2002 the intrinsic water-use efficiency of junipers from Tien Shan is stagnating or slightly declining.

Hier soll ein Aspekt aktueller Forschungen des GFZ vorgestellt werden, der sich mit der Untersuchung des Einflusses der seit 150 Jahren steigenden atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen und der zunehmenden Erwärmung bzw. Trockenheit auf bedeutende zentralasiatische Baumarten befasst. In Zentralasien sind Holzwirtschaft, Walnuss- und Pinienkernproduktion von großer ökonomischer Bedeutung. Es gilt das Anpassungspotential der Bäume in der Region abzuschätzen und mögliche Handlungsempfehlungen für den zukünftigen Anbau zu entwickeln.

Für jedes Kilogramm Kohlenstoff, das durch die Photosynthese von Bäumen aufgenommen wird, werden mehr als 100 kg Wasserdampf durch die Transpiration der Blätter oder Nadeln in die Atmosphäre abgegeben. „Free-air-“ und Laborexperimente haben gezeigt, dass Pflanzen auf erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen kurzfristig reagieren, indem sie den Gasaustausch durch Verringerung der Apertur der Spaltöffnungen ihrer Blätter und Nadeln reduzieren. Dies ermöglicht es ihnen, unter gegebenen klimatischen Bedingungen den Wasserverlust im Vergleich zur Kohlenstoffassimilation einzuschränken, d.h. ihre Wassernutzungseffizienz (water-use efficiency, WUE) zu erhöhen. Denn je höher die WUE ist, umso eher ist ein Baum in der Lage, trockene Perioden ohne Einschränkung der Assimilation, d. h. ohne große Wachstumseinbrüche zu überstehen. Leider ist im Detail nur wenig darüber bekannt, wie sich bestimmte Baumarten langfristig an den Klimawandel und die etwa 35%ige Erhöhung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration seit etwa AD 1850 angepasst haben. Langzeittrends der WUE können somit einerseits einen Beitrag zur Frage von Anpassungsreaktionen der Bäume an den Klimawandel leisten, andererseits lassen sich, gemeinsam mit anderen Informationen, aus WUE-Trends Rückschlüsse auf den Einfluss der Wasserdampftranspiration auf das Klima ziehen. Denn Wasserdampf ist möglicherweise das wichtigste Klimagas (IPCC; 2013). Eine Erhöhung der WUE

infolge der gestiegenen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen der Atmosphäre kann einhergehen mit einer reduzierten Wasserdampfabgabe durch die Transpiration, da die Bäume aufgrund des verbesserten  $\text{CO}_2$ -Angebots die Spaltöffnungen ihrer Blätter oder Nadeln vermehrt schließen und ihre Transpiration einschränken können. Ferner stellt sich die Frage, ob die Bäume auch im Hinblick auf den Holzzuwachs von einer möglichen Erhöhung der WUE profitieren. Deshalb ist es wichtig, Langzeittrends der Wassernutzungseffizienz zu untersuchen und mit den Wachstumstrends zu vergleichen. Mit Hilfe eines neuartigen physikalischen Verfahrens, der Jahrringisotopenanalyse, ist es möglich die langfristigen Veränderungen in der Wassernutzungseffizienz wichtiger Baumarten der Region zu bestimmen und mit ihren Wachstumstrends zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden Wacholderbäume im UNESCO-Biosphärenreservat Sary-Chelek ( $41^{\circ}52'49''\text{N}$ ,  $71^{\circ}59'31''\text{E}$ , 2095 m NN) im Nord-Westen Kirgisistans beprobt und ein Zeitfenster von 52 Jahren (1960 bis 2011) analysiert. Die mit Hilfe der  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse in Jahrringen berechnete Wassernutzungseffizienz wird als intrinsische Wassernutzungseffizienz (WUEi) bezeichnet und kann unmittelbar zu den Jahrringbreiten der untersuchten Bäume in Beziehung gesetzt werden. Bei unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die WUEi während der betrachteten Jahre 1960 bis 2011 um rund 22 % angestiegen ist, aber seit Beginn der 2000er-Jahre stagniert (Abb. 9). Interessanterweise spiegelt sich dieser positive Langzeittrend nicht im Wachstum der Wacholder wider. Die Analyse der Jahrringbreiten zeigte keine Trendänderung im jährlichen Zuwachs. Offensichtlich hat der langfristige Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu einer Verbesserung der Kohlenstoffassimilation, d.h. Photosynthese, geführt, welche allerdings nicht in einer Zunahme der Holzbiomasseakkumulation zum Ausdruck kommt. Weitergehende Untersuchungen sind in Planung, um diese Diskrepanz aufzuklären.





Abb. 10: Untersuchungsgebiet am Südostrand des Ferganabeckens mit Blick auf den Pamir-Alai: Frühjahr mit klarer Luft und grüner Vegetation (links) und Herbst mit hoher Staubbelastung und verdorrter Vegetationsdecke (rechts) (Fotos: B. Plessen, GFZ).

Fig. 10: Study region on the SE-Border of the Fergana Basin with view to the Pamir-Alai: spring with clear air and green vegetation (left) and autumn with high dust pollution and dried up vegetation cover (right).

## Paläoklimaforschung an Speläothemen aus Kirgisistan

Speläotheme (Stalagmiten, Stalagtiten und Kalksinter) bilden exzellente terrestrische Archive für paläoklimatologische und hydrologische Untersuchungen (Cheng et al., 2012). Sie entstehen in Kalksteinmassiven, die unter dem Einfluss von Niederschlag und CO<sub>2</sub> verkarsten. Das Niederschlagswasser nimmt CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und dem Boden auf und bildet aggressives Hydrogenkarbonat, das zur Lösung von Kalziumkarbonat führt. Das gelöste Kalziumhydrogenkarbonat sickert durch das Gestein und kann dann in Hohlräumen durch Entgasung des CO<sub>2</sub> lagenweise ausgeschieden werden. So entstehen laminierte Speläotheme, die eine Vielzahl umweltabhängiger Informationen enthalten. In Kirgisistan gibt es in devonischen und karbonischen Kalksteinmassiven gut kartierte Höhlen, die ein großes Potential für paläoklimatische Studien enthalten. Insbesondere die Region um Osh am Südostrand des Ferganabeckens und am Fuß des Alay und Pamir ist von kirgisischen Höhlenforschern wie S. D. Dudashvili und W. N. Michajilow gut dokumentiert. Die Region um das Ferganabecken ist hochempfindlich für Klimagefährdungen wie Überschwemmungen und Dürren und daraus resultierender politischer Konflikte. Änderungen der interannuellen Niederschlagsmuster Zentralasiens haben einen direkten Einfluss auf die Wasserressourcen.

In Zusammenarbeit mit S. Breitenbach (ETH Zürich) und Chr. Wolff (Universität Potsdam) starteten wir im Oktober 2011 unter der Leitung von A. Dudashvili (ZAIAG) die erste von bisher

drei Expeditionen, um geeignete Höhlen zu erkunden und um ein umfangreiches Monitoring zur Aufnahme von Temperatur, Feuchtigkeit, Tropf- und Regenwasser und rezentem Kalzitwachstum zu installieren.

Speläotheme können sehr genau mit der auf dem radioaktiven Zerfall von Uran basierenden <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U-Methode datiert werden. In reinen Karbonaten wird aufgrund des unterschiedlichen geochemischen Verhaltens von Thorium und Uran nur das lösliche Uran eingebaut, nicht aber Thorium. Das Mutterisotop Uran zerfällt über die Zeit zu Thorium; so können über die massenspektrometrische Messung der Gehalte die Entstehungsalter auf über 500 000 Jahre zurück kalkuliert werden. Die Altersbestimmungen unserer Proben werden vom Team um H. Cheng an der Universität Minnesota durchgeführt. Ein erster präzise datierter Stalagmit aus der durch Bergbau aufgeschlossenen Uluu-Too-Höhle im Süden des Ferganabeckens enthält eine hochaufgelöste Klimageschichte der letzten 5000 Jahre, während andere Proben aus derselben Höhle noch weit älter sind.

## Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen an natürlichen Klimaarchiven bilden die Basis, zusammen mit den umfassenden Daten aus dem Limno-, Dendro-, Speläo- und Staubmonitoring, um ein präzises Bild der Klima- und Umweltveränderungen der Region zu rekonstruieren und regionale Klimamodellierungen zu verbessern. So können verlässlichere



Abb. 11: Vertikalbohrer zur hochauflösenden Beprobung ( $<100\ \mu\text{m}$ ) von Speläothemen für die Messung der stabilen Isotopenverhältnisse des Kohlen- und Sauerstoffs (links), Karbonatauflösungseinheit KIEL IV und Isotopenverhältnis-Massenspektrometer MAT 253 (rechts) (Fotos: B. Plessen, GFZ)

Fig. 11: Vertical miller for high resolution sampling ( $<100\ \mu\text{m}$ ) of speleothems for stable isotope measurements of carbon and oxygen (left), Carbonate dissolution unit KIEL IV and isotope ratio mass spectrometer MAT 253 (right)

Aussagen über die zukünftige Klimaentwicklung, vor allem im Hinblick auf den vom Menschen induzierten Klimawandel, getroffen werden. Zukünftig sollen neben Kirgisistan auch andere Länder der Region wie Kasachstan, Tadschikistan und China in unsere Forschungen einbezogen werden. So ist neben dem bereits bestehenden „Kirgisisch-Deutschen Labor für Dendrochronologie und Waldökologie“ in Bischkek ein zentralasiatisches dendrochronologisches Netzwerk geplant.

## Zitierte und weiterführende Literatur

- Brauer, A., Mingram, J. (2011): Warvierte Seeablagerungen: ein hochgenaueres natürliches Klima- und Umweltarchiv der Kontinente - In: Hüttl, R. F. J. (Ed.), Ein Planet voller Überraschungen: neue Einblicke in das System Erde, Heidelberg, 234-239.
- Cheng, H., Zhang, P. Z., Spötl, C., Edwards, R. L., Cai, Y. J., Zhang, D. Z., Sang, W. C., Tan, M., An, Z. S. (2012): The climatic cyclicity in semiarid central Asia over the past 500,000 years. - *Geophysical Research Letters*, 39, 1, L01705, 10.1029/2011GL050202.
- Draxler, R. R., Hess, G. D. (1997): Description of the HYSPLIT\_4 modeling system, (NOAA technical memorandum/National Oceanic and Atmospheric Administration: ERL, Environmental Research Laboratories: ARL, Air Resources Laboratory; 224), Silver Spring, 24 p.
- Esper, J., Shiyatov, S. G., Mazepa, V. S., Wilson, R. J. S., Graybill, D. A., Funkhouser, G. (2003): Temperature-sensitive Tien Shan tree-ring chronologies show multi-centennial growth trends. - *Climate Dynamics*, 21, 7-8, 699-706, 10.1007/s00382-003-0356-y.
- Jivcov, S. (2013): Dendroklimatische Analysen von *Juniperus seravschanica* aus Kirgistan, Diplomarbeit, Universität Bonn.
- Oberhänsli, H., Novotná, K., Pířková, A., Chabrilat, S., Nourgaliev, D. K., Kurbaniyazov, A. K., Grygar, T. (2011): Variability in precipitation, temperature and river runoff in W Central Asia during the past ~2,000 years. - *Global and Planetary Change*, 76, 1-2, 95-104, 10.1016/j.gloplacha.2010.12.008.
- Rudnick, R. L., Gao, S. (2004): Composition of the continental crust. - In: Rudnick, R. L. (Ed.), *Treatise on Geochemistry: Volume 3, The Crust*, Amsterdam, 1-64.
- Seibt U, Rajabi, A., Griffiths, H., Berry, J. A. (2008): Carbon isotopes and water use efficiency - sense and sensitivity. - *Oecologia*, 155, 3, 441-454, 10.1007/s00442-007-0932-7.
- Shnitnikov, A. V. (1980): *Ozera Tjan-Shanja i ikh istoriya = Seen des Tien-Shan und ihre Geschichte*, Leningrad, 323 p. (Russ.)