

BMBF–Verbundprogramm
Zentralasien – Monsundynamik & Geoökosysteme

Abschlussbericht

Verbundprojekt

CADY
(Central Asian Climate Dynamics)

Förderkennzeichen 03G0813

Koordination

Prof. Dr. Achim Brauer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion 5.2 –
Klimadynamik und Landschaftsentwicklung
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Tel.: +49 331 288 1330

Fax: +49 331 288 1302

E-Mail: achim.brauer@gfz-potsdam.de

Inhaltsverzeichnis

Teilprojekte, Zuwendungsempfänger und Projektbearbeitung	2
Berichtsblätter	4
Kurzdarstellung	9
Aufgabenstellung	10
Voraussetzungen	12
Planung und Ablauf des Vorhabens	13
Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	16
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
Eingehende Darstellung	19
Teilprojekt 1: Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in	20
Zentralasien mit Seesedimenten	
Teilprojekt 2: Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in	60
Zentralasien mit Seesedimenten – Umweltmonitoring und Proxykalibration	
Teilprojekt 3: Hochaufgelöste dendroklimatische Multi-Parameter-Studien	76
– Monsundynamik des 20. Jahrhunderts vor dem Hintergrund der letzten 1500 Jahre	
Teilprojekt 4: Klimamodellierung auf globalen und regionalen Skalen von	84
der Vergangenheit zur Zukunft	
Literatur	97
Anhang	107

Abschlussbericht Verbundprojekt CADY

Teilprojekt	Zuwendungsempfänger	Förderkennzeichen	Laufzeit
TP1 Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten	Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung	03G0813A	01.05.2011 – 31.08.2014*
	Technische Universität Braunschweig Institut für Geosysteme und Bioindikation	03G0813B	
	Senckenberg Forschungsinstitute und Naturmuseen Forschungsstation für Quartärpaläontologie Weimar	03G0813C	
	Freie Universität Berlin Institut für Geographische Wissenschaften	03G0813D	
	Max-Planck-Institut für Biogeochemie Forschungsgruppe Molekulare Biogeochemie	03G0813E	
TP2 Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten – Umweltmonitoring und Proxykalibration	Friedrich-Schiller-Universität Jena Institut für Geographie	03G0813F	01.05.2011 – 31.08.2014*
TP3 Hochaufgelöste dendroklimatische Multi-Parameter-Studien – Monsundynamik des 20. Jahrhunderts vor dem Hintergrund der letzten 1500Jahre	Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung	03G0813A	01.05.2011 – 31.08.2014*
TP4 Klimamodellierung auf globalen und regionalen Skalen von der Vergangenheit zur Zukunft	Freie Universität Berlin Institut für Meteorologie	03G0813D	01.05.2011 – 31.08.2014*
TP5 Projektkoordination	Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung	03G0813A	01.05.2011 – 31.08.2014*

* Projektlaufzeit bis 30.04.2014, kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit bis 31.08.2014

Teilprojekte, Zuwendungsempfänger & Projektbearbeitung

Teilprojekt	Zuwendungsempfänger	Projektbearbeitung
TP1	<p>Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung</p> <p>Technische Universität Braunschweig Institut für Geosysteme und Bioindikation</p> <p>Senckenberg Forschungsinstitute und Naturmuseen Forschungsstation für Quartärpaläontologie Weimar</p> <p>Freie Universität Berlin Institut für Geographie Wissenschaften</p> <p>Max-Planck-Institut für Biogeochemie Forschungsgruppe Molekulare Biogeochemie</p>	<p>Prof. Dr. A. Brauer, Dr. habil. S. Prasad, Dr. S. Lauterbach¹, Dr. J. Mingram, Dr. B. Plessen, Dr. G. Schettler, S. Pinkerneil²</p> <p>Prof. Dr. A. Schwalb, Dr. A. Schwarz, S. Glodniok³, K. Ptach³, S. Picht³</p> <p>Dr. M. Stebich, Dr. F. Schlütz¹, S. Hettler-Riedel⁴, S. Hildebrandt⁴</p> <p style="text-align: center;">Dr. P. Hoelzmann</p> <p style="text-align: center;">Prof. Dr. G. Gleixner, R. Witt⁴</p>
TP2	Friedrich-Schiller-Universität Jena Institut für Geographie	Prof. Dr. R. Mäusbacher, Dr. G. Daut, Dr. T. Haberzettl, Dr. J. Baade, Dr. J. Wang ¹
TP3	Deutsches GeoForschungsZentrum Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung	Dr. G. Helle, H. Pieper ⁴
TP4	Freie Universität Berlin Institut für Meteorologie	Prof. Dr. U. Cubasch, B. Fallah ⁴
TP5	Deutsches GeoForschungsZentrum Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung	Prof. Dr. A. Brauer, Dr. habil. S. Prasad, Dr. S. Lauterbach ¹ , Dr. J. Mingram

¹ PostDoc

² Technische/r Mitarbeiter/in

³ Student/in

⁴ Doktorand/in

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbereich	
3. Titel BMBF-Verbundprojekt CADY (Central Asian Climate Dynamics) Teilprojekt 1 (TP1): Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. A. Brauer, Dr. habil. S. Prasad, Dr. S. Lauterbach, Dr. J. Mingram, Dr. B. Plessen, Dr. G. Schettler, S. Pinkerneil, Prof. Dr. A. Schwalb, Dr. A. Schwarz, S. Glodniok, K. Ptach, S. Picht, Dr. M. Stebich, Dr. F. Schlütz, S. Hettler-Riedel, S. Hildebrandt, Dr. P. Hoelzmann, Prof. Dr. G. Gleixner, R. Witt	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2014	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung Telegrafenberg 14473 Potsdam (Koordination)	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 03G0813A – 03G0813E	
	11. Seitenzahl 40 (Eingehende Darstellung)	
16. Zusätzliche Angaben	13. Literaturangaben	
	14. Tabellen 1 (Eingehende Darstellung)	
	15. Abbildungen 24 (Eingehende Darstellung)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock November 2014		
18. Kurzfassung Im Rahmen des Teilprojektes 1 wurden Sedimente aus den Seen Son Kol und Chatyr Kol (Kirgistan) sowie Sihailongwan (Nordostchina) sedimentologisch, (bio)geochemisch und mikropaläontologisch analysiert um klimatisch-hydrologische Veränderungen in Zentralasien während des Holozäns zu rekonstruieren. In den Sedimenten des Son Kol lassen sich während der letzten ca. 6000 Jahre neben einem moderaten Aridisierungstrend zyklische Phasen erhöhter Winterniederschlagsintensität nachweisen. Diese zeigen eine gute zeitliche Übereinstimmung mit Klimafluktuationen im Nordatlantikraum und somit einen signifikanten Einfluss klimatischer Veränderungen im Bereich des Nordatlantiks auf das Klimageschehen in Zentralasien. Die vorliegenden Daten vom Chatyr Kol zeigen ebenfalls deutliche Klimaveränderungen mit relativ feuchten Klimabedingungen während des Großteils des Holozäns und einem relativ späten Aridisierungstrend ab etwa 2000 Jahren vor heute. Darüber hinaus konnten anhand der Pollendaten aus den Sedimenten des Sihailongwan quantitative Rekonstruktionen der Sommertemperatur und Jahresniederschlagsmenge in Nordostchina durchgeführt werden. Beide Parameter zeigen während des Holozäns zyklische Fluktuationen, wobei während des Frühholozäns vor allem Temperaturänderungen und während des Spätholozäns Niederschlagsänderungen die regionale Vegetationsentwicklung beeinflussten.		
19. Schlagwörter Klima, Holozän, Seesedimente, Pollen, Geochemie, Geochemie, Ostrakoden, Diatomeen, Kirgistan, China		
20. Verlag	21. Preis	

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel BMBF-Verbundprojekt CADY (Central Asian Climate Dynamics) Teilprojekt 2 (TP2): Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten –Umweltmonitoring und Proxykalibration		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. R. Mäusbacher, Dr. G. Daut, Dr. T. Habertzettl, Dr. J. Baade, Dr. J. Wang		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2014
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Friedrich-Schiller-Universität Jena Institut für Geographie Löbdergraben 32 07743 Jena		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 03G0813F
		11. Seitenzahl 16 (Eingehende Darstellung)
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben
		14. Tabellen – (Eingehende Darstellung)
		15. Abbildungen 11 (Eingehende Darstellung)
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock November 2014		
18. Kurzfassung Im Rahmen des Teilprojekts 2 wurden mittels eines umfassenden limnologischen Monitorings die aktuell im Nam Co (Tibet-Plateau) ablaufenden Materialtransport- und Sedimentationsprozesse untersucht. Ziel war dabei, durch das detaillierte Verständnis der Prozessdynamik und die Erfassung und Quantifizierung der meteorologischen, hydrologischen und hydrochemischen Einflussfaktoren die Interpretation der aus den Sedimenten gewonnenen Proxydaten bezüglich möglicher Klimasignale in der Gegenwart und Vergangenheit zu verbessern. So liefert die geochemische bzw. sedimentologische Analyse des Zufluss- und Seewassers und des in den Sedimentfallen abgelagerten Materials Informationen über saisonale Unterschiede in der Hydrologie des Sees und der Sedimentation, die direkte Rückschlüsse auf die Produktivität und den Eintrag zu einem bestimmten Zeitpunkt und die entsprechend vorherrschenden Klimabedingungen zulassen. Darüber hinaus können aus den mittels Multiparameter-Sonden erhobenen limnologischen Messgrößen wie z.B. Wassertemperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Trübe wichtige Rückschlüsse auf das Mischverhalten des Sees, die Temperaturbedingungen innerhalb der Wassersäule und die Eisbedeckung sowie Änderungen des Wasserstandes, des Zuflusses und des allochthonen Sedimenteintrags gezogen werden, die wiederum in Verbindung zu den jeweils vorherrschenden Klimabedingungen gesetzt werden können.		
19. Schlagwörter Klima, Monitoring, See, Limnologie, Hydrologie, Materialtransport, Sedimentfallen, Tibet		
20. Verlag	21. Preis	

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel BMBF-Verbundprojekt CADY (Central Asian Climate Dynamics) Teilprojekt 3 (TP3): Hochaufgelöste dendroklimatische Multi-Parameter-Studien – Monsundynamik des 20. Jahrhunderts vor dem Hintergrund der letzten 1500Jahre		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. G. Helle, H. Pieper	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2014	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Sektion 5.2 – Klimadynamik und Landschaftsentwicklung Telegrafenberg 14473 Potsdam	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 03G0813A	
	11. Seitenzahl 8 (Eingehende Darstellung)	
16. Zusätzliche Angaben	13. Literaturangaben	
	14. Tabellen – (Eingehende Darstellung)	
	15. Abbildungen 7 (Eingehende Darstellung)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock November 2014		
18. Kurzfassung Um die zeitlich-räumliche Variabilität der Klimadynamik in Zentralasien während der letzten 1500 Jahre im Detail zu rekonstruieren wurde im Rahmen des Teilprojektes 3 in Kirgistan ein dendroklimatologisches Standortnetzwerk mit insgesamt neun Wacholder- und Fichtenstandorten etabliert, für die Jahrringbreitenchronologien erstellt und dendroklimatologische Studien an Jahrringparametern (Jahrringbreite, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) durchgeführt wurden. Des Weiteren wurde eine dendroökologische Monitoringstation aufgebaut, um den Einfluss saisonal variierender Klimagrößen (Temperatur, Feuchte) auf den jährlichen Holzzuwachs und die untersuchten dendroökologischen Parameter zu erfassen. Zur Abschätzung des Einflusses der steigenden atmosphärischen CO_2-Konzentration und der zunehmenden Erwärmung bzw. Trockenheit auf das Baumwachstum wurde anhand von $\delta^{13}\text{C}$-Messungen die intrinsische Wassernutzungseffizienz (WUE_i) berechnet und in Beziehung zu den Jahrringbreiten gesetzt. So konnte nachgewiesen werden, dass die WUE_i während der letzten 50 Jahre um ca. 22 % angestiegen ist, während die Jahrringbreiten keine Trendänderung im Zuwachs zeigen. Somit hat der langfristige Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration scheinbar zu einer Verbesserung der Kohlenstoffassimilation, d.h. Photosynthese geführt, welche allerdings nicht in einer Zunahme der Holzbiomasseakkumulation zum Ausdruck kommt.		
19. Schlagwörter Klima, Holozän, Dendrochronologie, Baumringe, stabile Isotope, Kirgistan		
20. Verlag	21. Preis	

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel BMBF-Verbundprojekt CADY (Central Asian Climate Dynamics) Teilprojekt 4 (TP4): Klimamodellierung auf globalen und regionalen Skalen von der Vergangenheit zur Zukunft		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. U. Cubasch, B. Fallah		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2014
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Freie Universität Berlin Institut für Meteorologie Carl-Heinrich-Becker-Weg 6–10 12165 Berlin		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 03G0813D
		11. Seitenzahl 12 (Eingehende Darstellung)
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben
		14. Tabellen – (Eingehende Darstellung)
		15. Abbildungen 3 (Eingehende Darstellung)
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock November 2014		
18. Kurzfassung Die im Rahmen des Teilprojekts 4 durchgeführten Arbeiten umfassten neben dem Vergleich von Paläoklimasimulationen und proxybasierter Klimarekonstruktionen im Bereich des Indischen Subkontinents auch Sensitivitätstest bezüglich des klimatischen Einflusses des Tibet-Plateaus. Dabei zeigte sich, dass in der Simulation ohne Tibet-Plateau eine deutliche Abschwächung des Asiatischen Sommermonsuns und eine Abschwächung bzw. Verschiebung der atmosphärischen Konvektion über dem Pazifik sowie ein signifikanter Einfluss auf das Klimageschehen im Nordatlantikraum zu beobachten ist. Dies verdeutlicht die Schlüsselrolle des Tibet-Plateaus für das globale Klimageschehen und das Asiatische Monsunsystem. Darüber hinaus wurden Klimasimulationen für die letzten 1000 Jahre bezüglich des Auftretens extremer Dürreperioden in Zentralasien analysiert und mit proxybasierten Klimarekonstruktionen verglichen. Dies diente dazu, Zusammenhänge zwischen globalen klimatischen Veränderungen und Feuchtigkeitsänderungen in Zentralasien besser zu verstehen und die Qualität der Klimamodelle bei der Rekonstruktion kurzfristiger hydrologischer Extremereignisse beurteilen zu können. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Klimasimulationen in der Lage sind, das anhand von Proxydaten rekonstruierte Auftreten extremer Dürren zeitlich und räumlich realistisch wiederzugeben. Darüber hinaus stehen extreme Dürreperioden in Asien in direktem Zusammenhang mit der Ausbildung von El Niño-ähnlichen Bedingungen im zentralen Teil des äquatorialen Pazifiks.		
19. Schlagwörter Klima, Holozän, Modellierung, Dürreperioden, Monsun, Zentralasien, Tibet-Plateau		
20. Verlag	21. Preis	

Kurzdarstellung

Aufgabenstellung

Der globale Klimawandel stellt eine der größten ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Insbesondere für die Länder Zentralasiens, die durch kontinental-aride Klimabedingungen und dadurch bedingte Wasserknappheit geprägt sind, ergeben sich durch den globalen Klimawandel bedeutende Herausforderungen hinsichtlich der Sicherung der Wasserverfügbarkeit, der Nahrungs- und Energieversorgung und letztendlich auch der politischen Stabilität. Da der gesellschaftliche Wohlstand in Zentralasien noch in hohem Maß von Landwirtschaft und Landnutzung und somit von Wasserverfügbarkeit abhängt, ist das Verständnis der Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels auf den regionalen Wasserkreislauf und die limitierten Wasserreserven somit von besonderer Bedeutung.

Die Niederschlagsverteilung und -häufigkeit in Zentralasien und somit die Verfügbarkeit von Wasser ist hauptsächlich von der zeitlich und räumlich variablen Wechselbeziehung zwischen der Westwindzirkulation der mittleren Breiten und dem asiatischen Monsunsystem abhängig. Dieses komplexe Zusammenspiel wird zusätzlich durch Wechselwirkungen zwischen den Ozeanen und der atmosphärischen Zirkulation (z.B. *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), *North Atlantic Oscillation* (NAO)) beeinflusst. Um diese regionalen Zusammenhänge und auch globale Wechselbeziehungen in der atmosphärischen Zirkulation hinreichend zu verstehen und somit belastbare Aussagen über die zukünftige Klimaentwicklung in Zentralasien, insbesondere in Anbetracht des durch den zunehmenden anthropogenen Einfluss fortschreitenden Klimawandels, machen zu können, ist ein umfassendes Verständnis der natürlichen Klimavariabilität erforderlich. Entsprechende Daten lassen sich entweder durch instrumentelle Messungen oder durch proxybasierte Rekonstruktionen gewinnen. Da instrumentelle und historische Klimadaten aber nur relativ kurze Zeiträume abdecken (im besten Fall wenige hundert Jahre) und zudem Klimastationen in den dünn besiedelten Hochgebirgsregionen Zentralasiens selten sind, lassen sich anhand instrumenteller Daten nur begrenzt Aussagen über die natürliche Klimavariabilität vor der verstärkten Einflussnahme durch den Menschen treffen. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, andere Klimaarchive zu erschließen, die längere Zeiträume abdecken.

Neben Eiskernen und Speleothemen stellen Baumringe und Seesedimente im Gebiet Zentralasiens die vielversprechendsten natürlichen Archive dar. Allerdings sind die bisher existierenden Paläoklimaarchive in Zentralasien teilweise durch chronologische Unsicherheiten (insbesondere bei Seesedimenten) und variable Sensitivität gegenüber klimatischen Veränderungen charakterisiert und lassen sich nur schwer untereinander korrelieren, weshalb Aussagen zur Klimavariabilität in der Vergangenheit in der Region bisher nur begrenzt möglich waren.

Vor diesem Hintergrund war das Hauptziel des Verbundprojektes CADY (*Central Asian Climate Dynamics*), die klimatischen und hydrologischen Veränderungen in Zentralasien während des Holozäns anhand neuer, gut datierter, natürlicher Klimaarchive zu rekonstruieren. Mittels eines Multiproxy-Ansatzes sollten dabei unterschiedliche Archive in verschiedenen Zeitscheiben analysiert werden. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung von Seesedimenten und Baumringen

aus Kirgistan, ergänzt durch paläoklimatische Arbeiten an Seesedimenten aus Nordostchina. Darüber hinaus wurde sowohl in Kirgistan als auch an dem auf dem Tibet-Plateau gelegenen See Nam Co ein detailliertes Klima- und Umweltmonitoring durchgeführt, um das Verständnis zum Signaltransfers zu verbessern und die aus den Klimaarchiven gewonnenen Proxydaten anhand realer Messwerte kalibrieren zu können. Mit den aus Archiven gewonnenen Erkenntnissen zu holozänen Umwelt- und Klimaveränderungen in Zentralasien sollten im Anschluss Klimamodellierungen durchgeführt werden, die ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des Verbundprojektes waren. Die Kombination aus Proxydaten und Modellierung sollte final zu einem besseren mechanistischen Verständnis der Klimadynamik in Zentralasien führen.

Das Hauptaugenmerk des Teilprojekts 1 (TP1) lag auf der Nutzung von Seesedimenten für die Rekonstruktion der holozänen Klimaentwicklung in Zentralasien. Zu diesem Zweck wurden Sedimentbohrkerne aus den Seen Son Kol (Zentralkirgistan), Chatyr Kol (Südkirgistan) und Sihailongwan (Nordostchina) im Rahmen des Teilprojekts umfassend sedimentologisch, (bio)geochemisch und mikropaläontologisch analysiert. Darüber hinaus wurde an diesen Seen ein umfassendes Klima- und Umweltmonitoring durchgeführt, um die anhand der Sedimente erhobenen Proxydaten später gegen reale Messwerte kalibrieren zu können und letztendlich (semi)quantitative Aussagen zur Klimavariabilität in der Vergangenheit machen zu können. Des Weiteren wurden auch andere Seen in Kirgistan im Rahmen des Teilprojekts untersucht um potentielle neue Archive für weiterführende Studien in der Region zu identifizieren.

Im Teilprojekt 2 (TP2) sollten exemplarisch am Nam Co die aktuell in einem auf dem Tibet Plateau gelegenen See ablaufenden Prozesse und deren Abbildung in den Seesedimenten untersucht werden, da ohne die Kenntnis der Prozesse die Signalinterpretation aus den Sedimenten nur eingeschränkt möglich ist. Es handelte sich dabei in erster Linie um die Prozesse des vertikalen und horizontalen Materialtransportes, die sich aus der Produktion im und dem Eintrag in den See ergeben. Der Eintrag (Feststoffe, Lösung, Pollen, etc.) in den See wird im Wesentlichen durch Niederschlag und Wind gesteuert und enthält somit ein Klimasignal. Dies wird allerdings in jüngster Zeit von einem anthropogenen Signal überlagert, das sich u.a. aus der intensivierten Landnutzung ergibt. Entsprechendes gilt für die anorganische und organische Sedimentproduktion im See, die ebenfalls direkt oder indirekt Klimasignale aber auch eine anthropogene Überprägung abbildet. Die limnologischen Untersuchungen konzentrierten sich deshalb zum einen auf Prozesse, die von den Zuflüssen geprägt werden und zum anderen auf Prozesse die in der Wassersäule des Sees ablaufen und sowohl zyklische als auch saisonale Änderung umfassen. Beides zusammen steuert in verschiedenen Zwischenschritten den resultierenden Sedimentflux zum Seeboden, aber auch Erosions- und Lösungsvorgänge am Seeboden und in der Wassersäule. Mit der Aufklärung dieser Prozessdynamik sollte ein Beitrag zu einem besseren Verständnis der zurückliegenden und aktuellen Umweltveränderungen auf dem Tibet Plateau geleistet werden.

Das Teilprojekt 3 (TP3) hatte die Aufgabe, anhand der Untersuchung von Baumringen Chronologien von Jahrringparametern (Jahrringbreite, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) eines Standortnetzwerks zu erstellen und saisonale Klimasignale durch geeignetes dendroökologisches Monitoring zu erfassen. Für

die Suche, Beprobung und Erarbeitung neuer, bis zu 1000-jähriger Jahringbreitenchronologien sollte dabei auf Standorte in Kirgistan fokussiert werden. Gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern war zudem geplant, Jahringisotopenzeitreihen von bereits existierenden Jahringbreitenchronologien Zentralasiens für Klimarekonstruktionen zu erstellen. Damit verbunden war das Ziel, ein weiträumiges Netzwerk von Standorten zu initiieren um die Erstellung räumlicher Klimarekonstruktionen zu ermöglichen und den Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Paläoklimaarchiven (Speleotheme, Seesedimente) zu erleichtern. Die allgemeinen Forschungsarbeiten der für das TP3 verantwortlichen Arbeitsgruppe am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ umfassten zum einen die Erstellung langer Zeitreihen von Isotopenverhältnissen aus Baumjarringen für Rekonstruktionen vergangener Klimaverhältnisse sowie pflanzenphysiologischer Eigenschaften, wie z.B. die Rekonstruktion der intrinsischen Wassernutzungseffizienz (WUE_i). Zum anderen sollten Isotopenanalysen genutzt werden, um ein besseres Verständnis ökophysiologischer Prozesse in den regionalen Waldökosystemen zu erlangen. Im Vordergrund stand dabei die Erfassung des Einflusses variierender Klimagrößen (Temperatur, Feuchte) auf den jährlichen Holzzuwachs.

Teilprojekt 4 (TP4) beinhaltete umfassende Modellsimulationen zur Klimaentwicklung in Zentralasien während des Holozäns. Der Fokus lag dabei insbesondere auf dem Vergleich von Modellierungen und Paläoklimadaten aus natürlichen Klimaarchiven. Darüber hinaus sollten neben der Untersuchung von hydrologischen Extremereignissen (Dürren) gezielt die Auswirkungen globaler Klimaänderungen sowie der Einfluss der Orographie des Tibet-Plateaus auf das asiatische Monsunsystem und den Wasserhaushalt in Zentralasien untersucht werden.

Voraussetzungen

Um die im Rahmen des TP1 durchgeführten Multiproxy-Untersuchungen an Seesedimenten realisieren zu können, bedurfte es zuallererst logistischer und personeller Kapazitäten sowie technischer Ausrüstung für die Durchführung von längeren Feldkampagnen sowie Erfahrung bei der Realisation von Seebohrungen unter anspruchsvollen klimatischen und geographischen Bedingungen. Hinsichtlich dieser Anforderungen konnte das TP1 erfolgreich auf die langjährige Expertise sowie die technische Ausrüstung des Deutschen GeoForschungsZentrums und der Firma MKfactory (Potsdam) zurückgreifen. Darüber hinaus standen dem TP1 für die Multiproxy-Untersuchungen an den gewonnenen Sedimentkernen die analytischen Möglichkeiten der beteiligten Partnerinstitutionen in vollem Umfang zur Verfügung.

Die im TP2 vorgesehenen Arbeiten konnten insbesondere aufgrund der langjährigen Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und dem Institute of Tibetan Plateau Research (ITP) der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (CAS) in der geplanten Form durchgeführt werden. Dadurch standen sowohl die Infrastruktur der Station des ITP am Nam Co mit zusätzlichem Personal als auch analytische Kapazitäten in Lhasa zur Verfügung. Insgesamt waren die Randbedingungen des Projektes, besonders die Witterungsbedingungen aber auch die rauen Bedingungen

des Sees deutlich ungünstiger als erwartet. Dies bestätigen auch die Messdaten im Untersuchungszeitraum, die gerade im Herbst zahlreiche Stürme aufzeigen. Obwohl in der Planung Schlechtwettertage eingerechnet waren, hat sich gezeigt, dass die Arbeiten insbesondere im Herbst und Winter auch vom Zugang zur Station und von der Robustheit der verwendeten Ausrüstung abhängen. So kam es wahrscheinlich durch Wellengang zum Abscheren der sequentiellen Sedimentfallen und zum Verlust einer Multiparameter-Sonde. Insgesamt können die organisatorischen Rahmenbedingungen für die Durchführung des Vorhabens als gut bis sehr gut bewertet werden, jedoch haben die ungünstigen Witterungsbedingungen zu deutlichen Verzögerungen beim Aufbau des Messnetzes im Nam Co und bei den Messungen im See geführt.

Die für die im Rahmen des TP3 zur Erstellung von Multi-Parameterzeitreihen aus Jahrringen von Bäumen notwendige Geräteausstattung stand im Dendrochronologielabor des Deutschen Geoforschungszentrums GFZ in vollem Umfang zur Verfügung. Dazu zählen zwei LINTAB Jahrringbreitenmesssysteme, zwei UV-Laser-Mikrodissektionsmikroskope (Leica LMD6500, Zeiss MicroBeam), ein konfokales Laser-Scanning-Mikroskop (Olympus FV300 FLUOVIEW), drei Binokulare, Bildanalysesoftware (z.B. WinDENDRO, WinCELL) zur Zellstrukturanalyse und dendrochronologischen Datierung von Jahrringen, diverse Mikrotomen zur Oberflächenpräparation von Holz für die Bildanalyse sowie drei Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (zwei ThermoFisher Delta V, ein ISOPRIME) mit allen notwendigen Peripheriegeräten zur quantitativen Überführung organischer Substanz bzw. Jahrringzellulose in Messgase. Für die angestrebte Forschungsarbeit im Bereich des Monitoring von Klima-, Umwelt- und Isotopensignalen beim Transfer von Kohlenstoff und Wasser von der Atmosphäre und dem Boden, über die Blätter bis hinein in das Holz der Jahrringe musste die notwendige Analytik und Feldausstattung neu beschafft werden. Dabei sollten Systeme zum Einsatz gebracht werden, welche im Rahmen der Observatorien des Netzwerks TERENO (TERrestrial Environmental Observatories) der Helmholtz-Gemeinschaft erprobt sind, und für deren Betrieb und Wartung erfahrenes technisches Personal am GFZ zur Verfügung stand.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Wesentlichen konnten alle für die erfolgreiche Realisierung des TP1 notwendigen Arbeiten – wenn auch mit gewisser zeitlicher Verzögerung – wie geplant durchgeführt werden. Allerdings musste die ursprünglich für den Sommer 2011 geplante Bohrung auf dem Chatyr Kol aufgrund der späten Projektmittelbewilligung im Mai 2011 und der deshalb nicht ausreichenden Planungsvorlaufzeit (Einstellung des benötigten Personals, Beantragung behördlicher Genehmigungen, Erwerb geeigneter technischer Ausrüstung) auf den Sommer 2012 verschoben werden. Aus diesem Grund und auch durch einige Personalwechsel (insbesondere im Bereich der mikropaläontologischen Analysen) ergab sich eine Verzögerung im gesamten Projektablauf, die bis zum Ende des Projekts nicht vollkommen ausgeglichen werden konnte. Während die Arbeiten an den 2011 aus dem Son Kol gewonnenen Sedimentkernen sowie an den bereits vorhandenen Sedimenten des Sihailongwan innerhalb der Projektlaufzeit planmäßig abgeschlossen werden konnten und

die entsprechenden Resultate teilweise bereits publiziert sind, liegen die Arbeiten an den Sedimenten des Chatyr Kol noch hinter dem ursprünglichen Zeitplan zurück. Zwar wurden im Rahmen der vom Projektträger bewilligten viermonatigen kostenneutralen Verlängerung bis Ende August 2014 noch ausstehende Analysen (insbesondere Radiokarbon-Datierungen und mikropaläontologische Untersuchungen) weitestgehend abgeschlossen, die Publikation der Ergebnisse wird allerdings noch etwas Zeit in Anspruch nehmen.

Obwohl die Projektarbeiten insgesamt weitgehend vollständig und erfolgreich durchgeführt werden konnten, kam es auch im TP2 bei der Durchführung des Vorhabens gegenüber dem geplanten Arbeitsablauf zu nicht unerheblichen, unvorhersehbaren Änderungen, die mehrheitlich witterungsbedingt waren. So musste beispielsweise mit Bewilligung der Mittel im Mai 2011 die Beschaffung der Messgeräte nochmals ausführlich diskutiert werden, da die Kostenvoranschläge nicht mehr in allen Punkten gültig waren und in der Zwischenzeit auch neue Sondentypen mit besseren Spezifikationen verfügbar waren. Durch verlängerte Lieferzeiten ergab sich zusätzlich eine Verspätung bei der Auslieferung der Geräte, so dass die ersten Sonden Anfang August für Funktionstests im Labor zur Verfügung standen. Durch den Austausch einer nicht funktionsfähigen Multiparameter-Sonde konnte der Versand nach Tibet dann erst Ende August erfolgen. Durch eine weitere Verzögerung bei der Zollabfertigung in China war das Einbringen der Sedimentfallen und Sonden in den See durch G. Daut und den im Projekt angestellten Post-Doc J. Wang erst im November 2011, also mit knapp 6 Monaten Verspätung möglich. Dabei wurden Moorings mit sequentiellen und integralen Sedimentfallen zur Erfassung des Sedimentfluxes in der Wassersäule an den jeweils tiefsten Stellen der beiden Teilbecken des Nam Co installiert. An den Moorings wurden zudem Multiparameter-Sonden und Thermistoren installiert, mit denen die wasserchemischen und -physikalischen Grundparameter zeitlich hoch aufgelöst (10 Minuten Taktung) erfasst werden können. Durch einsetzenden Eisgang war aber im November 2011 nur die Bestückung einer Mooring-Station möglich; die zweite projektfinanzierte Mooring-Station sowie eine von der CAS zur Verfügung gestellte dritte Mooring-Station wurden Ende Mai 2012 eingebracht. Dabei musste die erste Mooring-Station, die nach dem ersten Winter unauffindbar war, ebenfalls durch Ausrüstung der chinesischen Partner ersetzt werden. Damit konnte, bei leicht reduzierter Funktionalität, das geplante Messprogramm aufrechterhalten werden. Im Rahmen der Arbeiten zeigte sich, dass aufgrund der Größe und Tiefe des Sees mindestens fünf Personen für das Einbringen und Bergen der Fallen notwendig sind. Die zeitgerechte Durchführung wäre deshalb ohne die sachliche und personelle Infrastruktur der Station des ITP der CAS nicht möglich gewesen. In den Jahren 2012 und 2013 konnten dann planmäßig in regelmäßigen Zeitabständen mobile Messkampagnen mit einer Multiparameter-Sonde, sowie die Entnahme von Wasserproben entlang von Transekten auf dem Nam Co durchgeführt werden, die zur Erfassung der räumlichen Variabilität der Parameter und ereignisinduzierter Variationen dienten. Dazu kamen monatliche Beprobungen ausgewählter Zuflüsse des Nam Co. Auch diese Arbeiten profitierten von der zusätzlichen personellen Unterstützung seitens des ITP. Eine weitere, unvorhersehbare Verzögerung gab es gegen Ende des Messzeitraumes (November 2013), weil durch starken Schneefall die Zufahrt zur Station nicht möglich war und deshalb die Multiparameter-

Sonden und Fallen nicht ausgelesen werden konnten. Die letzten Datensätze konnten deshalb erst nach dem Auftauen des Nam Co und Bergung der Sensoren Ende Juni 2014 gewonnen werden. Verspätungen gab es folglich auch bei einigen Laboranalysen, insbesondere bei der aufwändigen Bearbeitung der Oberflächen- und Kurzkernproben in Beijing und Potsdam sowie der Datenauswertung und der Vorbereitung der Publikationen. Abgesehen von den genannten Rückschlägen und Verzögerungen konnten während der inzwischen 3-jährigen Messkampagne erstmals zeitlich hochaufgelöste Datensätze für einen vom Monsun beeinflussten großen Hochgebirgssee erfasst werden, die auch wichtige Eingangsparameter für die Modellierung der Monsundynamik auf kurzen und langen Zeitskalen darstellen. Insbesondere für die Validierung der Proxies in den jüngsten Sedimenten haben die Messungen, beispielsweise der für die Klimarekonstruktion wichtigen stabilen Isotopen, neue und bislang so nicht berücksichtigte Aspekte ergeben. Die durchgeführten chemischen Analysen erlauben eine verbesserte Interpretation der entsprechenden Proxydaten in den Bohrkernarchiven (z.B. beim Ca/Mg-Verhältnis von Wasser und gefälltten Karbonaten in Relation zur Evaporation). Insgesamt haben sich somit das Untersuchungskonzept und die Installationen als tragfähig erwiesen. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, dass die Konzeption inzwischen von der CAS übernommen und auf andere Seen auf dem Tibet-Plateau übertragen wird.

Zur Durchführung des TP3 bedurfte es einer Sondierung von geeigneten Hochlagenstandorten im Tien Shan sowie der Beprobung der langlebigen Baumarten Wacholder (*Juniperus turkestanica*, *Juniperus seravschanica*) und Fichte (*Picea schrenckiana*) an diesen Standorten. Ferner musste ein geeigneter Standort für die Monitoring-Aktivitäten gefunden werden, an dem möglichst beide genannten Baumarten zu finden sind. Die Auswahl der einzelnen Baumstandorte geschah nach allgemein üblichen ökologischen Kriterien für dendroklimatische Studien. Darüber hinaus wurden die Feldkampagnen in enger Abstimmung mit kirgisischen Partnern und mit Genehmigung der lokalen Behörden geplant, welche zu Projektbeginn noch nicht vorlagen. Die Einholung aller notwendigen Genehmigungen und Kooperationsvereinbarungen mit den örtlichen Autoritäten und wissenschaftlichen Kooperationspartnern beanspruchte die ersten zwei Jahre der Projektlaufzeit; seit 2013 liegen die erforderlichen Unterlagen aber komplett vor. Die Erfüllung der oben genannten Aufgaben erforderte umfangreiche wissenschaftliche Planungen, Modellberechnungen und statistische Analysen. Die Bestimmung stabiler Isotope von Kohlenstoff und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) in organischem Material ist ein komplexes Verfahren mit verschiedenen labortechnischen Arbeitsschritten. Wesentliche Ressourcen des TP 3 wurden deshalb für die arbeits- und zeitintensive Probenvor- und -aufbereitung eingeplant. Dazu gehörte die Durchführung aller notwendigen Arbeitsschritte von der Probennahme im Feld über die mechanische und nass-chemische Probenvor- und -aufbereitung (Zelluloseextraktion) bis hin zur eigentlichen Analyse mittels Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie. Aufgrund der speziellen Struktur der Jahrringe langlebiger Wacholderbäume mussten methodische Probleme (Dissektion und Beprobung von Mikro-Jahrringen, auskeilenden Jahrringen und Jahrringen mit Haselwuchs; siehe unten) gelöst werden, bevor mit der Erstellung 1000-jähriger Jahrringisotopenzeitreihen begonnen werden konnte. Infolge des ungünstigen Zeitpunkts des Projektstarts im Mai 2011

konnten die Monitoring-Untersuchungen zum Klima- und Isotopensignaltransfer von der Atmosphäre, über den Boden und die Nadeln hinein in die Jahrringe erst mit Beginn der Vegetationsperiode 2012 aufgenommen werden.

Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Die Auswahl der im Rahmen des TP1 untersuchten Seen basierte auf dem Ziel, das Verständnis räumlicher und zeitlicher Änderung im komplexen Zusammenspiel zwischen den Westwinden und dem asiatischen Monsunsystem und ihres Einflusses auf die regionale Hydrologie zu verbessern. Für den ariden Teil Zentralasien ist seit dem Mittelholozän nur ein moderater Ardidisierungstrend dokumentiert, der in deutlichem Gegensatz zur Entwicklung zu merklich trockeneren Bedingungen in den asiatischen Monsunregionen steht (Chen *et al.*, 2008). Jedoch fehlen bisher umfassende Informationen zur holozänen Klimaentwicklung aus den hauptsächlich von der Westwindzirkulation beeinflussten ehemaligen Sowjetrepubliken in Zentralasien, um die räumliche und zeitliche Homogenität dieser Entwicklung beurteilen zu können. Insbesondere die wenigen bis Projektbeginn vorhandenen paläoklimatischen Studien an Seesedimenten auf dem Staatsgebiet von Kirgistan (z.B. Ricketts *et al.*, 2001; Beer *et al.*, 2007) ließen nur begrenzte Aussagen über den Verlauf der Klimaentwicklung in der Vergangenheit zu. Da seitens der beteiligten Institutionen des TP1 eine umfassende analytische Ausstattung bezüglich der sedimentologisch-geochemischen (GFZ, FU Berlin), mikropaläontologischen (TU Braunschweig, Senckenberg Forschungsstation für Quartärpaläontologie) und biogeochemischen Analyse (Max-Planck-Institut für Biogeochemie) von Seesedimenten sowie eine weitreichend Expertise im Bereich der Paläoklimaentwicklung in Asien besteht (z.B. Schettler *et al.*, 2006; Yancheva *et al.*, 2007; Stebich *et al.*, 2009; Frenzel *et al.*, 2010; Mügler *et al.*, 2010; Wrozyna *et al.*, 2010), war von den im TP1 geplanten Arbeiten ein substantieller Erkenntnisgewinn in Bezug auf holozäne Klimaentwicklung in Zentralasien zu erwarten.

Vor Beginn des TP2 lagen nur wenige Untersuchungen zur rezenten Limnodynamik von Seen in Hochgebirgsregionen und keinerlei entsprechende Untersuchungen für das Tibet-Plateau vor. Ebenso fehlten Erfahrungen zur Funktion der für ein gezieltes Klima- und Umweltmonitoring unter den gegebenen Umweltbedingungen (z.B. große Höhe, extreme Temperaturen) einzusetzenden Geräte (u.a. Multiparameter-Sonden, Sedimentfallen, Moorings). Zudem hatten die Untersuchungen zur Paläolimnologie und Umweltrekonstruktion auf dem Tibet-Plateau im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms *Tibetan Plateau: Formation - Climate - Ecosystems* (TiP) erhebliche Defizite bei der Ableitung von Klimaindikatoren aus den anhand von Seesedimenten erhobenen Proxydaten gezeigt. Die Arbeitsgruppe der Friedrich Schiller-Universität Jena konnte bei den im TP2 geplanten Arbeiten an frühere Untersuchungen zum aktuellen Sedimenttransport in einem Gebirgssee (z.B. Irmner *et al.*, 2006; Schneider *et al.*, 2010) anknüpfen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten hatten gezeigt, dass die Temperaturschichtung im See und temperaturinduzierte Strömungen den Materialtransport stark beeinflussen und die Produktion im See den saisonalen Schwankungen der klimatischen Parameter folgt. Dabei konnte allerdings eine einfache Bezie-

hung zwischen Niederschlag (Intensität/Menge) und Sedimenteintrag nicht hergestellt werden. Nur bei den höchsten Niederschlagsmengen im Messzeitraum kommt es auch zum stärksten Materialeintrag. Dies deutet auf einen Puffer (z. B. Vegetation) im Einzugsgebiet hin. Insgesamt können über die Erfassung der Materialtransporte und der hydrochemischen Parameter mittels limnologischen Monitorings die sedimentbildenden Prozesse zeitlich hochaufgelöst nachvollzogen werden (vgl. Bluszcz *et al.*, 2008). Unter diesen Voraussetzungen lies sich für die im Rahmen des TP2 am Nam Co auf dem Tibet-Plateau geplanten Arbeiten ein substantieller Erkenntnisgewinn bezüglich des Einflusses klimatischer Parameter auf die Sedimentation im See erwarten, der letztendlich zur verbesserten Interpretation von Proxydaten aus den Seesedimenten genutzt werden sollte.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der direkten Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Teilprojekten innerhalb von CADY (z.B. Kooperation zwischen TP1 und TP3 bei der Durchführung von Geländekampagnen in Kirgistan, Kooperation zwischen TP1 und TP2 bei der Analyse von Diatomeen aus den Sedimentfallen aus dem Nam Co) fand im Laufe des Projektes eine intensive Zusammenarbeit mit anderen Projekten des CAME-Verbundes sowie zahlreichen externen wissenschaftlichen Partnern statt.

Für das TP1 ist als Kooperationspartner vor allem das Central Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG) in Bishkek (Kirgistan) zu nennen, mit dessen Hilfe die Feldkampagnen in Kirgistan durchgeführt wurden. Des Weiteren wurden die Geländearbeiten in Kirgistan durch Vertreter der lokalen Nationalparksaufsichten des Sary Chelek Biosphere Reserve und des Karatal-Japyryk Natural Reserve begleitet. Die radiometrischen Datierungen der Sedimente des Son Kol mittels ^{137}Cs und ^{241}Am wurden in Kooperation mit B. Schnetger vom Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg durchgeführt. Anhand der Pollendaten des Sihailongwan wurden in enger Kooperation mit K. Rehfeld (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung / Alfred-Wegener-Institut Potsdam) und der Arbeitsgruppe um P. Tarasov (Freie Universität Berlin) Biom- und Klimarekonstruktionen sowie Zeitreihenanalysen durchgeführt. Darüber hinaus wurden, hauptsächlich bedingt durch Mitarbeiterwechsel an der Forschungsstation für Quartärpaläontologie in Weimar, auch Pollenanalysen an den Sedimenten des Chatyr Kol in Kooperation mit der Freien Universität Berlin durchgeführt. Für die Extraktion des Blattwassers von Pflanzenproben vom Son Kol und Chatyr Kol wurden die analytischen Kapazitäten des Paul-Scherer-Instituts in Villingen (Schweiz) genutzt. Die Messung der isotopischen Zusammensetzung von rezenten Wasserproben aus Kirgistan erfolgte teilweise durch H. Meyer (Alfred-Wegener-Institut Potsdam). Darüber hinaus wurden während eines Forschungsaufenthalts von R. Witt an der University of Glasgow (Großbritannien) in Kooperation mit J. Toney biogeochemische Analysen an den Sedimenten des Chatyr Kol (Alkenonanalyse) durchgeführt.

Für das TP2 war neben den Projektpartnern in CAME bzw. CADY (siehe oben) das Institute of Tibetan Plateau Research (ITP) der Chinesischen Akademie der Wissenschaften mit seinen Außenstellen in Lhasa und am Nam Co der Hauptkooperationspartner. Nur durch die Bereitstellung von Infrastruktur und Personal (Doktoranden) durch das ITP war die Durchführung des Projektes möglich. Mit der Firma Sea and Sun Technology GmbH (Trappenkamp, Deutschland) wurden die Konzeption des im Nam Co aufgebauten Monitoringnetzwerkes und die an die erwarteten Wertebereiche angepassten Kalibrationen diskutiert, da alle verwendeten Instrumente bislang in entsprechender Höhe noch nicht eingesetzt wurden.

Neben der Kooperation mit dem TP1 bei der Durchführung von Feldkampagnen in Kirgistan arbeitete das TP3 innerhalb des CAME-Verbundes intensiv mit dem Projekt CLASH (Koordinator Prof. A. Bräuning) zusammen. Weitere wichtige externe Partner des TP3 waren die Kyrgyz National Agrarian University (KNAU) in Bishkek (Kirgistan), das Central Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG) in Bishkek (Kirgistan), die Siberian Federal University in Krasnoyarsk (Russland), das V. N. Sukachev Institute of Forest der Russischen Akademie der Wissenschaften in Krasnoyarsk (Russland), das Department of Geography an der Swansea University (Großbritannien), das Paul-Scherrer-Institut in Villigen (Schweiz), das Geographische Institut der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz (Deutschland) sowie das Institut für Geographie an der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen-Nürnberg (Deutschland). Darüber hinaus konnten lokale Forstbehörden gewonnen werden, die im Rahmen des TP3 aufgebaute dendroökologische Messstation am Sary Chelek in Kirgistan zu beaufsichtigen und mit einem Wildschutzzaun zu versehen.

Eingehende Darstellung

Teilprojekt 1: Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten

Zuwendungsempfänger / Förderkennzeichen

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ	03G0813A
Technische Universität Braunschweig	03G0813B
Senckenberg Forschungsstation für Quartärpaläontologie	03G0813C
Freie Universität Berlin	03G0813D
Max-Planck-Institut für Biogeochemie	03G0813E

Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse in Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen

Einleitung

Im Fokus des Teilprojektes 1 (TP1) stand die zeitlich hochauflösende Rekonstruktion von Klimaentwicklung, Vegetationsdynamik und Umweltveränderungen in Zentralasien während des Holozäns anhand der detaillierten Analyse von Seesedimenten aus Kirgistan und Nordostchina. Hauptziel war dabei, räumlich-zeitliche Änderungen in der Wechselwirkung zwischen Westwindzirkulation, asiatischem Monsunsystem und dem Sibirischem Hoch zu erfassen und ihren Einfluss auf die klimatische und hydrologische Entwicklung in der Region während des Holozäns besser zu verstehen. Die dabei anhand von proxybasierten Paläoklimarekonstruktionen gewonnenen Erkenntnisse zur natürlichen Klimavariabilität in der Vergangenheit sollen helfen, in Zukunft verbesserte Aussagen bezüglich der angesichts des globalen Klimawandels zu erwartenden klimatischen, hydrologischen und ökologischen Veränderungen in dieser Region treffen zu können. Unter Leitung des GFZ wurde in Kooperation mit dem Central Asian Institute for Applied Geosciences in Bishkek (CAIAG) zahlreiche Sedimentkerne aus mehreren Seen in Kirgistan (Abb. 1.1) sowie diverse Boden-, Pflanzen- und Wasserproben aus den entsprechenden Einzugsgebieten gewonnen. Diese wurden im Projektverlauf durch die einzelnen Projektpartner des TP1 detailliert sedimentologisch, (bio)geochemisch und mikropaläontologisch analysiert. Darüber hinaus wurde ein umfangreiches Klima- bzw. Umweltmonitoring durchgeführt, um die anhand der Seesedimente erhobenen Proxydaten besser interpretieren zu können. Außerdem wurde ein bereits vorhandener Sedimentkern aus dem See Sihailongwan in Nordostchina (z.B. Schettler *et al.*, 2006) detailliert palynologisch analysiert um auch die holozäne Vegetations- und Klimaentwicklung in dieser Region rekonstruieren zu können.

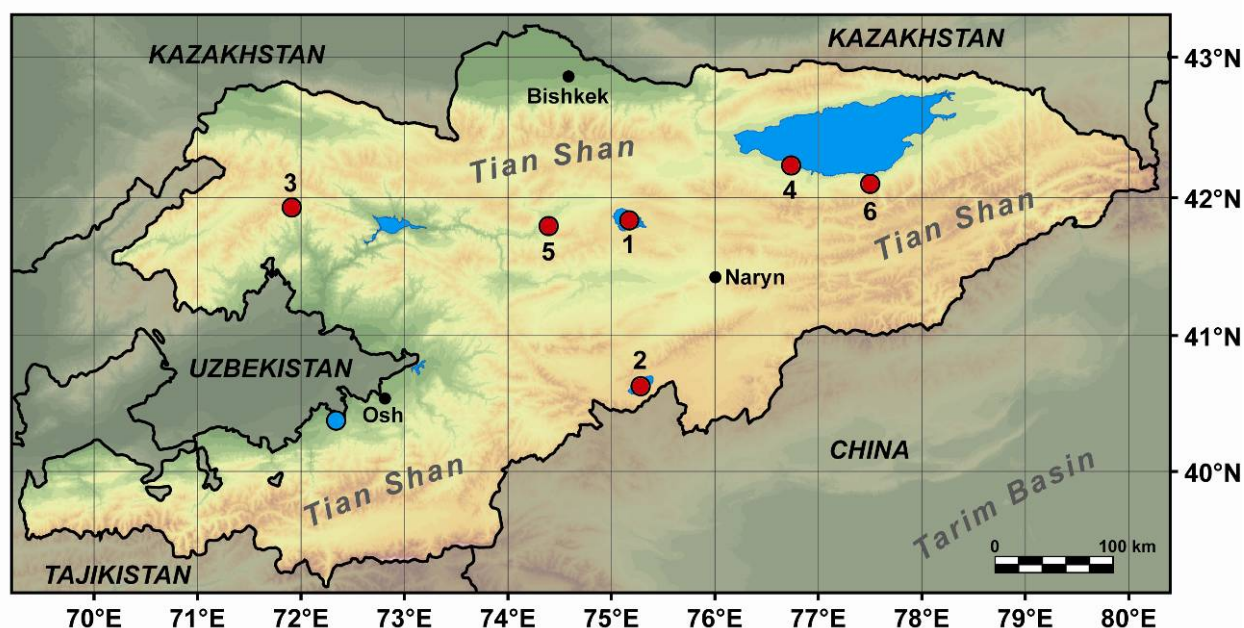


Abb. 1.1: Lokation der im Rahmen des TPI beprobten Seen in Kirgistan: 1 – Son Kol, 2 – Chatyr Kol, 3 – Sary Chelek, 4 – Kara Kol, 5 – Akk Kol, 6 – Kara Köl. Der blaue Punkt südwestlich von Osh markiert die Position der Höhle Uhuu-Too. Ein Stalagmit aus dieser Höhle wird zurzeit am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ von Wissenschaftlern des TPI als Paläoklimaarchiv ausgewertet und soll perspektivisch mit den Daten aus den Sedimenten des Son Kol und des Chatyr Kol verglichen werden.

Regionale Studien zur Paläoklimaentwicklung während des Holozäns

Son Kol (Zentralkirgistan)

Während der Feldkampagnen in den Jahren 2011 und 2012 konnten insgesamt fünf Bohrkern von 1.20 bis 1.65 m Länge sowie mehrere Kurzkerne aus dem Son Kol in Zentralkirgistan (Abb. 1.1) gewonnen werden. Darüber hinaus wurden zahlreiche Wasser-, Boden- und Pflanzenproben aus dem See und seinem Einzugsgebiet genommen, um die rezente Vegetation sowie die hydrologischen Bedingungen charakterisieren zu können (siehe unten). Außerdem wurden ein Monitoring-Netzwerk aus Sedimentfallen sowie Wasser- und Lufttemperaturloggern installiert sowie diverse Wassersondenmessungen durchgeführt, um die rezente Limnologie, die Sedimentationsprozesse im See und die lokalen klimatischen Bedingungen zu erfassen.

Da die installierten Monitoringsysteme bis auf ein Wassertemperaturlogger-Mooring und den Lufttemperaturlogger gestohlen wurden und die Seesedimente aufgrund der relativ geringen jährlichen Ablagerungsrate sowie der fehlenden jahreszeitlichen Lamination nur mittelbar für hochauflösende Klimarekonstruktionen geeignet sind, wurde das Monitoring am Son Kol nicht weitergeführt. Trotzdem lieferten die verbliebenen Logger wertvolle Informationen zu den Temperaturverhältnissen im See und seinem Einzugsgebiet.

Anhand der beiden längsten Sedimentkerne aus dem südöstlichen Becken des Son Kol wurde ein kontinuierliches, etwa 1.75 m langes Kompositprofil (SONK_11_D1/2) erstellt, welches ent-

sprechend den vorliegenden ^{14}C -Datierungen die letzten etwa 6000 Jahre abdeckt. An diesem Kompositprofil wurden durch die einzelnen Arbeitsgruppen des TP1 detaillierte sedimentologisch-geochemische (Mikrofazies, μXRF , magnetische Suszeptibilität, TOC, TIC, TN, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$), biogeochemische (n -Alkan-Verteilung, δD der n -Alkane) und mikropaläontologische (Pollen, Diatomeen, Ostrakoden) Analysen durchgeführt, um die hydrologische und klimatische Entwicklung in der Region während der letzten ca. 6000 Jahre zu rekonstruieren und im Vergleich mit anderen Paläoklimaarchiven zu diskutieren.

Informationen über den Anteil an terrestrischem und aquatischem organischem Material in den Seesedimenten und somit über grundlegende Ablagerungs- und Transportprozesse lassen sich aus der Verteilung sedimentärer n -Alkane ableiten. So kann neben der Gesamtkonzentration der n -Alkane ($\Sigma n\text{-C}_{17-31}$), die einen Hinweis auf die Höhe des Eintrags von organischem Material gibt, entsprechend der Kettenlänge des jeweiligen n -Alkans das organische Ausgangsmaterial identifiziert werden. Die Dominanz langkettiger n -Alkane ($>n\text{-C}_{27}$) in den Sedimenten des Son Kol deutet dabei auf vorherrschend terrestrischen Eintrag hin.

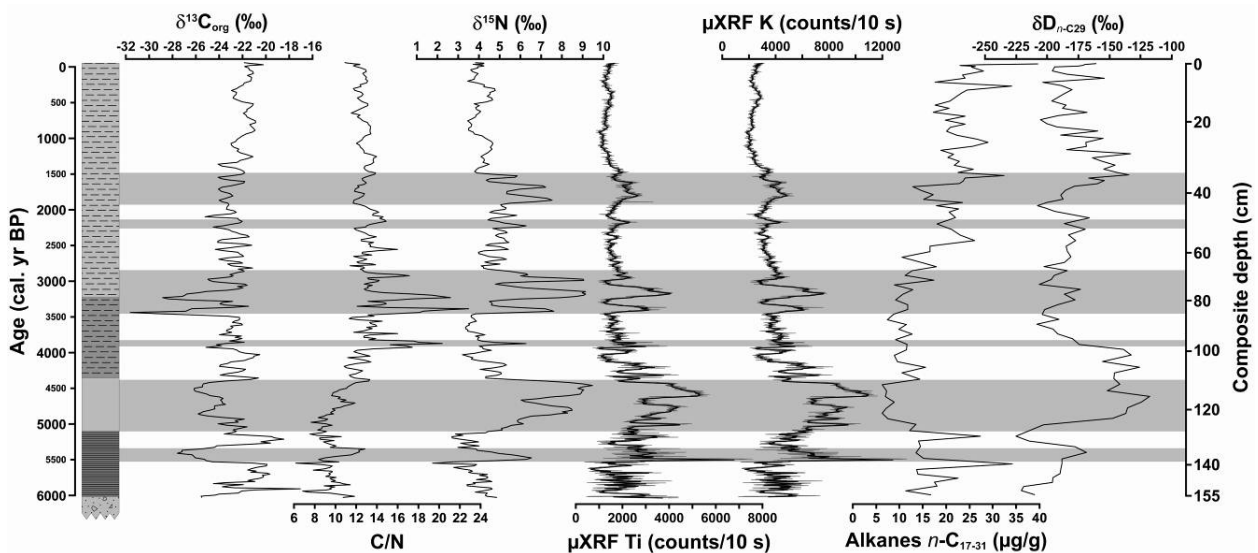


Abb. 1.2: Ergebnis der (bio)geochemischen Analysen an den Sedimenten des Son Kol (Lauterbach et al., 2014). Phasen erhöhten Eintrags von Bodenmaterial durch Schmelzwasser und somit erhöhter Winterniederschläge sind grau markiert. Die substanzspezifische Wasserstoffisotopie langkettiger terrestrischer n -Alkane ($\delta\text{D}_{n\text{-C}_{29}}$) kann als Proxy für Änderungen der Luftfeuchtigkeit während des Sommers interpretiert werden.

Außerdem liefert die Wasserstoffisotopie langkettiger sedimentärer n -Alkane ($\delta\text{D}_{n\text{-C}_{29}}$), welche von terrestrischen Pflanzen gebildet werden, Informationen über die klimatischen Bedingungen zur Zeit der Alkanproduktion.

Das Isotopensignal des Niederschlags wird nach biosynthetischer Fraktionierung während der Vegetationsperiode im n -Alkan $n\text{-C}_{29}$ gespeichert. Unter Berücksichtigung der Modifikation des Signals durch Änderungen der relativen Luft- und Bodenfeuchtigkeit kann der $\delta\text{D}_{n\text{-C}_{29}}$ -Wert demnach zur Rekonstruktion der Sommerluftfeuchtigkeit genutzt werden (vgl. Sachse et al., 2004; Sachse et al., 2006).

Zwischen 6000 und 4950 cal. BP deuten niedrige δD_{n-C29} -Werte auf eher feuchtere Klimabedingungen hin (Abb. 1.2; Lauterbach *et al.*, 2014). Anschließend kann eine ausgeprägte Trockenphase zwischen 4950 und 3900 cal. BP mit deutlich angereicherten δD_{n-C29} -Werten nachgewiesen werden, die auch in anderen regionalen Klimaarchiven dokumentiert ist (z.B. An *et al.*, 2012; Beer *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011; Wünnemann *et al.*, 2006). Eine weitere moderate Trockenphase konnte um 1400 cal. BP festgestellt werden. Der rezent beobachtete Trend zu trockeneren Bedingungen bzw. steigenden Verdunstungsraten wird im obersten Abschnitt des untersuchten Sedimentkerns (vgl. Analyse der Oberflächensedimente) deutlich und stimmt mit der allgemeinen Prognose für Zentralasien überein. Generell zeigt die anhand der biogeochemischen Analysen rekonstruierte Klimaentwicklung in Zentralkirgistan während der letzten ca. 6000 Jahre, abgesehen von den Trockenphasen zwischen 4950 und 3900 cal. BP bzw. um 1400 cal. BP, nur einen moderaten Aridisierungstrend. Das Fehlen einer deutlichen Tendenz in Richtung trockenerer Klimabedingungen im ariden Zentralasien seit dem Mittelholozän unterscheidet sich deutlich von der Entwicklung in der asiatischen Monsunregion, ist aber weitestgehend konsistent mit Erkenntnissen aus anderen regionalen Paläoklimaarchiven (vgl. Chen *et al.*, 2008) und verdeutlicht den vorherrschenden Einfluss der Westwindzirkulation in Zentralasien.

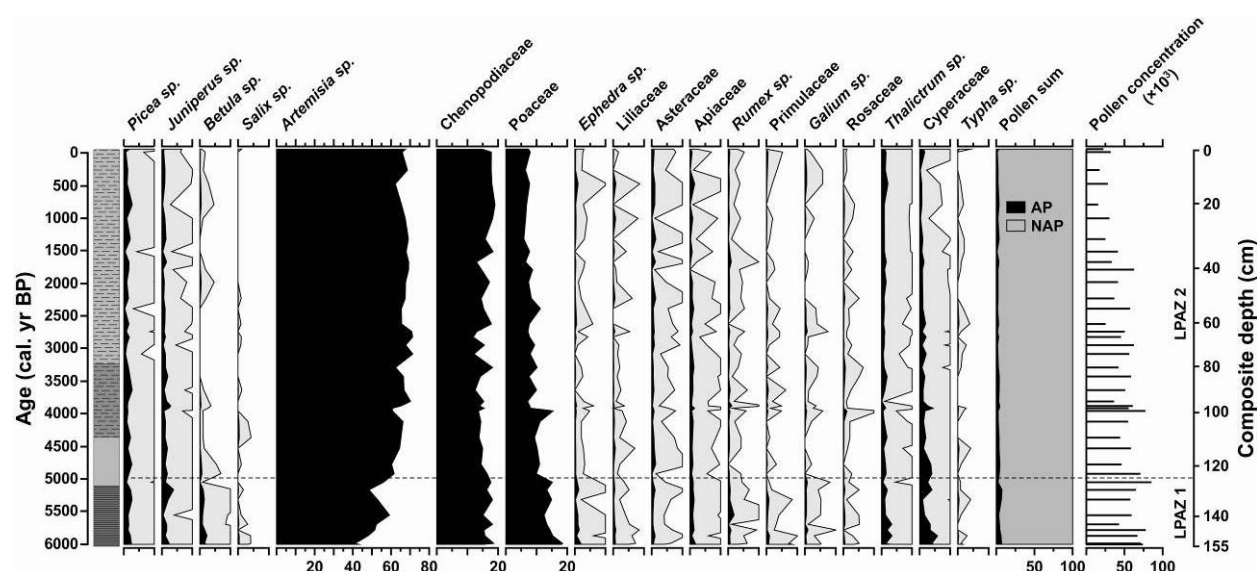


Abb. 1.3: Vereinfachtes Pollendiagramm für den Sedimentkern SONK_11_D1/2 aus dem Son Kol (Lauterbach *et al.*, 2014). Prozentuale Häufigkeiten der einzelnen Taxa sind in Relation zur Gesamtsumme aus Baumpollen (AP) und Nicht-Baumpollen (NAP; Sträucher und Gräser) angegeben, wobei aquatische Pollen und Nicht-Pollen Palynomorphen nicht berücksichtigt wurden. Die lokalen Pollenzonen (LPAZ) wurden mit CONISS (Hammer *et al.*, 2001) bestimmt. Zur besseren Visualisierung sind 10fach überhöhte Werte als graue Kurven dargestellt.

Im Gegensatz zu den biogeochemischen Analysen spiegelt die Vegetationsentwicklung im Bereich des Son Kol während der vergangenen 6000 Jahre keine deutlichen klimatischen Veränderungen wider (Abb. 1.3). Generell werden die Pollenspektren vom Pollenniederschlag der regionalen Steppenvegetation dominiert, während lokale Seggen-Sümpfe, Bergwiesen sowie die Waldstandorte außerhalb des Hochtals deutlich unterrepräsentiert sind. Der Baumpollenanteil beträgt meist weniger als 7 % und setzt sich hauptsächlich aus *Picea*, *Juniperus* und *Betula* zusammen.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigen die Pollenspektren nur wenig Variabilität, was auf lediglich graduelle Veränderungen der regionalen Vegetation / Waldgrenzen schließen lässt. Die relative Stabilität und klimatische Insensitivität des lokalen Ökosystems deutet darauf hin, dass für signifikante Vegetationsveränderungen nötige Schwellenwerte bei Feuchtigkeit bzw. Niederschlag während des Untersuchungszeitraums nicht unterschritten wurden.

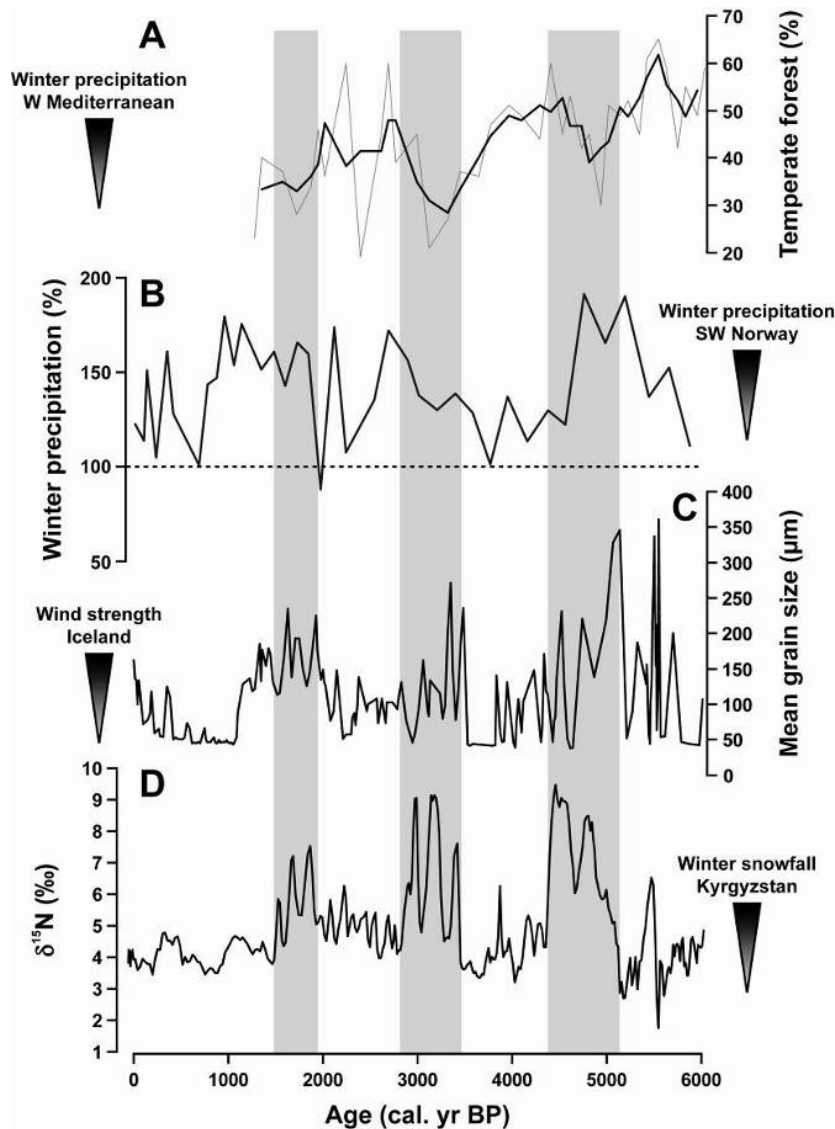


Abb. 1.4: Vergleich von Paläoklimadaten aus dem Nordatlantikraum mit Analysen an den Sedimenten des Son Kol: (A) Vegetations- bzw. Winterniederschlagsänderungen im Mittelmeerraum (Fletcher et al., 2012), (B) Winterniederschlagsänderungen in Südwestnorwegen (Bjune et al., 2005), (C) Durchschnittliche Korngröße von Löss auf Island als Indikator für Windstärkeänderungen (Jackson et al., 2005), (D) Eintrag von $\delta^{15}\text{N}$ (Bodenmaterial) in den Son Kol als Indikator für Schmelzwassereintrag und Winterniederschlagsintensität (Lauterbach et al., 2014). Phasen erhöhten Eintrags von Bodenmaterial am Son Kol und somit erhöhter Winterniederschläge sind grau markiert.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen generellen Klimaentwicklung in der Region konnten als weiteres Ergebnis der geochemischen und sedimentologischen Analysen mehrere zyklisch auftretende Phasen erhöhten Eintrags von mineralischem terrestrischem Material (verdeutlicht durch erhöhte $\delta^{15}\text{N}$ -Werte und μXRF -Zählraten für Titan und Kalium) vor 6000 cal. BP und um 5500, 5100–4350, 3900, 3450–2850 und 1900–1500 cal. BP nachgewiesen werden (Abb. 1.2 und 1.4).

Interessanterweise sind diese offensichtlich von der generellen hydroklimatischen Entwicklung, wie sie durch die biogeochemischen Daten dokumentiert ist, abgekoppelt und treten sowohl während vorwiegend feuchter als auch trockener Klimabedingungen auf. Es lässt sich dementsprechend schlussfolgern, dass keine Verbindung zu verstärkter Sommerniederschlagsintensität besteht sondern dass der erhöhte minerogene Eintrag mit verstärkter Bodenerosion durch Schmelzwasser und somit mit Episoden verstärkter Winterniederschläge in Verbindung steht.

Ein Vergleich mit Daten aus dem zirkumatlantischen Raum zeigt, dass verstärkte Winterniederschläge in Zentralkirgistan vorrangig während Phasen erhöhter Niederschläge und Windgeschwindigkeiten im Nordatlantikraum (Jackson *et al.*, 2005; Bjune *et al.*, 2005) sowie trockenerer Winter im Mittelmeerraum (Fletcher *et al.*, 2012) zu beobachten sind (Abb. 1.4). Das Auftreten von feuchteren / stürmischeren Bedingungen in nördlichen Breiten und trockeneren Bedingungen im Mittelmeerraum ist dabei charakteristisch für den positiven Modus der Nordatlantischen Oszillation (NAO; Hurrell, 1995). Die gute zeitliche Übereinstimmung der Daten aus Zentralasien und dem Nordatlantikraum deutet demzufolge auf eine großräumige klimatische Verbindung zwischen beiden Regionen hin und legt nahe, dass verstärkte Winterniederschläge in Zentralasien vorrangig während positiver NAO-Phasen auftreten (Lauterbach *et al.*, 2014).

Darüber hinaus liefert auch die Analyse der Artenvergesellschaftung von Diatomeen und Ostrakoden in den Sedimenten des Son Kol (Abb. 1.5) Informationen über die paläolimnologische und –klimatische Entwicklung während des Holozäns. So leistet insbesondere die anhand der jeweiligen Artenvergesellschaftung über Transferfunktionen (Juggins, 2001; Mischke *et al.*, 2007) durchgeführte quantitative Rekonstruktion der Leitfähigkeit des Seewassers einen Beitrag zum besseren Verständnis der Klimaentwicklung in der Vergangenheit. Beide Rekonstruktionen zeigen dabei übereinstimmende Ergebnisse für die Leitfähigkeitsentwicklung, wobei die Rekonstruktion anhand der Diatomeenvergesellschaftung für rezente Proben (ca. 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) im Vergleich zu den gemessenen Leitfähigkeitswerten (ca. 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) die realistischeren Werte ergibt.

In den Sedimenten des Bohrkerns SONK_11_D1/D2 konnten insgesamt 107 Diatomeenarten und acht Ostrakodenarten nachgewiesen werden. Neben den am häufigsten vorkommenden Diatomeen- und Ostrakodenarten sowie den ermittelten Schalenkonzentrationen und rekonstruierten Leitfähigkeiten liefern auch isotopengeochemische Analysen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$) an den Ostrakodenschalen Informationen über die paläolimnologische Entwicklung. Im untersten Abschnitt des Sedimentkerns (6000–5050 cal. BP) werden sowohl die Diatomeen- als auch die Ostrakodenvergesellschaftung von Salzwasserarten dominiert, wobei bei den Ostrakoden insbesondere *Eucypris mareotica* vorherrschend ist.

Diatomeen sind in diesem Abschnitt kaum erhalten, allerdings deutet das vereinzelte Auftreten benthischer Arten bei gleichzeitiger Abwesenheit planktischer Diatomeen auf einen stark gesunkenen Seespiegel oder auch extrem kalte Bedingungen (Eisbedeckung) hin. Die anhand der Diatomeenvergesellschaftung für diesen Abschnitt rekonstruierte Leitfähigkeit liegt mit maximal 14.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich über dem heutigen Wert (Abb. 1.5).

Die an *Eucypris mareotica* gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sowie das Sr/Ca-Verhältnis (Abb. 1.6) zeigen eine hohe hydrologische Variabilität mit sich abwechselnden Trocken- und Feuchtphasen. Zwischen 5050 und 4400 cal. BP deuten das Verschwinden von *Eucypris mareotica* und das Auftreten von *Limnocythere inopinata* auf abnehmende Salinität und zunehmende Feuchte hin, wobei anzumerken ist, dass *Limnocythere inopinata* durchaus erhöhte Salzgehalte toleriert. Insgesamt ist die Ostrakodenabundanz in diesem Abschnitt am größten, wobei die Sukzession auf stark wechselnde Umweltbedingungen hinweist. Die nur vereinzelt auftretenden Diatomeen sind in ihrer Artenvergesellschaftung für ein eher flaches Gewässer charakteristisch. Die Entwicklung des Fe/Mn-Verhältnisses zeigt eine verbesserte Sauerstoffversorgung des Sedimentes an, was eine Ursache für die schlechte Erhaltung der Diatomeen sein könnte, wie übereinstimmende Beobachtungen am Nam Co in Tibet gezeigt haben (Kasper, 2013). Die Diatomeenvergesellschaftung zwischen 4400 und 3800 cal. BP ist durch benthische Taxa dominiert und zeigt weiterhin eine erhöhte Leitfähigkeit an. Die hinsichtlich Wassertiefe, -temperatur und pH-Wert tolerante Art *Candona neglecta* dominiert nun die Ostrakodenvergesellschaftung, während *Limnocythere inopinata* nicht mehr nachgewiesen werden konnte. Zwischen 3800 und 3200 cal. BP ist die stärkste Dominanz planktischer Diatomeen zu verzeichnen. Die Leitfähigkeit geht bis auf heutiges Niveau zurück und sinkende $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ -Werte zeigen möglicherweise zunehmend feuchtere Bedingungen an. Die kontinuierlich zunehmende Produktivität in zwischen 3200 und 1500 cal. BP, die sich anhand steigender TOC-, TN- und $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ -Werte zeigt (Abb. 1.6), könnte für den Wechsel von *Cyclotella costei* (oligo- bis mesotraphent) zu *Cyclotella cf. radiosa* (meso- bis eutraphent) als dominante Diatomeenart verantwortlich sein (Abb. 1.5). Der Dominanzwechsel könnte außerdem durch einen geringfügigen Anstieg in der Leitfähigkeit hervorgerufen worden sein. Darüber hinaus könnten ein ausreichendes Nahrungsangebot sowie eine gute Sauerstoffversorgung des Sedimentes für das vermehrte Auftreten benthischer Diatomeen verantwortlich sein. Das häufige Auftreten der Muschelart *Pisidium nitidum* sowie großschaliger Diatomeen der Art *Campylodiscus hibernicus* um 1800 cal. BP kennzeichnet eine Feuchtphase, die auch in den biogeochemischen Daten deutlich wird (Abb. 1.2). Der Wechsel von *Cyclotella cf. radiosa* zu *Cyclotella costei* als dominante Diatomeenart zwischen 1500 und 450 cal. BP könnte eine Folge weiter abnehmender Leitfähigkeiten bis auf etwa heutiges Niveau sein. Die dafür möglicherweise verantwortliche Frischwasserzufuhr wird auch durch den Wechsel von *Candona neglecta* zu *Candona candida* belegt. Das Mittelalterliche Klimaoptimum und die Kleine Eiszeit werden durch kurzzeitig höhere bzw. niedrigere Sr/Ca-Verhältnisse markiert, eine eindeutige Reaktion der Mikroorganismen ist aber nicht erkennbar. Die jüngste Entwicklungsphase des Son Kol ab 450 cal. BP ist durch maximale Artendiversität und bessere Erhaltung der Diatomeen gekennzeichnet, wobei die rekonstruierten Leitfähigkeitswerte den rezent gemessenen entsprechen.

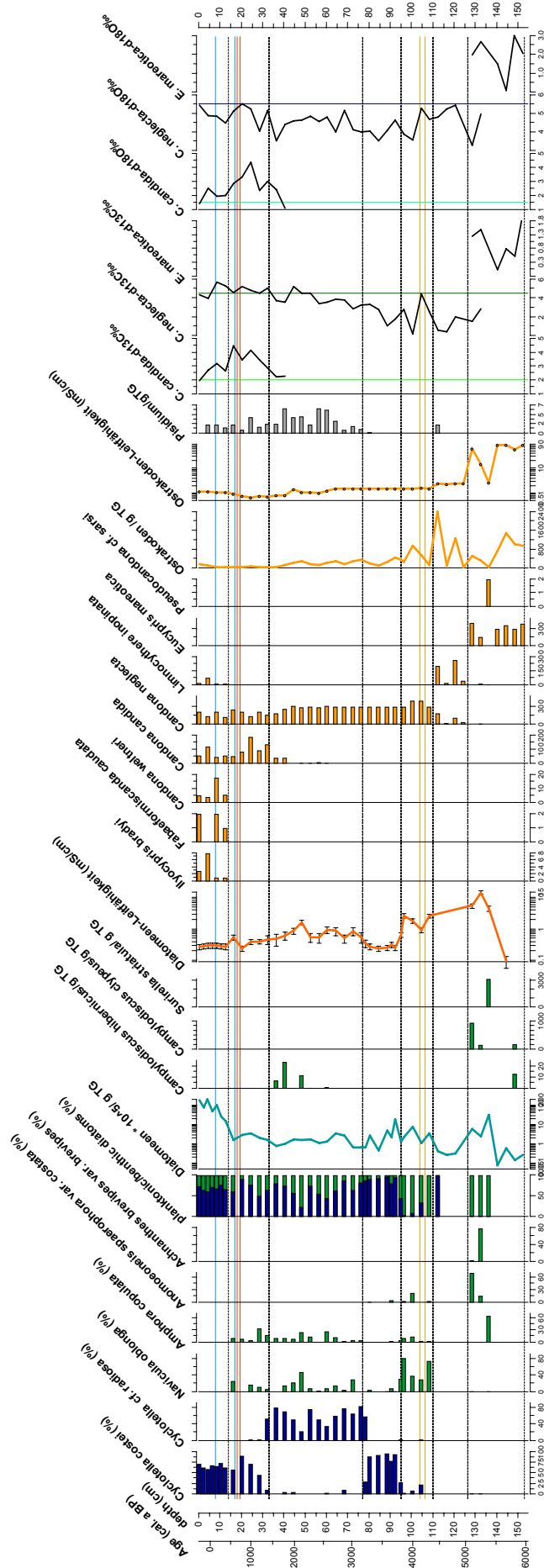


Abb. 1.5: Darstellung der häufigsten Diatomeenarten und aller Ostrakodentaxa in den Sedimenten des Son Kol (Sedimentkompositikern SONK_11_D1/2), der Diatomeen- und Ostrakodenschalenkonzentration, der anhand der Diatomeen- und Ostrakodenvergesellschaftung rekonstruierten Leitfähigkeiten sowie der an den Ostrakodenschalen gemessenen $\delta^{13}C$ - und $\delta^{18}O$ -Werte in Bezug zu rezenten Werten (vertikale Linien). Da die Ostrakodenvergesellschaftung durch eine ausgeprägte Sukzession ohne Durchläuferart charakterisiert ist, war es nötig, die $\delta^{18}O$ - und $\delta^{13}C$ -Messungen an den Schalen von drei verschiedenen Arten (*Candona candida*, *Candona neglecta*, *Eucypris marroca*) durchzuführen. Die horizontal verlaufenden Linien markieren das sogenannte 4.2 ka Event (gelb), das Mittelalterliche Klimaoptimum (rot) und die Kleine Eiszeit (blau).

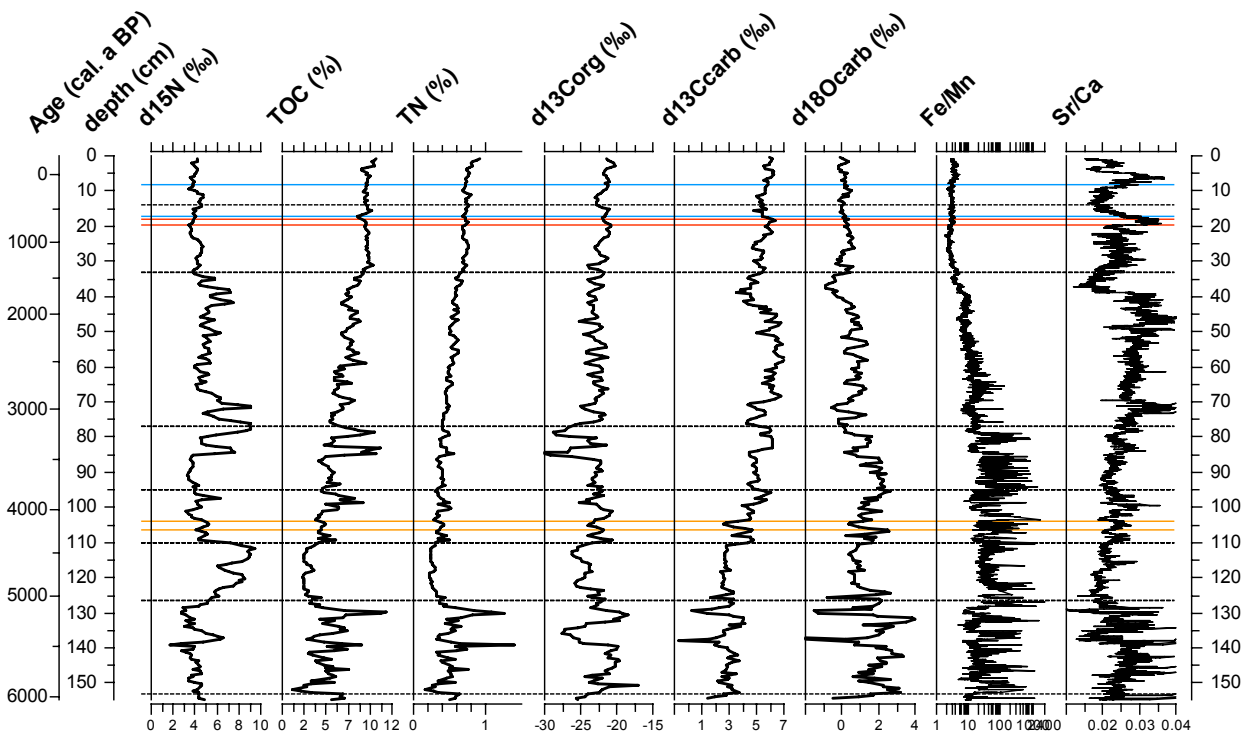


Abb. 1.6: Ausgewählte Analyseergebnisse des Sedimentkerns SONK_11_D1/2 aus dem Son Kol. Die horizontal verlaufenden Phasen markieren das 4.2 ka Event (gelb), das Mittelalterliche Klimaoptimum (rot) und die Kleine Eiszeit (blau).

Chatyr Kol (Südkirgistan)

Während einer Feldkampagne im Sommer 2012 konnte die aufgrund des zu kurzen Planungsvorlaufs (fehlende behördliche Genehmigungen, unzureichende technische Ausrüstung) zwischen Projektmittelbewilligung und dem für eine Geländekampagne günstigen Zeitfenster im Jahr 2011 nicht realisierte Bohrung auf dem Chatyr Kol in Südkirgistan (Abb. 1.1) erfolgreich durchgeführt werden. Dabei wurden an zwei Lokationen im Südwestteil des Sees in ~20 m Wassertiefe jeweils zwei überlappende Sedimentbohrkerne von etwa 6 m Länge gezogen. Darüber hinaus wurden auf dieser Geländekampagne weitere Kurzkerne von verschiedenen Lokationen im Seebecken gewonnen sowie zahlreiche Boden-, Pflanzen- und Wasserproben genommen, die einen Vergleich der aus den Sedimenten gewonnenen Proxydaten mit Rezentmaterial erlauben.

Das aus den gewonnenen Bohrkernen erstellte Kompositprofil CHAK_12_A/B hat eine Länge von etwa 6,25 m. Die Sedimente sind fast durchgehend feinclaminiert und decken entsprechend den vorliegenden ¹⁴C-Datierungen deutlich mehr als die letzten 10.000 Jahre ab; höchstwahrscheinlich reicht das Kompositprofil bis in das Spätglazial. Dies macht die Sedimente des Chatyr Kol zu einem für diese Region bisher einzigartigen und äußerst viel versprechenden Paläoklimaarchiv. Obwohl die Erstellung des finalen Altersmodells aufgrund der Verzögerung bei der Durchführung der Geländekampagne noch nicht abgeschlossen ist (die letzten Datierungen wurden erst im August 2014 bereitgestellt), lassen sich anhand der vorliegenden Altersdaten und der von den Projektpartnern innerhalb des TP1 durchgeführten sedimentologisch-geochemischen

(Mikrofazies, μXRF , TOC, TIC, TN, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$), biogeochemischen (n -Alkan-Verteilung, δD der n -Alkane, Alkenon-Verteilung) und mikropaläontologischen Analysen (Pollen, Diatomeen, Ostrakoden) bereits grundlegende Aussagen über die Klimaentwicklung in der Region während der letzten 10.000 Jahre treffen. Ein detaillierter Vergleich mit anderen regionalen Klimaarchiven sowie mit den Befunden des Son Kol kann jedoch erst nach Vorliegen des finalen Altersmodells erfolgen.

Ähnlich den Pollenbefunden des Son Kol sind auch im Chatyr Kol über den gesamten analysierten Zeitraum hinweg überwiegend Steppen- und Wiesengesellschaften repräsentiert, wobei wiederum nur geringfügige Vegetationsveränderungen erkennbar sind (Abb. 1.7). Dennoch zeichnen sich in den etwas höheren Baumpollenwerten zwischen ca. 11.000 und 5000 cal. BP (ca. 550–250 cm) wärmere/feuchtere Bedingungen während des Früh- und Mittelholozäns ab, während das jüngere Holozän (<5000 cal. BP) durch einen Aridisierungstrend gekennzeichnet ist.

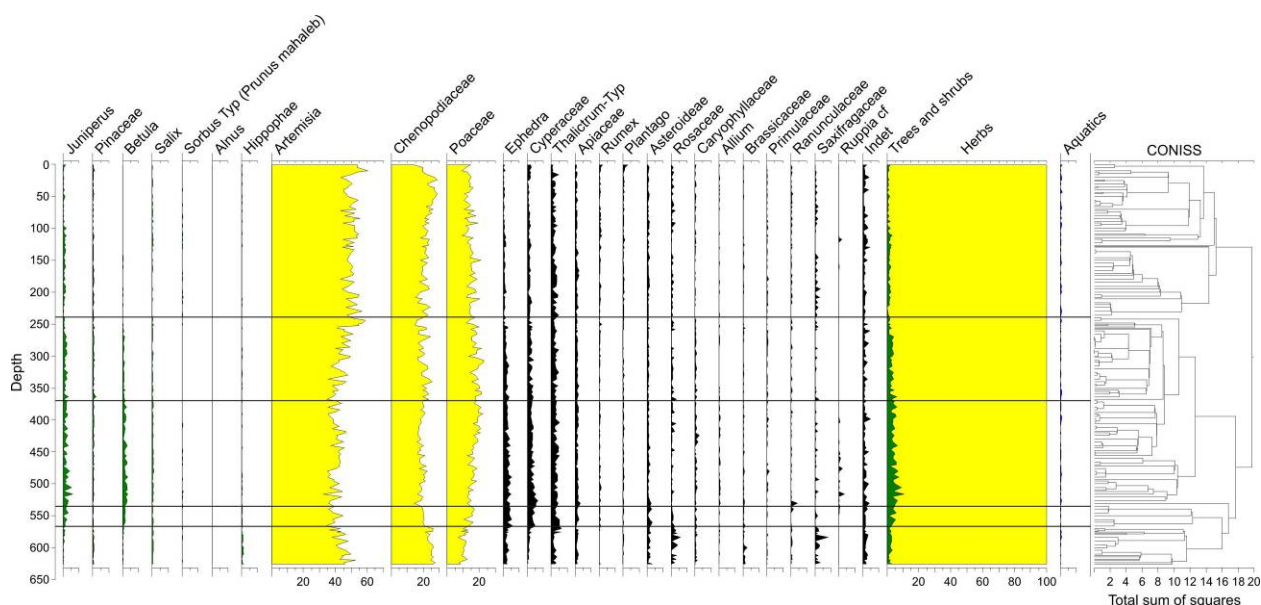


Abb. 1.7: Vereinfachtes Pollendiagramm für den Sedimentkern CHAK_12_A/B aus dem Chatyr Kol. Prozentuale Häufigkeiten der einzelnen Taxa sind in Relation zur Gesamtsumme aus Baumpollen (AP) und Nicht-Baumpollen (NAP; Sträucher und Gräser) angegeben, wobei aquatische Pollen und Nicht-Pollen Palynomorphen nicht berücksichtigt wurden. Die lokalen Pollenzonen (LPAZ) wurden mit CONISS (Hammer et al., 2001) bestimmt.

Die Auswertung der sedimentologisch-geochemischen Analysen (μXRF , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{15}\text{N}$, TOC, CaCO_3) zeigt deutliche, wahrscheinlich klimatisch gesteuerte, Veränderungen verschiedener Proxyparmeter bei etwa 9000 cal. BP (ca. 470 cm), 5500 cal. BP (275 cm) und 2000 cal. BP (ca. 130 cm, Abb. 1.8), die mit Änderungen in der Sedimentmikrofazies einhergehen. Höhere μXRF -Zählraten für Kalium vor etwa 9000 cal. BP deuten auf erhöhten minerogenen Eintrag hin. Während des Mittelholozäns (ca. 9000–2000 cal. BP) sind deutliche Schwankungen des TOC- und CaCO_3 -Gehalts sowie der $\delta^{15}\text{N}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte erkennbar, die vermutlich mit zyklisch wechselnden Trocken- und Feuchtphasen in Verbindung stehen. Ansteigende CaCO_3 -Gehalte und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ab etwa 2000 cal. BP spiegeln wahrscheinlich den rezenten Aridisierungstrend wider.

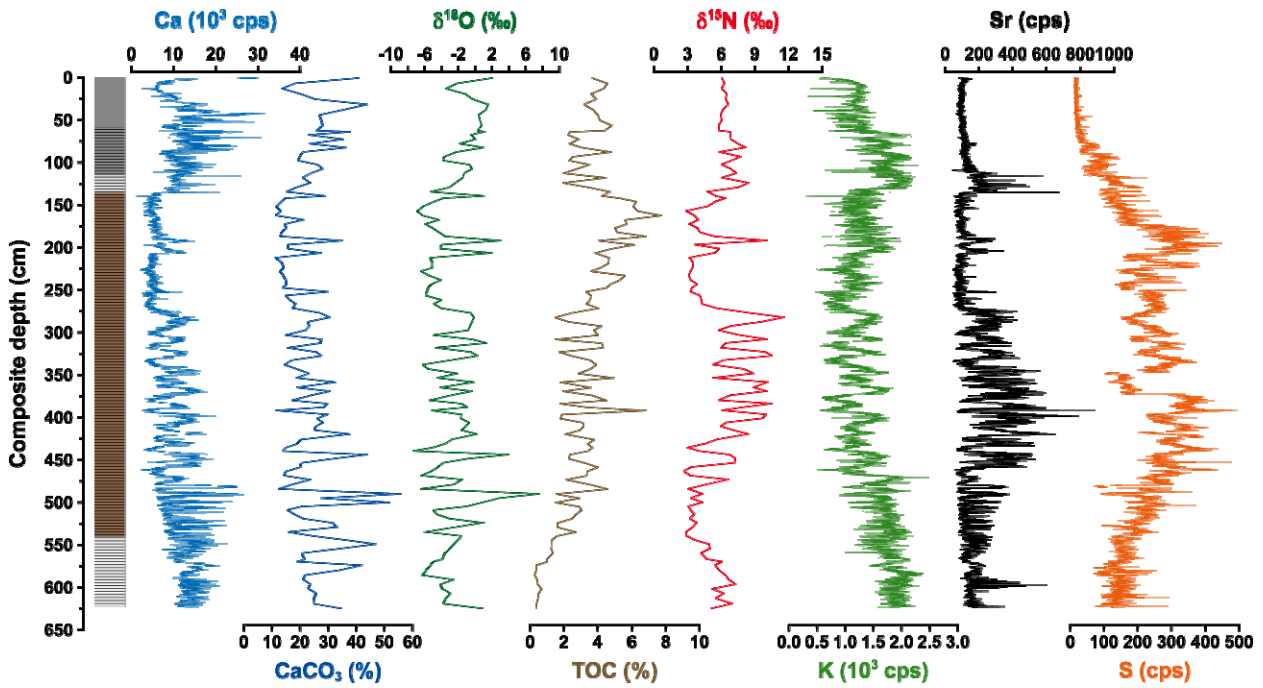


Abb. 1.8: Ergebnis der geochemischen Analysen an den Sedimenten des Chatyr Kol.

Die biogeochemischen Daten zeigen für die Sedimente des Chatyr Kol bezüglich der Kettenlänge der *n*-Alkane eine deutlich ausgeprägtere Varianz als im Son Kol, wobei in den jüngsten Sedimenten (<100 cm / <1700 cal. BP) ein Mischsignal aus terrestrischen (*n*-C₂₉₋₃₁) und aquatischen (*n*-C₂₃₋₂₅) Pflanzen auftritt (Abb. 1.9).

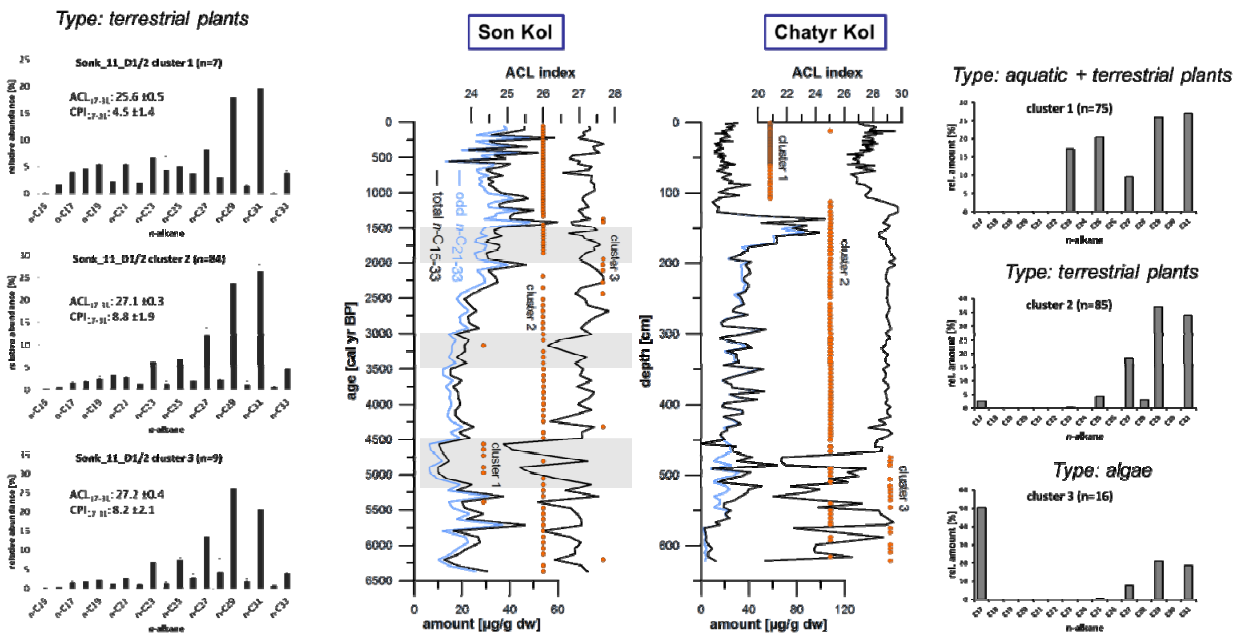


Abb. 1.9: Verteilungsmuster(Cluster) der in den Sedimenten des Son Kol und des Chatyr Kol identifizierten *n*-Alkane. Die Sedimente weisen jeweils seespezifische Einträge organischen Materials von terrestrischen und aquatischen Quellen auf. Während in den Sedimenten des Son Kol hauptsächlich terrestrische Pflanzenreste dominieren, ist im Chatyr Kol ein deutlicher Wechsel zwischen unterschiedlichen Quellen des organischen Material erkennbar.

Demgegenüber ist der darunter liegende Abschnitt (100–460 cm / ca. 1700–8000 cal. BP) hauptsächlich durch terrestrischen Eintrag gekennzeichnet. Der sprunghafte Anstieg in der Konzentration der n -Alkane in diesem Abschnitt kann als mögliches Zeichen einer Einzugsgebietserweiterung durch Absinken des Seespiegels angesehen werden. Der untere Abschnitt des Sedimentkerns (>460 cm / >8000 cal. BP) zeigt einen Wechsel zwischen dominant terrestrischem Eintrag und Abschnitten mit erhöhtem Anteil an n -C₁₇ (Algen).

Bezüglich der Entwicklung der Sommerluftfeuchtigkeit zeigen die $\delta D_{n-C_{29}}$ -Werte in der jüngeren Vergangenheit (<120 cm / <2000 cal. BP) sowie im untersten Kernabschnitt (>560 cm / >11.000 cal. BP) eine deutliche isotopische Anreicherung, was auf eine geringe Luftfeuchtigkeit hindeutet. Im Gegensatz dazu scheint der größte Teil des Holozäns (120–560 cm / ca. 2000–11.000 cal. BP) generell feuchter gewesen zu sein, wie durch negativere $\delta D_{n-C_{29}}$ -Werte verdeutlicht wird (Abb. 1.10). Darüber hinaus konnten in den Sedimenten des Chatyr Kol, im Gegensatz zum Son Kol, auch aquatische Biomarker auf ihre Wasserstoffisotopie hin untersucht werden. Die δD -Werte des aus Wasserpflanzen stammenden n -Alkans n -C₂₃ ($\delta D_{n-C_{23}}$) liefern dabei Informationen über die isotopische Zusammensetzung des Seewassers, wobei leichtere $\delta D_{n-C_{23}}$ -Werte den Eintrag von abgereichertem Schmelzwasser oder isotopisch leichtem Niederschlagswasser signalisieren. Da der Chatyr Kol keinen Abfluss besitzt, führt die hohe Verdunstung des Seewassers zu einer starken isotopischen Anreicherung, die der Verdünnung durch Frischwasser entgegenwirkt.

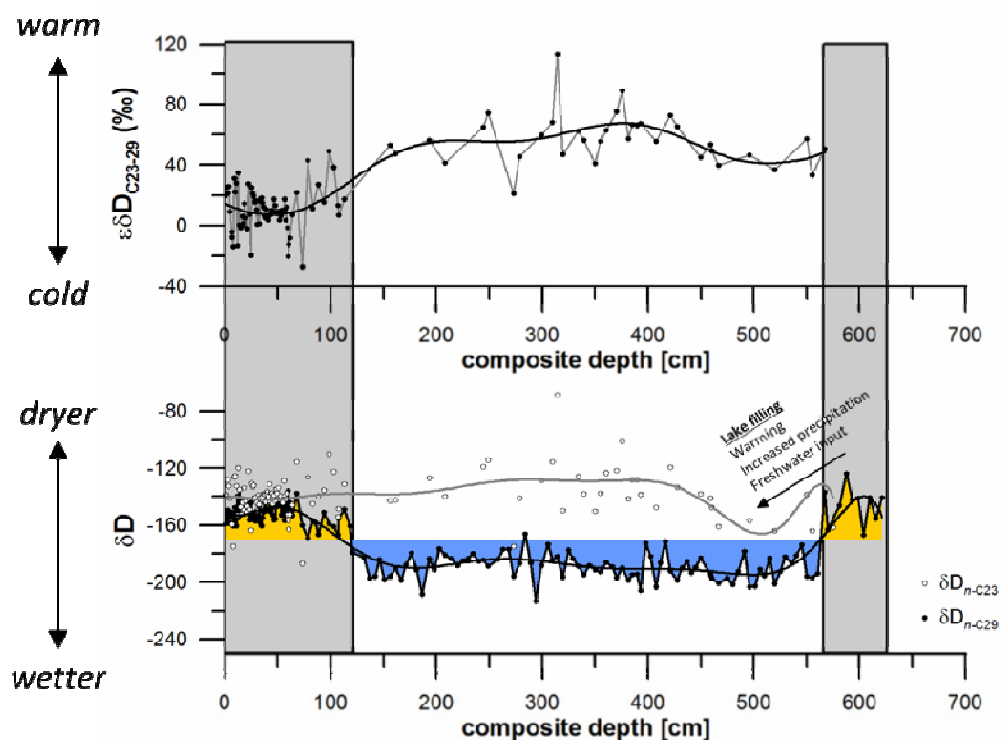


Abb. 1.10: Ergebnis der substanzspezifischen Wasserstoffisotopenanalyse terrestrischer und aquatischer Biomarker in den Sedimenten des Chatyr Kol (unten). $\delta D_{n-C_{29}}$ dient dabei als Proxy für die Sommer-Luftfeuchtigkeit wohingegen $\delta D_{n-C_{23}}$ die isotopische Zusammensetzung des Seewassers widerspiegelt. Die Differenz zwischen aquatischem und terrestrischem substanzspezifischem Isotopensignal ($\epsilon C_{23-C_{29}}$) kann zur Einschätzung der Evapotranspiration des Seesystems benutzt werden, ist im Falle des Chatyr Kol aber durch Schmelzwasser beeinflusst (oben).

Im Idealfall kann Differenz zwischen dem aquatischen und dem terrestrische substanzspezifischem Isotopensignal ($\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$) zur Einschätzung der Evapotranspiration des jeweiligen Seesystems benutzt werden (Rach *et al.*, 2014). Allerdings ist dies im Fall des Chatyr Kol aufgrund des dominanten Schmelzwassereintrags offensichtlich nicht mehr uneingeschränkt möglich. So zeigt sich zwischen 120 und 560 cm Sedimenttiefe (ca. 2000–11.000 cal. BP) eine Zunahme des $\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$ -Werts. Die dafür offensichtlich hauptsächlich verantwortlichen leichteren $dD_{n-C_{29}}$ -Werte lassen sich, in Übereinstimmung mit feuchten und warmen Klimabedingungen während des Mittelholozäns (Bondarev *et al.*, 1997), durch höhere Sommer-Feuchtigkeit bzw. durch Verdünnungseffekte durch einen Anstieg des Schmelzwassereintrages aufgrund gestiegener Temperaturen erklären. Die Pufferwirkung des isotopisch leichten Schmelzwassers hat somit den $\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$ -Wert offensichtlich maßgeblich beeinflusst.

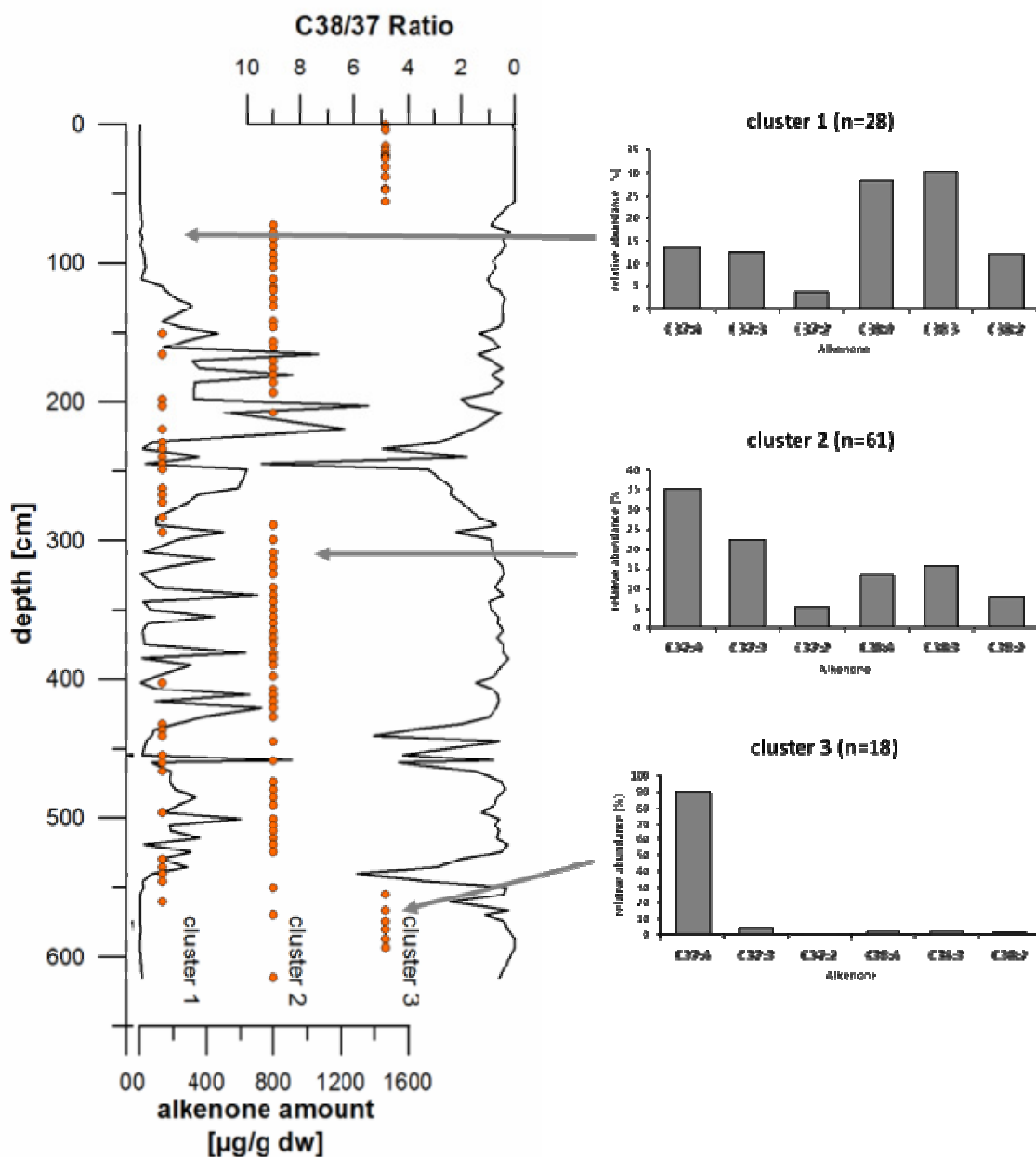


Abb. 1.11: Verteilung der von Braunalgen produzierten Alkenone in den Sedimenten des Chatyr Kol.

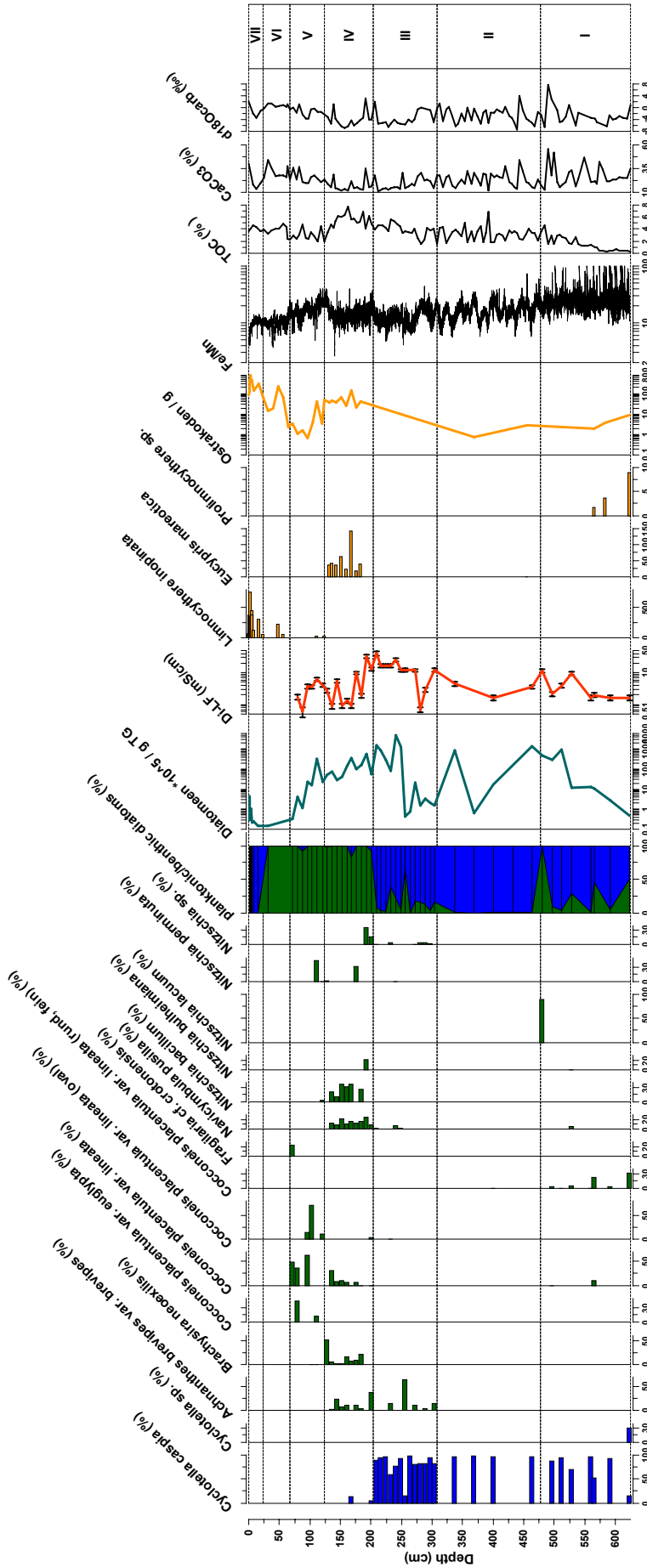


Abb. 1.13: Darstellung der prozentualen Anteile der häufigsten Diatomeen (> 20 %) und aller Ostrakodentaxa sowie der Diatomeen- und Ostrakodenschalenkonzentration in den Sedimenten des Chatyr Kol. Darüber hinaus sind die anhand der Diatomeenvergesellschaftung rekonstruierte Leitfähigkeit (mS / cm) sowie die an den Sedimenten gemessenen TOC- und CaCO₃-Gehalte, $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und das Fe/Mn-Verhältnis dargestellt.

Die anschließende deutliche Dominanz von *Cyclotella caspia* zwischen 478 und 308 cm (ca. 8000–5000 cal. BP) bei gleichzeitigem Fehlen benthischer Diatomeen deutet auf ein steigendes Seespiegelniveau und/oder zunehmende Wassertemperaturen hin. Leicht negativere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zeigen wahrscheinlich feuchtere Bedingungen an, was sich in guter Übereinstimmung mit dem angenommenen Seespiegelanstieg und den biogeochemischen Daten befindet. Die Leitfähigkeit lag in diesem Abschnitt mit 3000–4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ etwas über dem heutigen Niveau. Trotz der weiterhin deutlichen Dominanz von *Cyclotella caspia* kommen zwischen 308 und 204 cm (ca. 5000–3000 cal. BP) wieder vermehrt benthische Diatomeen (insbesondere salzliebende Arten) vor. Eine als einsetzende Sauerstoffarmut an der Sedimentoberfläche interpretierte Abnahme der Fe/Mn-Werte bei etwa 270 cm geht mit der verbesserten Erhaltung der Diatomeen einher. Gleichzeitig erreicht die Leitfähigkeit Maximalwerte (um 42.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Da der Rückgang der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte oberhalb von 275 cm vermutlich feuchtere Verhältnisse anzeigt, könnten die erhöhten Salzgehalte möglicherweise auf verstärkten Grundwassereintrag zurückzuführen sein. Der aus der geringen Zunahme planktischer Diatomeen abgeleitete niedrige Seespiegelstand scheint diese Hypothese zu bestätigen. Zwischen 204 und 124 cm Sedimenttiefe (ca. 3000–2000 cal. BP) ist ein markanter Wechsel in der Diatomeenassoziation mit einem nahezu vollständigen Rückgang planktischer Arten und der Dominanz benthischer Diatomeen, insbesondere salzliebender Arten, zu beobachten. Die Leitfähigkeit geht etwas zurück, wobei Schwankungen stark wechselnde Verhältnisse anzeigen. Darüber hinaus tritt die salztolerante Ostrakodenart *Eucypris mareotica* auf. Die gleichzeitige Abwesenheit planktischer Diatomeen deutet wie am Son Kol auf einen niedrigen Seespiegel hin. Im darüber liegenden Abschnitt (124–68 cm / ca. 2000–1000 cal. BP) zeigt sich in Übereinstimmung mit den biogeochemischen Daten ein Trend zu trockneren Bedingungen (positivere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte), der einen niedrigeren Seespiegel bedingt und somit zu einer anhaltenden Dominanz benthischer Diatomeen führt. Das Verschwinden salzliebender Diatomeen und der Ostrakodenart *Eucypris mareotica* deutet auf eine Abnahme der Leitfähigkeit hin, die möglicherweise mit abnehmenden Grundwasserständen und somit reduziertem Salzeintrag in den See in Verbindung steht. Erhöhte Fe/Mn-Verhältnisse lassen eine verbesserte Sauerstoffversorgung des Sedimentes vermuten. Im obersten Abschnitt des Sedimentkerns (<68 / <1000 cal. BP) deutet die nahezu komplette Auflösung der noch vorhandenen benthischen Diatomeen auf erhöhte Alkalinität hin. Dies wird durch das vermehrte Auftreten der Ostrakodenart *Limnocythere inopinata* gestützt. Das vereinzelte Auftreten planktischer Diatomeen oberhalb von 24 cm Kerntiefe (<500 cal. BP) ist möglicherweise auf einen Anstieg des Seespiegels zurückzuführen.

Sihailongwan (Nordostchina)

Neben der detaillierten (bio)geochemischen und mikropaläontologischen Bearbeitung der Sedimentkerne aus den kirgisischen Seen wurde im Rahmen des TP1 auch die palynologische Bearbeitung eines Sedimentkerns aus dem Sihailongwan (vgl. Schettler *et al.*, 2006) in Nordostchina durchgeführt. Die dabei erhobenen Pollendaten stellen den ersten detaillierten vegetationsge-

schichtlichen Datensatz für diese Region dar, der das gesamte Holozän umfasst (Abb. 1.14). Die gewonnenen Erkenntnisse besitzen aufgrund der geographischen Lage Nordostchinas im nördlichen Einflussbereich des ostasiatischen Monsunsystems (EASM), welches dort sowohl mit der nordhemisphärischen Westwinddrift als auch mit dem Klimageschehen niederer Breiten verzahnt ist, eine besondere Signifikanz für das Verständnis der Dynamik des Monsunsystems und dessen Rolle innerhalb des globalen Klimageschehens. Da die Waldvegetation des Untersuchungsgebietes bis in die jüngste Vergangenheit anthropogen weitgehend unbeeinflusst war, bilden die holozänen Pollenspektren des Sihailongwan hauptsächlich die natürlichen Klimaänderungen ab.

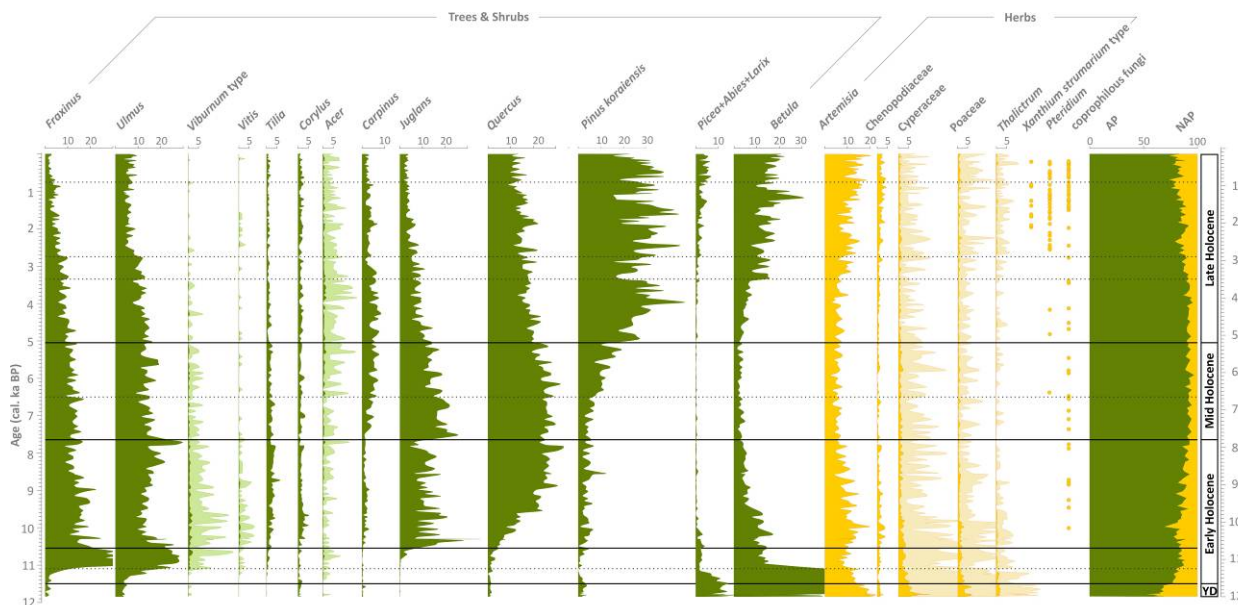


Abb. 1.14: Vereinfachtes Pollendiagramm für den Sedimentkern aus dem Sihailongwan. Prozentuale Häufigkeiten der einzelnen Taxa sind in Relation zur Gesamtsumme aus Baumpollen (AP) und Nicht-Baumpollen (NAP; Sträucher und Gräser) angegeben, aquatische Pollen und Nicht-Pollen Palynomorphen wurden nicht berücksichtigt.

Um detaillierte Aussagen über die in den Pollenspektren repräsentierten Vegetationsänderungen und die zugrunde liegende Klimadynamik machen zu können, wurden die palynologischen Daten in Kooperation mit K. Rehfeld (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung / Alfred-Wegener-Institut Potsdam) und P. Tarasov (Freie Universität Berlin) mittels Biom- und Klimarekonstruktionen (Abb. 1.15) sowie Zeitreihenanalysen quantifiziert.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die lokale Vegetation gegen Ende der Jüngerer Dryas durch so genannte *Cool mixed forests* (COMX) mit einem hohen Anteil an borealen Koniferen und Steppenelementen dominiert wurde. Die dementsprechend rekonstruierte Durchschnittstemperatur für den wärmsten Monat (MT_{wm}) lag bei $15\text{--}16^\circ\text{C}$ während die jährliche Niederschlagssumme (P_{ann}) etwa $300\text{--}400\text{ mm}$ betrug (ca. $6\text{--}7^\circ\text{C}$ bzw. $300\text{--}400\text{ mm}$ niedriger als heute), was auf einen deutlich abgeschwächten Sommermonsun hindeutet. Mit Beginn des Frühholozäns (11.650 cal. BP) vollzog sich ein sukzessiver floristischer und struktureller Umbau der Vegetation in der Untersuchungsregion. Die quantitative Klimarekonstruktion zeigt um 11.250 cal. BP eine deutliche Temperaturzunahme auf höhere Werte als heute, während die Niederschläge gleichzeitig jedoch weniger deutlich ansteigen.

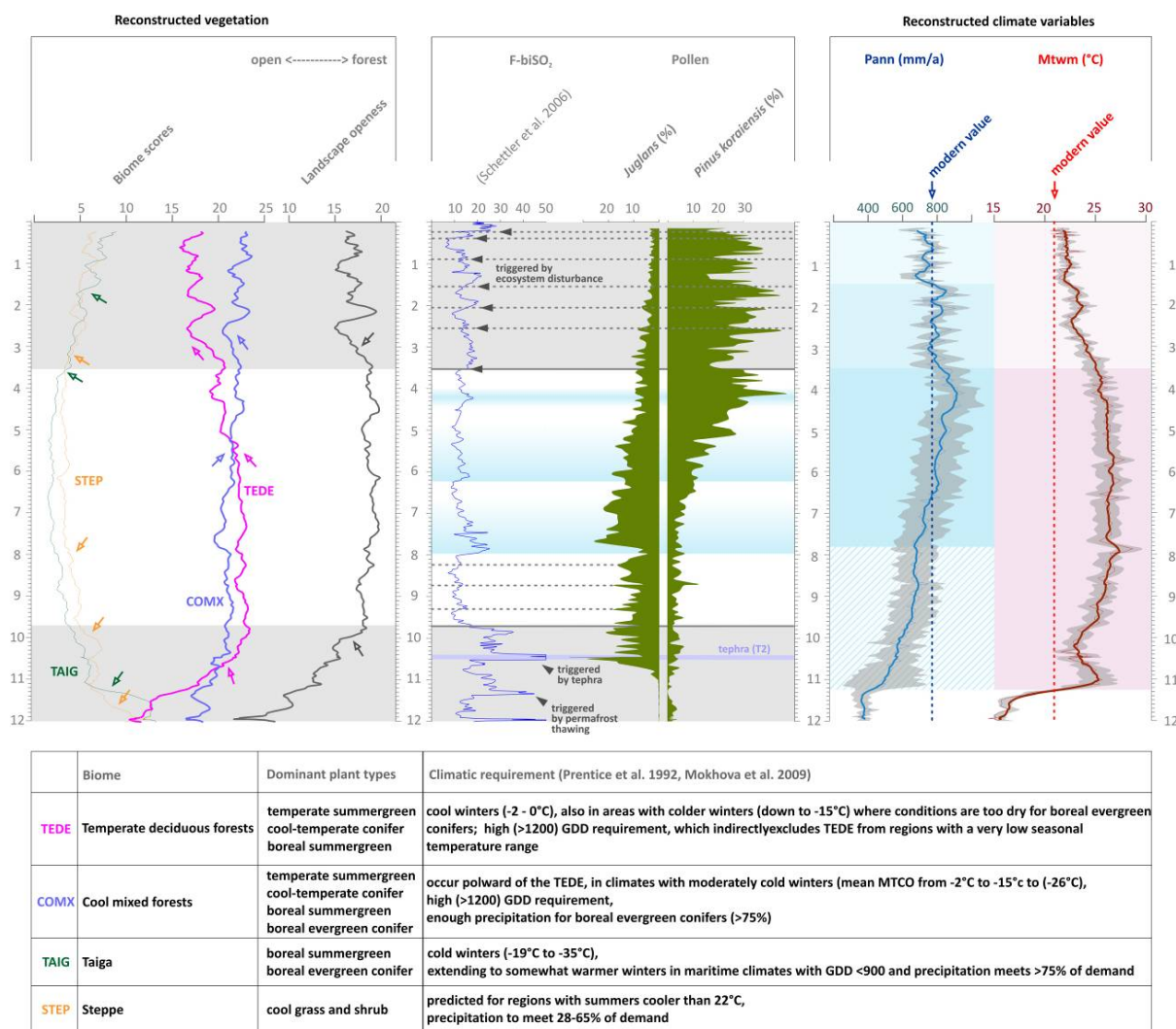


Abb. 1.15: Rekonstruierte Biome und Klimavariablen des Sihailongwan im Vergleich mit biogenem Kieselsäure-Flux und Pollen-Prozentwerten.

Mit einem signifikanten Rückgang der Koniferen wurde das *Temperate deciduous forest biome* (TEDE) ab 10.700 cal. BP zur dominanten Vegetationsform. Entsprechend der bioklimatischen Ansprüche des TEDE-Bioms werden damit relativ hohe Sommertemperaturen, etwas höhere Wintertemperaturen als heute sowie ein deutliches Feuchtigkeitsdefizit angezeigt (Prentice *et al.*, 1992). Zwischen 5000 und 6000 cal. BP wurde das TEDE-Biom schrittweise wieder durch COMX ersetzt. Ab 3500 cal. BP deutet der zunehmende Anteil an borealen Koniferen und Steppelementen auf eine Entwicklung zu kühleren und trockeneren Bedingungen, während die zunehmende Schwankungsbreite in den Biom-Scores eine höhere Instabilität der Umweltbedingungen impliziert. Im Einklang mit den Ergebnissen der Biom-Rekonstruktion zeigen die Klimarekonstruktionen zwischen 11.250 und 3500 cal. BP eine MT_{wm} von meist über 25 °C (ca. 4°C wärmer als heute), während gleichzeitig die jährliche Niederschlagsmenge kontinuierlich ansteigt und ihr Optimum zwischen 4500 und 3500 cal. BP erreicht. Die ab 3500 cal. BP rückläufigen Temperatur- und Niederschlagswerte lassen auf eine leichte Abschwächung des EASM schließen. Nach einer etwas wärmeren und feuchteren Phase zur Zeit des römischen Klimaoptimums (2000 cal. BP) sanken Temperatur und Niederschlag dann auf heutiges Niveau.

Obwohl sichere Hinweise auf kurzfristige Klimaereignisse (insbesondere bezüglich der so genannten 8.2 ka bzw. 4.2 ka Events) fehlen, zeigen die Pollendaten des Sihailongwan neben dem zuvor beschriebenen langfristigen Trend dennoch kurzfristige Variationen, die auch im Flux biogenen Siliziums auftreten (vgl. Schettler *et al.*, 2006; Abb. 1.15). Während die Pollenprozentage von *Juglans* im Frühholozän und die von Kiefer, Eiche und Birke im Spätholozän starke Ausschläge zeigen, zeichnen Biom- und Klimarekonstruktion lediglich die jüngeren Schwankungen deutlich nach. Ähnliche palynologische Muster konnten während der vergangenen 5000 Jahre auch in benachbarten paläoökologischen Archiven (Xiaolongwan Maarsee – Xu *et al.*, 2014; Jinchuan Torfmoor – Makohonienko *et al.*, 2008) identifiziert werden, was den regionalen Charakter der im Pollenbefund des Sihailongwan registrierten, kurzfristigen Vegetationsveränderungen unterstreicht. Zur quantitativen Erfassung möglicher Zyklizitätsmuster wurden an den rekonstruierten Klimaparametern MT_{wm} und P_{ann} , sowie den erhobenen Pollendaten der häufigsten Baumtaxa (*Juglans*, *Quercus*, *Pinus koraisensis*, *Betula*) Spektralanalysen durchgeführt. Über den Zeitraum der vergangenen 10.000 Jahre zeigt sich dabei bei Temperatur, Niederschlag, *Pinus* und *Betula* ein signifikanter Spektralpeak bei etwa 1/550 a, während dieser bei *Quercus* und *Juglans* leicht in Richtung längerer Periodizitäten verschoben ist. Weitere kohärente Frequenzmuster ließen sich bei Pollentaxa und Klimavariablen nicht nachweisen. Eine Zyklizität von 550–600 Jahren konnte bereits in anderen holozänen Klimaproxy-Datensätzen aus der asiatischen Monsunregion gefunden werden, so z.B. in Speleothemen aus den Höhlen Heshang und Dongge (Cosford *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012) und im Jinchuan Torfmoor (Hong *et al.*, 2001). Auch der Pollen-Datensatz aus dem Xiaolongwan Maarsee weist eine Periodizität von 500 Jahren auf (Xu *et al.*, 2014). Darüber hinaus zeigen auch Sedimentparameter der Großen Bahama Bank eine Zyklizität in der Größenordnung von 500–600 Jahren (Capman & Shackleton, 2000; Roth & Reijmer 2005). Als mögliche Ursachen derartiger Frequenzmuster werden die Dynamik atmosphärischer und ozeanischer Prozesse sowie Insolationsänderungen diskutiert (Neff *et al.*, 2001; Roth & Reijmer, 2005; Liu *et al.*, 2008).

Motiviert durch die während des Früh- und Spätholozäns in jeweils unterschiedlichen Pollentaxa auftretenden Fluktuationen wurden in einem weiteren Schritt die Spektralanalysen für die Zeiträume 0–5000 und 5000–10.000 cal. BP wiederholt. Im Ergebnis zeigt sich eine Periodizität von etwa 500 Jahren bei der rekonstruierten Mt_{wm} im Frühholozän, während eine entsprechende Frequenz für die P_{ann} nicht vorhanden ist. Umgekehrt zeigt die P_{ann} eine signifikante Periodizität von 500–550 Jahren im Spätholozän, während ein entsprechendes Signal in der Mt_{wm} fehlt. Daraus lässt sich schließen, dass im eher warm-trockenen Frühholozän vor allem die Temperaturänderungen die Vegetationsentwicklung in Nordostchina entscheidend beeinflusst haben, während im kühl-feuchten Spätholozän der Einfluss der Monsun-Regenfälle auf die Vegetation überwiegt.

Durch die zuverlässige warvenchronologische Datierung der Sedimente des Sihailongwan (Schettler *et al.*, 2006) eröffnet sich die Möglichkeit, die anhand der Pollendaten rekonstruierten Vegetations- und Klimaparameter und dadurch gewonnenen Erkenntnisse über paläoökologische Veränderungen im Kontext überregionaler Paläoklimabefunde und möglicher Steuerfaktoren zu diskutieren.

Im Vergleich mit den gemeinhin als Niederschlagssignal interpretierten Sauerstoffisotopendaten südchinesischer Höhlensinter (Cosford *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012) zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der langfristigen Entwicklung der MT_{wm} in Nordostchina und der Niederschlagsentwicklung in Südchina. Die enge Kopplung zwischen dem Niederschlagssignal in den asiatischen Monsunregionen und der Insolation bzw. dem Präzessionszyklus (Wang *et al.*, 2008) lässt sich somit mit großer Wahrscheinlichkeit auch auf die Temperaturentwicklung in Nordostchina übertragen. Die P_{ann} zeigt um 11.250 cal. BP gleichfalls einen Anstieg, was auf eine Zunahme der Monsunniederschläge schließen lässt. Der sich anschließende Niederschlagstrend folgt jedoch nicht dem klassischen Konzept eines frühholozänen Niederschlagsmaximums im Einflussbereich des EASM, sondern zeigt langfristig zunehmende Niederschläge bis zu einem Maximum zwischen 4500 und 3500 cal. BP. Danach zeigen sowohl Temperatur als auch Niederschlag eine Abschwächung des EASM, wobei sich aufgrund der abnehmenden Temperaturen die effektive Feuchtigkeit kaum verringert. Damit wird die von Chu *et al.* (2014) postulierte stetige Zunahme der effektiven Niederschläge in Nordostchina während der vergangenen 9000 Jahre weitgehend untermauert. Einen langfristig ansteigenden holozänen Niederschlagstrend zeigen jedoch auch verschiedene Klimarekonstruktionen vom östlichen Tibet-Plateau (Wang *et al.*, 2014). Darüber hinaus lassen sich einige grundlegende Gemeinsamkeiten mit Feuchtigkeitsrekonstruktionen aus den ariden Gebieten des nördlichen China und Zentralasiens feststellen, insbesondere ein trockenes Frühholozän, ein Niederschlagsmaximum während des Mittelholozäns und abnehmende Niederschläge ab 4000–3500 cal. BP. Ein sprunghafter Anstieg der Niederschläge um 8000 cal. BP sowie eine ausgeprägte Trockenphase um 4500 cal. BP (Tarasov *et al.*, 2006, Xu *et al.*, 2010) sind dagegen in Nordostchina nicht nachweisbar.

Im Ergebnis spiegelt sich im Pollendatensatz des Sihailongwan ein zeitlich variierendes Ineinandergreifen verschiedener Einflussfaktoren auf die holozäne Klimaentwicklung in Nordostchina, sowie eine partielle Entkopplung der holozänen Temperatur- und Niederschlagsentwicklung wider. Im Einklang mit dem nordhemisphärischen Klimageschehen signalisiert der Anstieg von Temperatur und Niederschlag im Zuge des Übergangs von glazialen zu interglazialen Klimaverhältnissen eine Expansion des EASM nach Norden. Während die Temperaturen jedoch bereits im Frühholozän, offenbar insulationsgesteuert, auf maximales Niveau ansteigen, spiegelt sich im langfristig ansteigenden Niederschlagstrend ein von der Insolation entkoppelter Verlauf wider. Rezente Beobachtungen sowie Modellierungsergebnissen zufolge zählen Position und Stärke der nordhemisphärischen Westwinddrift, des subtropischen Jet-Streams, der Subtropenfront über dem westlichen Pazifik (WPSH) sowie blockierender Hochs in den mittleren und höheren Breiten zu den wesentlichen Einflussfaktoren auf die saisonale Migration der monsunalen Niederschlagsfront sowie der regionalen Verteilung der Monsunregenfälle in China (Ding & Chan, 2005). Ein starker EASM bringt dabei überdurchschnittlich viel Niederschlag nach Norden, während im Süden eher trockene Verhältnisse auftreten und umgekehrt. Die sich in der Niederschlagsrekonstruktion des Sihailongwan widerspiegelnde Nordwärtsverlagerung der Niederschläge im Laufe des Früh- und Mittelholozäns korrespondiert daher mit der sich abschwächenden Feuchtigkeit in den südchinesischen Regionen.

Starke und trockene Westwinde während des Frühholozäns gelten als eine Ursache für die frühholozäne Trockenheit in Zentralasien (Chen *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012). Verstärkt wurde dies durch die erhöhte Evaporation aufgrund der maximalen Sommerinsolation. Die Unterdrückung der nach Norden vorrückenden Monsunfront durch die Westwindssysteme ist für Nordostchina ebenfalls eine plausible Erklärung der frühholozänen Trockenheit. Einen direkte Fernwirkung aus den ariden Gebieten Nordchinas konnte überdies anhand der vermehrten frühholozänen Staubablagerungen im Sihailongwan nachgewiesen werden (Zhu *et al.*, 2013). Im langfristig ansteigenden Niederschlagstrend könnten sich jedoch auch allmähliche atmosphärische Änderungen und Wechselwirkungen im Bereich der WPSH und des Okhostk-Hochs widerspiegeln (Chu *et al.*, 2014). Beide Komponenten sind eng verknüpft mit den vorherrschenden oberflächennahen Meerestemperaturen (Abb. 1.16; Wang *et al.*, 2013; Kubota *et al.*, 2014). Überdies könnte der seit etwa 5000 cal. BP schrittweise zunehmenden El Niño-Aktivität ein langfristiger Einfluss auf die Klimaentwicklung in Nordostchina zugeschrieben werden.

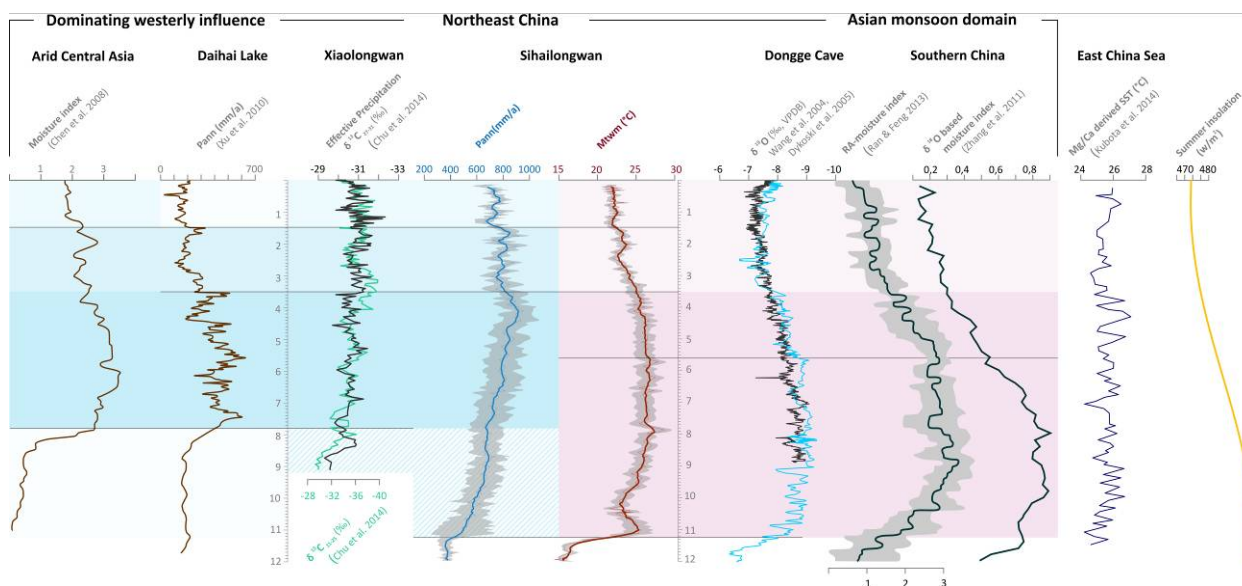


Abb. 1.16: Vergleich der anhand der Pollenspektren des Sihailongwan rekonstruierten Klimavariablen mit anderen asiatischen Paläoklimarekonstruktionen.

Unabhängig von der jeweiligen Interpretation der unterschiedlichen chinesischen Proxydaten zeichnet sich um 3500 cal. BP in einer Vielzahl von Paläoklimaarchiven ein deutlicher Klimawechsel zu weitgehend rezenten Klimaverhältnissen ab. Ein langfristig gegenläufiger Trend der Niederschlagsentwicklung in Nord-/Nordost- und Südchina ist dabei nicht mehr ersichtlich. Wir interpretieren die Beobachtung als Regimewechsel, der mit einer geänderten Gewichtung der klimatischen Einflussfaktoren bzw. deren Interaktionen einhergeht. Offenbar findet eine signifikante Abkühlung sowie eine Monsunabschwächung statt, wobei sowohl die nördliche Grenze des Sommermonsuns nach Süden rückt als auch die effektive Niederschlagsmenge insgesamt abnimmt. Die Änderungen sind konsistent mit der deutlich verringerten Sommersonneneinstrahlung sowie Änderungen in den Temperatur- und Zirkulationsverhältnissen im tropischen sowie außertropischen Pazifik (Kawahata *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2014; Kubota *et al.*, 2014).

Rezente isotopische Zusammensetzung von Oberflächengewässern und Niederschlag in Kirgistan und Implikationen für paläoklimatische Studien

Aufgrund der bis dato unzureichenden Datengrundlage zur isotopischen Zusammensetzung des Niederschlags in Kirgistan waren sowohl die Abschätzung der generellen klimatisch-hydrologischen Situation in der Region als auch die Erstellung von auf Wasserisotopen ($\delta^{18}\text{O}$, δD) basierenden Klimarekonstruktionen bisher nur begrenzt möglich. Zur besseren Charakterisierung der regionalen hydrologischen Verhältnisse und um spätere Klimarekonstruktionen mit einer verlässlichen Datengrundlage auszustatten wurden diverse Seesediment-, Wasser- (Zuflüsse, See, Niederschlag), Pflanzen- (Wurzeln, Blätter) und Bodenproben aus den Seen Son Kol und dem Chatyr Kol in Kirgistan (Abb. 1.1) sowie den jeweiligen Einzugsgebieten bezüglich ihrer isotopischen Zusammensetzung analysiert.

Die analysierten Wasserproben aus den Zuflüssen der beiden Seen liegen in ihrer isotopischen Zusammensetzung zusammen mit den theoretischen Jahresdurchschnittswerten des Niederschlags (berechnet mittels des *Online Isotopes in Precipitation Calculator* (OIPC), www.waterisotopes.org) einheitlich auf einer *Local Meteoric Water Line* (LMWL, Abb. 1.17) und spiegeln demzufolge die mittlere isotopische Zusammensetzung des regionalen Jahresniederschlags wider.

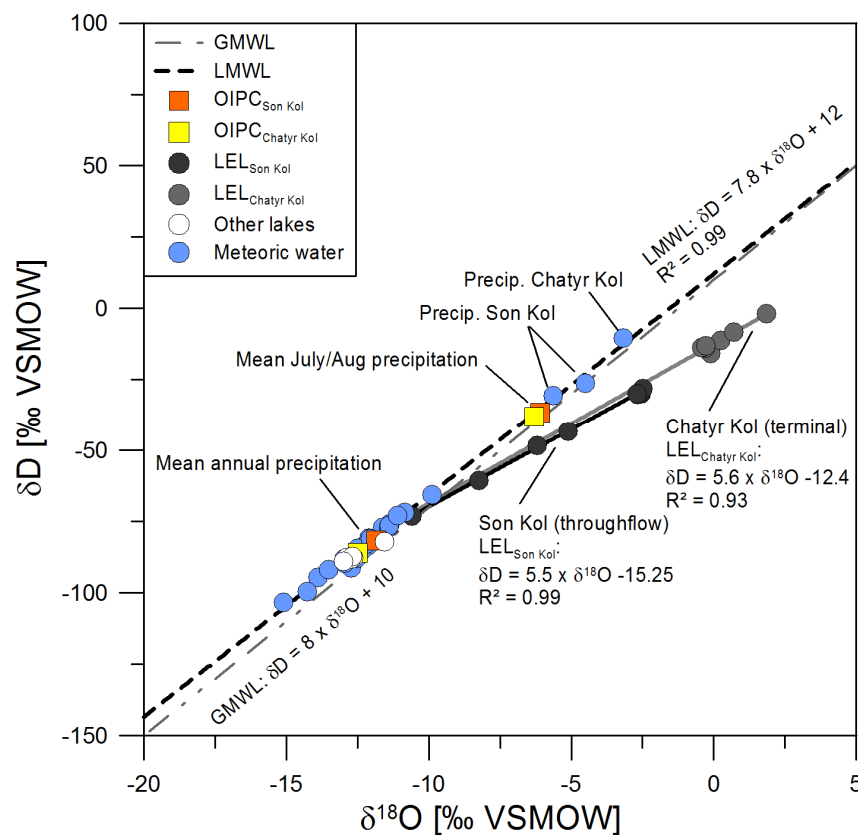


Abb. 1.17: Darstellung der $\delta^{18}\text{O}$ - und δD -Werte von Wasserproben aus Seen, Fließgewässern sowie Niederschlägen in Kirgistan in Relation zur Global Meteoric Water Line (GMWL). Die LMWL wurde aus einer linearen Regression der meteorischen Wässer (Niederschlag, Fließgewässer) bestimmt. Die isotopisch angereicherten Seewasserproben aus dem Son Kol und dem Chatyr Kol liegen in ihrer isotopischen Zusammensetzung auf nahezu identischen LELs.

Dabei tragen die isotopisch angereicherten Winterniederschläge (Schmelzwasser) zur Abpufferung der stärker angereicherten Sommerniederschläge bei. Die analysierten Sommerniederschlagsproben vom Son Kol und Chatyr Kol sind wie zu erwarten gegenüber den Jahresdurchschnittswerten isotopisch angereichert und liegen auf der LMWL im Bereich des berechneten theoretischen Durchschnittswerts für Sommerniederschläge (Abb. 1.17). Im Gegensatz dazu finden sich die Seewasserproben (Seeoberfläche, Tiefenprofile) in ihrer isotopischen Zusammensetzung auf einer jeweils seespezifischen *Local Evaporation Line* (LEL).

Dabei zeigt sich für beide Seen aufgrund der im Untersuchungsgebiet vorherrschenden geringen mittleren relativen Luftfeuchtigkeit und dadurch bedingten extrem hohen Verdunstung eine deutliche isotopische Anreicherung des Seewassers im Vergleich zum Niederschlag bzw. zu den Zuflüssen (Abb. 1.17). Je nach Lage auf der LEL, geben die Proben qualitative Informationen über das Verhältnis zwischen Verdunstung und Zufluss (E/I) im Rahmen der Wasserbilanz, wobei der Schnittpunkt der LEL mit der LMWL die Isotopenzusammensetzung des mittleren Jahresniederschlags darstellt (Jonsson *et al.*, 2009). Je näher das Seewassersignal am Schnittpunkt liegt, desto geringer sind die saisonalen Variationen, wobei relativ große Seen wie der Son Kol und der Chatyr Kol mit relativ langen mittleren Verweilzeiten (4,3 bzw. 6,2 Jahre; berechnet nach Gibson & Edwards, 2002) generell weniger sensitiv auf Saisonalität reagieren. Eigene Berechnungen zeigen deutlich die negative Wasserbilanz beider Seen, wobei der Chatyr Kol durch einen besonders starken Verdunstungseffekt gekennzeichnet ist ($E/I = 8,07$ gegenüber $E/I = 0,93$ beim Son Kol). Da der Chatyr Kol keinen Abfluss besitzt (terminale Hydrologie), wird seine Wasserbilanz ausschließlich über die Verdunstung geregelt, was in Kombination mit der längeren Verweilzeit eine deutliche isotopische Anreicherung des Seewassers gegenüber den Zuflüssen und dem lokalen Niederschlag zur Folge hat. Im Gegensatz dazu ist das Seewasser des Son Kol, der durch eine Durchfluss-Hydrologie gekennzeichnet ist, isotopisch weniger stark angereichert. Die stärkere evaporative Anreicherung des Seewassers im Chatyr Kol spiegelt sich auch in der deutlich höheren Salinität ($1860 \mu\text{S/cm}$) gegenüber dem Son Kol ($530 \mu\text{S/cm}$) sowie im Deuterium-Exzess (Dansgaard, 1964) wider, der beim Chatyr Kol deutlich negativer (-14 ‰) ist als beim Son Kol ($+1,5 \text{ ‰}$). Der gekoppelte Einfluss der Evaporation bzw. Verweilzeit auf den Deuterium-Exzess und die Salinität konnte bereits vorher für eine Reihe von Seen auf dem Tibet-Plateau gezeigt werden (Yuan *et al.*, 2011).

Neben den δD -Werten der rezenten Oberflächenwasserproben wurden auch die Isotopie von Pflanzenwässern sowie sedimentäre substanzspezifische δD -Werte zur Charakterisierung der lokalen Hydrologie herangezogen (Abb. 1.18). Die δD -Werte der Zuflüsse beider Seen liegen im Bereich der anhand der Schnittpunkte LEL-LMWL ermittelten Jahresdurchschnittswerte des Niederschlags und stellen somit ein Mischsignal dar. Aufgrund der unterschiedlichen rezenten Verdunstungs- bzw. Zuflussverhältnisse beider Seen ist die jeweilige Anreicherung des Seewassers unterschiedlich stark ausgeprägt. Untersuchungen in Transekt-Studien haben einheitliche Fraktionierungen zwischen Quellwasser und sedimentären *n*-Alkanen gezeigt (Hou *et al.*, 2008; Sachse *et al.*, 2004), jedoch ist dieser Effekt am Son Kol und Chatyr Kol nicht zu beobachten. Auf der terrestrischen Seite beginnt der Signalpfad mit dem mittleren Jahresniederschlag (MAP)

bzw. dem Zuflusswasser als Quellwasser. Obwohl der Transpiration in Pflanzen generell keine Fraktionierung beim quantitativen Feuchtigkeitstransport vom Bodenwasser zum Wurzelwasser zugesprochen wird (Gibson & Edwards, 2002), zeigen die Werte innerhalb des Pflanzenwassertransports im Einzugsgebiet des Son Kol leicht signifikante Fraktionierungseffekte.

Generell werden klare Unterschiede zwischen Chatyr Kol und Son Kol bezüglich des durch die Pflanzen genutzten Quellwassers deutlich. Während die Pflanzen im Einzugsgebiet des Chatyr Kol hauptsächlich isotopisch angereichertes Schmelzwasser (Winterniederschläge) aus dem Boden aufnehmen, stellt das von den Pflanzen am Son Kol aufgenommene Bodenwasser ein Mischsignal aus isotopisch angereicherten Sommerniederschlägen und isotopisch leichterem Schmelzwasser dar. Darüber hinaus kann die Differenz zwischen dem aquatischen und dem terrestrischen substanzspezifischem Isotopensignal ($\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$) zur Einschätzung der Evapotranspiration des jeweiligen Seesystems benutzt werden (Rach *et al.*, 2014). In beiden Seen ist $\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$ positiv, was auf aride Klimabedingungen hindeutet. Jedoch ist am Chatyr Kol ($\epsilon_{C_{23}-C_{29}} = 18,1 \%$) die anscheinende Aridität niedriger als am Son Kol ($\epsilon_{C_{23}-C_{29}} = 65,5 \%$). Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen könnte der dominante Schmelzwassereintrag am Chatyr Kol sein.

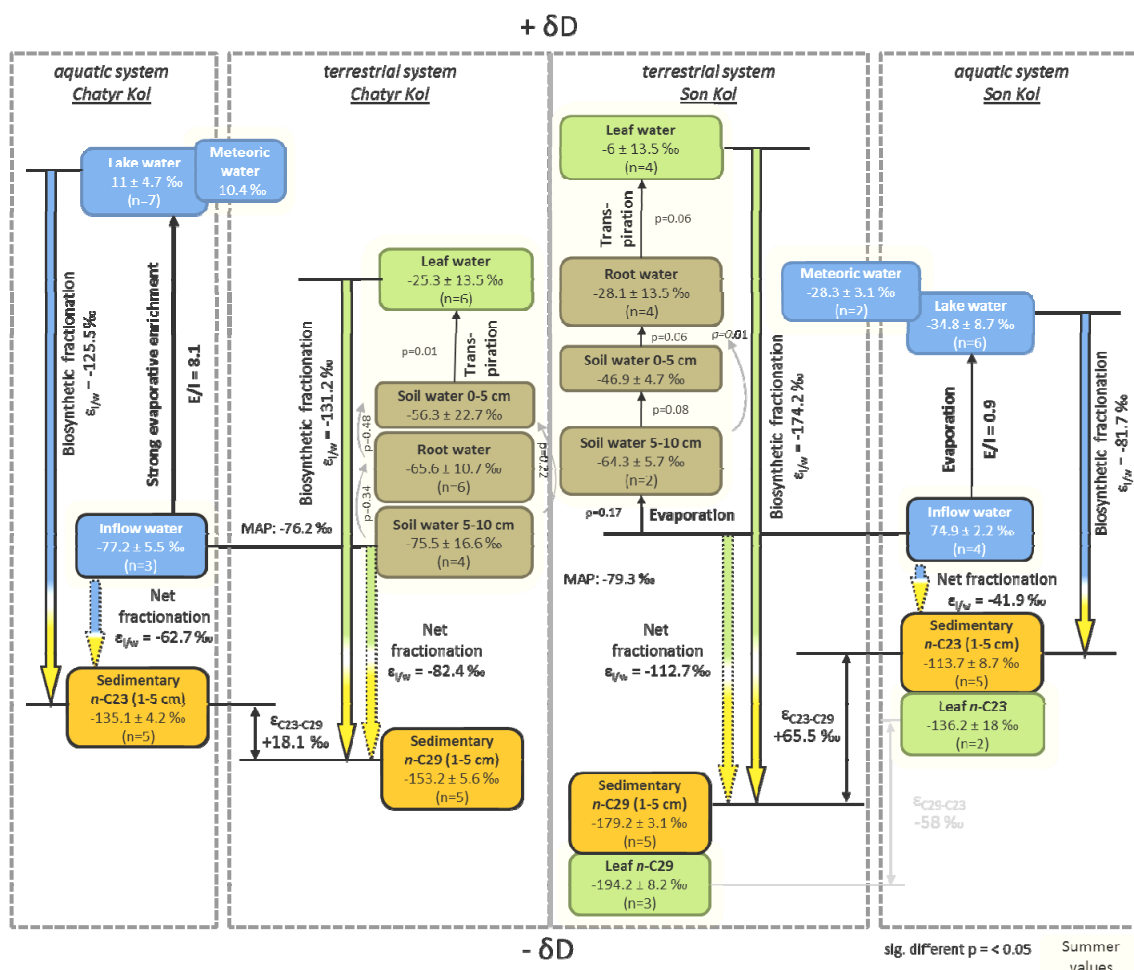


Abb. 1.18: Schematische Übersicht der isotopischen Beziehung zwischen Quellwasser und aquatischen und terrestrischen n-Alkanen in Seesedimenten. Fraktionierungen zwischen Seewasser und sedimentären n-Alkanen bzw. Netto-Fraktionierung des Zuflusswassers spiegeln klimatische und biosynthetische Bedingungen wider. Differenzen zwischen Systemen spiegeln die Evapotranspirationsverhältnisse im Einzugsgebiet wider.

Um Aussagen über die regionale Klimaentwicklung der letzten 90 Jahre machen zu können, wurden die oberflächennahen Seesedimente des Son Kol und des Chatyr Kol detailliert biogeochemisch untersucht. Dabei zeigt sich anhand des $\epsilon_{C_{23}-C_{29}}$ -Werts eine gegenläufige Entwicklung der Sommer-Evapotranspiration an beiden Seen mit einer leichten effektiven Abnahme der Verdunstung am Chatyr Kol und einer deutlichen Zunahme am Son Kol (Abb. 1.4). Im Vergleich dazu zeigen Messdaten umliegender Klimastationen für die letzten 60 Jahre (1950–2010), dargestellt als Niederschlags-/Verdunstungs-Index (Abb. 1.19), einen minimalen Anstieg der Trockenheit am Chatyr Kol, wohingegen die Aridität am Son Kol, in Übereinstimmung mit den Analysen der Sedimente, deutlicher zugenommen hat.

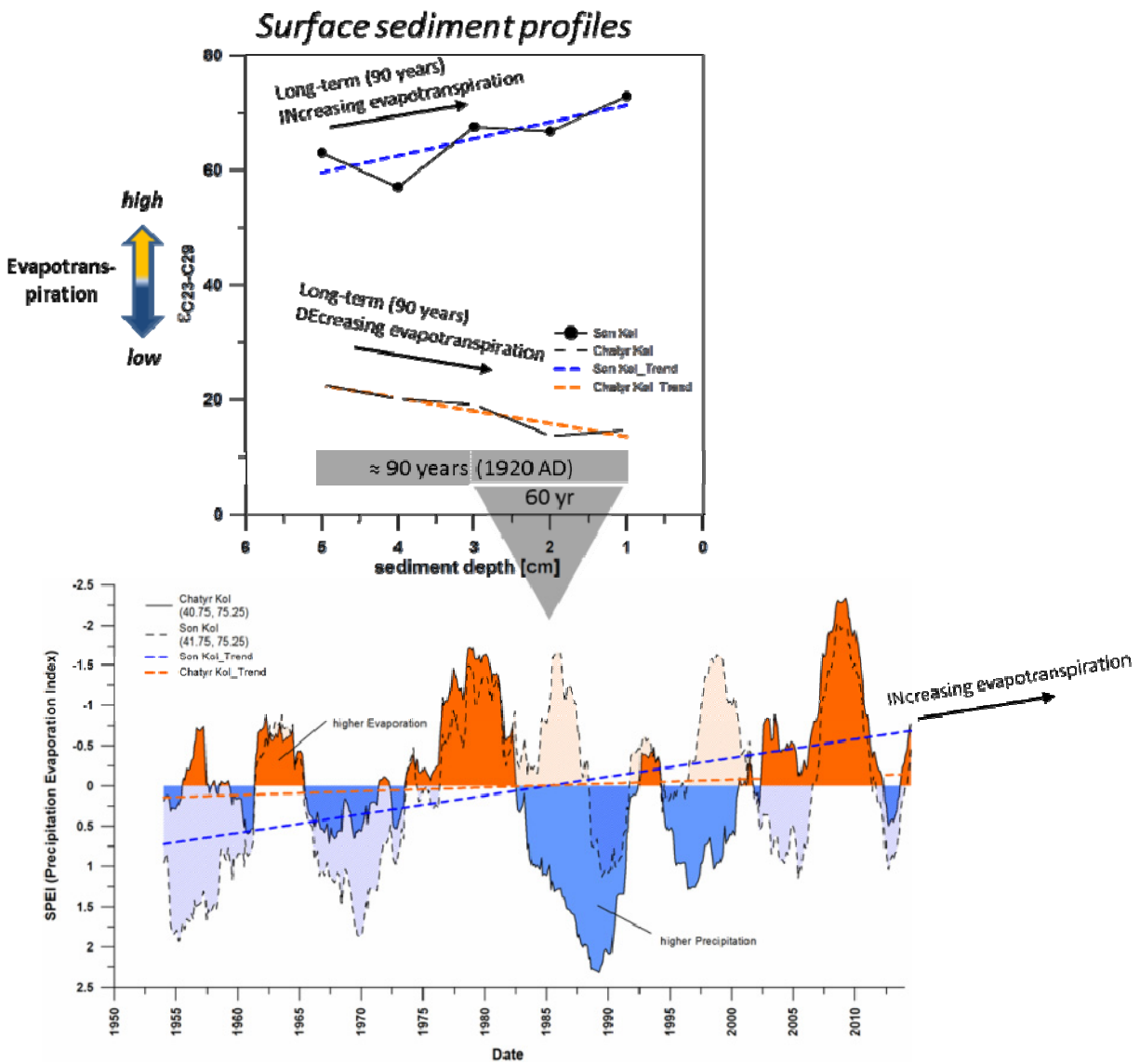


Abb. 1.19: Vergleich von klimatologischen Messdaten (Niederschlags-/Verdunstungs-Index SPEI) der letzten 60 Jahre mit rekonstruierten Verdunstungsraten aus den Oberflächensedimenten des Chatyr Kol und Son Kol. Am Son Kol zeigt sich eine Zunahme der Verdunstung innerhalb der letzten 90 Jahre, wohingegen am Chatyr Kol eine Abnahme bzw. Stabilisierung erkennbar ist.

Zur Bewertung der Hydrologie von Chatyr Kol und Son Kol im globalen Vergleich wurden beide mit verschiedenen See-Transekten (Garcin *et al.*, 2012; Günther *et al.*, 2013; Polissar & Freeman, 2010; Sachse *et al.*, 2004) mittels *Principle Component Analysis* (PCA) verglichen (Abb. 1.20).

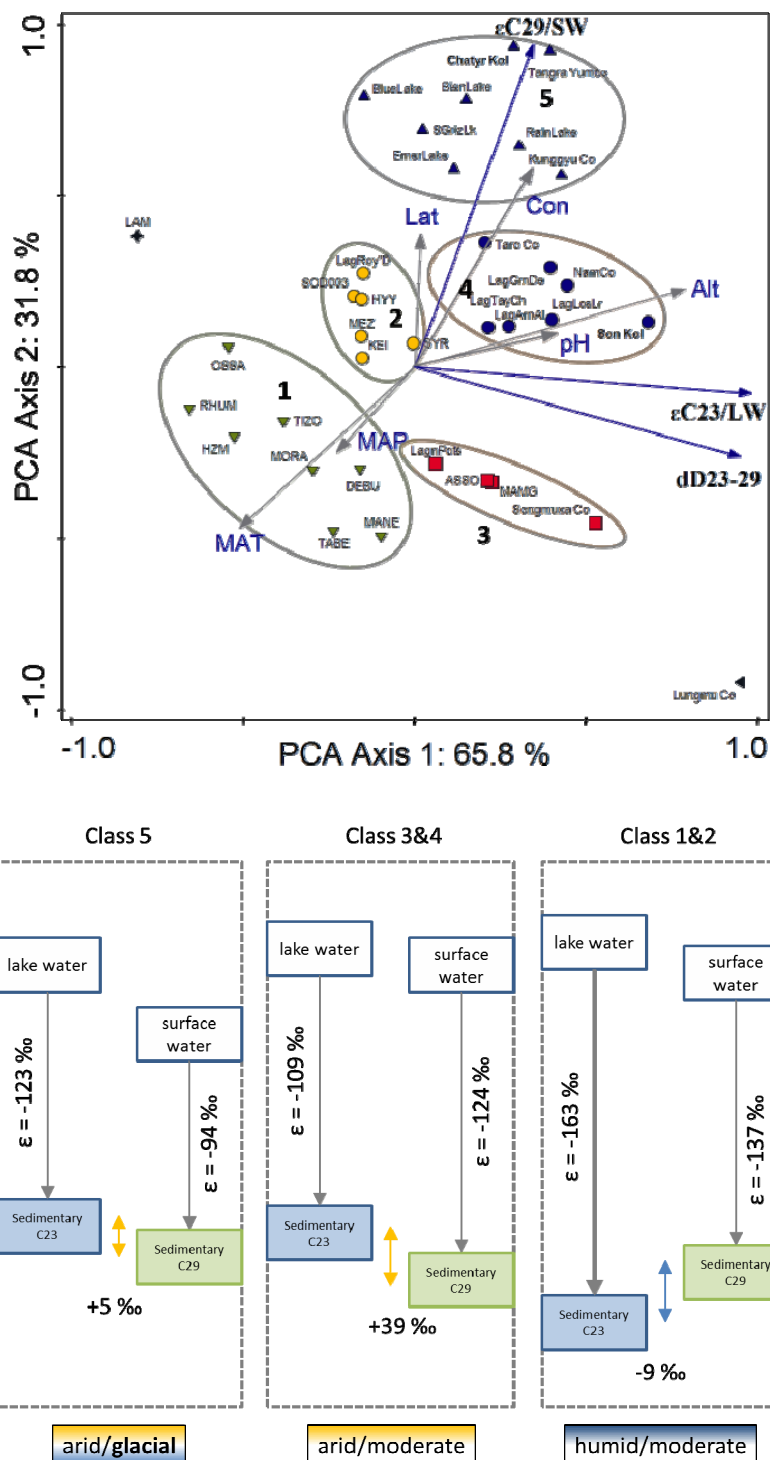


Abb. 1.20: Einteilung verschiedener Seesysteme aus globalen Transekten nach Fraktionierungsintensitäten mittels PCA. Die drei Hauptklassen unterscheiden sich in Aridität, Schmelzwassereintrag und Temperatur. Der Chatyr Kol ist durch aride Bedingungen und Schmelzwassereintrag charakterisiert, wohingegen der Son Kol ausschließlich durch aride Bedingungen gekennzeichnet ist.

Als Kriterien wurden die isotopische Fraktionierung zwischen dem Oberflächenabflusswasser und dem sedimentären *n*-Alkan *n*-C₂₉ ($\epsilon_{C29/SW}$), zwischen dem Seewasser und dem *n*-Alkan *n*-C₂₃ ($\epsilon_{C23/LW}$) sowie die Differenz zwischen *n*-C₂₃ und *n*-C₂₉ ($\epsilon_{C23-C29}$) gewählt. Infolgedessen lassen sich Seesysteme unabhängig ihrer Lage (geographische Breite, Höhe) nach bestimmten Klimafaktoren klassifizieren. Der Chatyr Kol fällt dabei in Klasse 5, welche durch arides Klima und Schmelzwassereinfluss gekennzeichnet ist. Der Son Kol hingegen gehört der Klasse 4 an, die durch arides Klima aber moderate Temperaturen ohne merklichen Schmelzwassereintrag gekennzeichnet ist. Hierbei wird deutlich, dass trotz gleicher Luftmassen und ähnlicher geographischer Lage, die Hydrologie eines Seesystems entscheidend auf die Isotopensignatur des Einzugsgebietes und der Sedimente einwirkt. Zudem können relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsmenge und Temperatur lokal sehr unterschiedlich sein. Somit ist die Erfassung der rezenten Hydrologie eines Seesystems von entscheidender Bedeutung für die paläoklimatische Interpretationen anhand der Sedimente.

Rezente Artenzusammensetzung der Ostrakodenfauna im Son Kol und Chatyr Kol und Bereitstellung einer taxonomischen Grundlage zur Bestimmung der Ostrakoden Zentralasiens

Um die rezenten limnologischen Verhältnisse in den beiden kirgisischen Seen Son Kol und Chatyr Kol zu charakterisieren und somit letztendlich einen Beitrag zum besseren Verständnis limnologischer Veränderungen in der Vergangenheit leisten zu können, wurden die Oberflächensedimente der beiden Seen auch im Hinblick auf die rezente Artenzusammensetzung der Ostrakodenfauna analysiert. Im Son Kol sind derzeit acht Ostrakodentaxa verbreitet (siehe Anhang), die vor allem Süßwasser bis oligohaline Gewässer mit kühlen Wassertemperaturen bevorzugen. Im Chatyr Kol konnte bei insgesamt schlechter Erhaltung der Ostrakodenschalen nur die Art *Limnocythere inopinata*, die höhere Salinitäten bevorzugt und hohe Alkalinitäten toleriert, rezent nachgewiesen werden. Die durchgeführten Arbeiten zur Artenzusammensetzung der rezenten Ostrakodenfauna liefern darüber hinaus eine taxonomische Grundlage für die Bestimmung der in Zentralasien vorkommenden Ostrakoden. So kann die detaillierte Dokumentation der im Son Kol und Chatyr Kol sowie in den weiteren untersuchten kirgisischen Seen nachgewiesenen Ostrakodentaxa (Abb. 1.21) zukünftig als Bestimmungshilfe genutzt werden. Eine detaillierte Zusammenstellung der Autökologie aller nachgewiesenen Taxa (siehe Anhang) liefert darüber hinaus einen Ansatz zur Interpretation der Artenvorkommen.

Abb. 1.21: Ostrakodentaxa des Son Kol, Chatyr Kol, Aram Kol, Akk Kol, Sary Chelek, Kyle Kol, Kara Kol und Tchatcha Kol: **A** *Candona neglecta*, RV, lv, iv. **B** *Candona candida*, RV, lv, iv. **C** *Candona weltneri*, LV♂, lv, iv. **D** *Candona weltneri*, RV♀, lv, iv. **E** *Cyprina ophthalmica*, RV, lv, iv. **F** *Cypridopsis cf. vidua*, LV, lv, iv. **G** *Pseudocandona cf. sarsi*, LV, lv, iv. **H** *Pseudocandona sp.*, RV, lv, iv. **I** *Fabaeformiscandona cf. danielopoli* LV, lv, iv. **J** *Fabaeformiscandona sp.*, LV, lv, iv. **K** *Fabaeformiscandona caudata* LV, lv, iv. **L** *Fabaeformiscandona sp. (?fabaeformis)*, LV, lv, iv. **M** *Eucypris mareotica*, RV, lv, iv. **N** *Eucypris afghanistanensis*, RV, lv, iv. **O** *Eucypris sp.*, LV, lv (REM). **P** *Cytherissa lacustris*, RV, lv, iv. **Q** *Ilyocypris bradyi*, RV, lv, iv. **R** *Ilyocypris sp.*, LV, lv, iv. **S** *Limnocythere sp.*, LV, lv, iv. **T** *Limnocythere inopinata*, LV, lv, iv. **U** ?*Prolimnocythere sp.*, LV♂, lv, RV♀, lv. Abkürzungen: RV – rechte Klappe, LV – linke Klappe, lv – Lateralansicht, iv – Innenansicht.



Arbeiten an weiteren Seesedimentarchiven in Kirgistan

Im Rahmen der Suche nach weiteren potenziellen Seesedimentarchiven für hochauflösende Paläoklimarekonstruktionen konnten darüber hinaus während zwei Feldkampagnen in 2011 und 2012 mehrere Sedimentbohrkerne von bis zu 1 m Länge aus vier kleinen Seen im Sary Chelek Nationalpark in Westkirgistan (Aram Kol, Irik Kol, Kyle Kol, Tchatcha Kol) sowie aus drei weiteren Seen Zentral- und Ostkirgistan (Ak Kol, Kara Kol, Kara Köl) gewonnen werden (Abb. 1.1). Allerdings zeigte sich, dass die Sedimente dieser Seen bis auf die des Aram Kol im Sary Chelek Nationalpark aufgrund des Fehlens einer jahreszeitlichen Lamination und organischer Makroreste für verlässliche ^{14}C -Datierungen für hochauflösende (jahrgenaue) Klimarekonstruktionen nur in begrenztem Maße geeignet sind. Nichtsdestotrotz wurden Proben für Sedimentdünnchliffe sowie mikropaläontologische und schwermetallanalytische (siehe unten) Untersuchungen entnommen und analysiert.

Des Weiteren wurde im Jahr 2013 eine mit erheblichem technischem Aufwand verbundene Bohrung auf dem mehr als 220 m tiefen Bergsturzsee Sary Chelek durchgeführt. Nachdem hier bereits im Jahr 2012 erste Untersuchungen mit Wassersonden unternommen wurden, um die rezenten limnologischen Bedingungen in diesem See charakterisieren zu können, konnten im Folgejahr mehrere Sedimentkerne von bis zu 1 m Länge gewonnen werden. Da in unmittelbarer Nähe des Sary Chelek im Rahmen des TP3 seit 2012 dendroklimatologische Analysen sowie dendroökologisches Monitoring durchgeführt werden, bieten die gewonnenen Sedimentkerne erstmals die Möglichkeit eines direkten Vergleichs zwischen den in Baumringen und Seesedimenten archivierten Klimasignalen an einem Standort. Erste geochemische Analysen an den gewonnenen Sedimenten, die größtenteils wahrscheinlich saisonal laminiert sind und somit ein viel versprechendes regionales Klimaarchiv darstellen, wurden bereits vorgenommen. Darüber hinaus wurde am und im Sary Chelek ein umfangreiches limnologisches Monitoring-Netzwerk (Sedimentfallen; Temperatur-, Sauerstoffgehalt- und Salinitätslogger; Wetterstation) installiert, um die Sedimentationsprozesse im See und den Transfer von Klimasignalen in die Seesedimente besser verstehen zu können. Ein ähnlich konfiguriertes Monitoring wurde auch im benachbarten See Aram Kol installiert, da die hier bereits 2012 gewonnenen Sedimentkerne auf ein mögliches Potenzial dieser See für paläoklimatische Studien hindeuteten. Während einer weiteren Geländekampagne im Herbst 2014 konnten neben der Datenakquise der im Sary Chelek und Aram Kol installierten Monitoringsysteme weitere Sedimentkerne aus den beiden Seen gewonnen werden. Sowohl die Sedimente als auch die Monitoringdaten werden in den kommenden Monaten detailliert untersucht bzw. ausgewertet.

Rezente Deposition von Schwermetallen in Seesedimenten aus Kirgistan

Mit Hinblick auf den Einfluss der Industrialisierung auf die Seen im Untersuchungsgebiet wurden die während der Feldkampagnen in Kirgistan gewonnenen Seesedimentkerne hinsichtlich ihres Gehalts an ausgewählten Schwermetallen (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) analysiert.

Die oberflächennahen Sedimente spiegeln dabei die aktuelle, anthropogen induzierte Schwermetalldeposition in den Seebecken wider, während die tiefer liegenden Sedimente die Festlegung des lokalen geogenen Hintergrundwerts erlauben. Für den Vergleich mit anderen Untersuchungen wurden die Ergebnisse in Beziehung zum globalen geogenen Hintergrund von Tongesteinen (Turekian & Wedepohl, 1961) nach dem Ansatz des Tongesteinstandards *Igeo* (Müller, 1979) gesetzt. Neben den langen Sedimentkernen aus dem Son Kol und dem Chatyr Kol wurden auch mehrere Kurzkerne aus kleineren Seen in Sary Chelek Nationalpark (Kyle Kol, Irik Kol, Tchatcha Kol) sowie aus dem Akk Kol in Zentralkirgistan untersucht. Die an den Sedimenten des Kara Kol (Südufer des Issyk Kul, Abb. 1.1) erhobenen Daten wurden aufgrund der Umlagerung des Sediments nicht im Detail ausgewertet. Eine exakte zeitliche Einordnung der gewonnenen Ergebnisse wird allerdings erst mit der Bereitstellung von ²⁴¹Am- bzw. ¹³⁷Cs-Datierungen für die untersuchten Kurzkerne möglich sein.

Bestimmung des geogenen Hintergrundwerts des Schwermetallgehalts

Zur Bestimmung des geogenen Hintergrundwerts wurden insbesondere die tieferen Bereiche der Sedimentkerne aus dem Chatyr Kol und dem Son Kol, für die gemäß den vorliegenden ¹⁴C-Datierungen ein Alter vor dem Beginn jeglichen signifikanten menschlichen Einflusses angenommen werden kann, bezüglich ihres Schwermetallgehalts untersucht. In beiden Seen liegen dabei die geogenen Schwermetallgehalte sowohl für die Elemente Zn, Pb und Cu als auch für andere Schwermetalle generell unter den Werten des Tongesteinstandards (Abb. 1.22, Tab. 1.1).

Tab. 1.1: Mittelwert (MW), Median (MD), Maximum (Max) und Minimum (Min) der Schwermetallgehalte in den tieferen Sedimentabschnitte des Chatyr Kol im Vergleich zum Tongesteinstandard (*Igeo*) nach Turekian & Wedepohl (1961).

	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)	(µg/g)
MW	0,2	11,2	59,2	28,5	24,0	0,73	29,1	13,8	72,7
MD	0,2	11,4	60,4	28,0	24,4	0,59	29,5	14,0	72,8
Max	0,3	13,6	76,9	43,4	28,4	1,26	34,0	19,7	95,1
Min	0,1	4,3	5,6	12,3	9,4	0,33	12,3	8,4	32,9
Igeo	0,3	19,0	90,0	45,0	47,2	0,85	68,0	20,0	95,0

Darüber hinaus zeigt sich in den obersten Sedimentschichten des Chatyr Kol keine rezente Anreicherung von Schwermetallen gegenüber den tieferen Schichten (Abb. 1.22), was auf einen äußerst geringen anthropogenen Schwermetalleintrag hindeutet. Die ermittelten Mittel- bzw. Medianwerte der Schwermetallgehalte in den Sedimenten des Chatyr Kol können somit als regionale geogene Hintergrundwerte herangezogen werden, um Anreicherungsfaktoren (AF) in den obersten Sedimentschichten berechnen und historische, gegenwärtige und zukünftige Schwermetallkonzentrationen bewerten zu können.

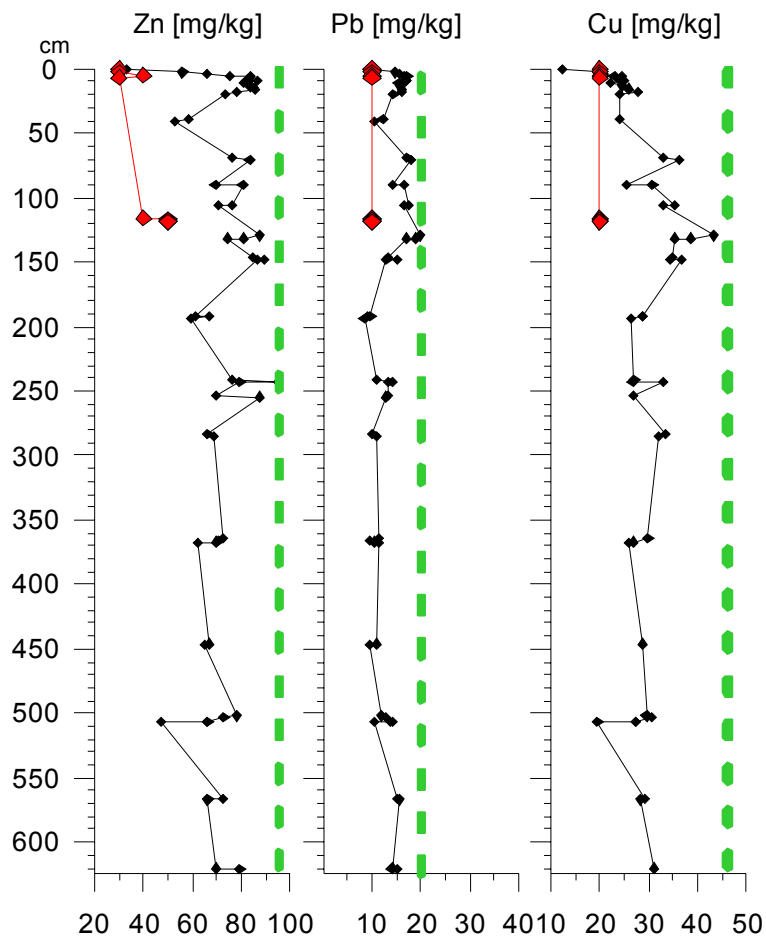


Abb. 1.22: Zn-, Pb- und Cu-Gehalte in den Sedimenten des Chatyr Kol (schwarz) und des Son Kol (rot) in Bezug zum Tongesteinstandard (grüne vertikale Linie).

Analyse rezenter Seesedimente zur Abschätzung der anthropogen induzierten Schwermetalldeposition

In den Sedimenten des Son Kol zeigt sich eine Anreicherung der Schwermetallgehalte in den obersten 3 cm (Abb. 1.23) und hier am deutlichsten für die Elemente Cd, Cu, Pb und Zn ($AF_{Cd} = 4$; $AF_{Cu} = 1,5$; $AF_{Pb} = 3$; $AF_{Zn} = 1,8$). Nichtsdestotrotz ergeben sich insgesamt sehr niedrige Schwermetallgehalte, die weit unterhalb des globalen Tongesteinstandards liegen. Da sich der Schwermetalleintrag insbesondere für Pb am deutlichsten zeigt, kann ein vorwiegend atmosphärischer Eintrag angenommen werden. Die Sedimente unterhalb von 4 cm Kerntiefe weisen Schwermetallgehalte unter denen des Chatyr Kol auf. Somit ist für den Son Kol von niedrigeren geogenen Hintergrundwerten auszugehen.

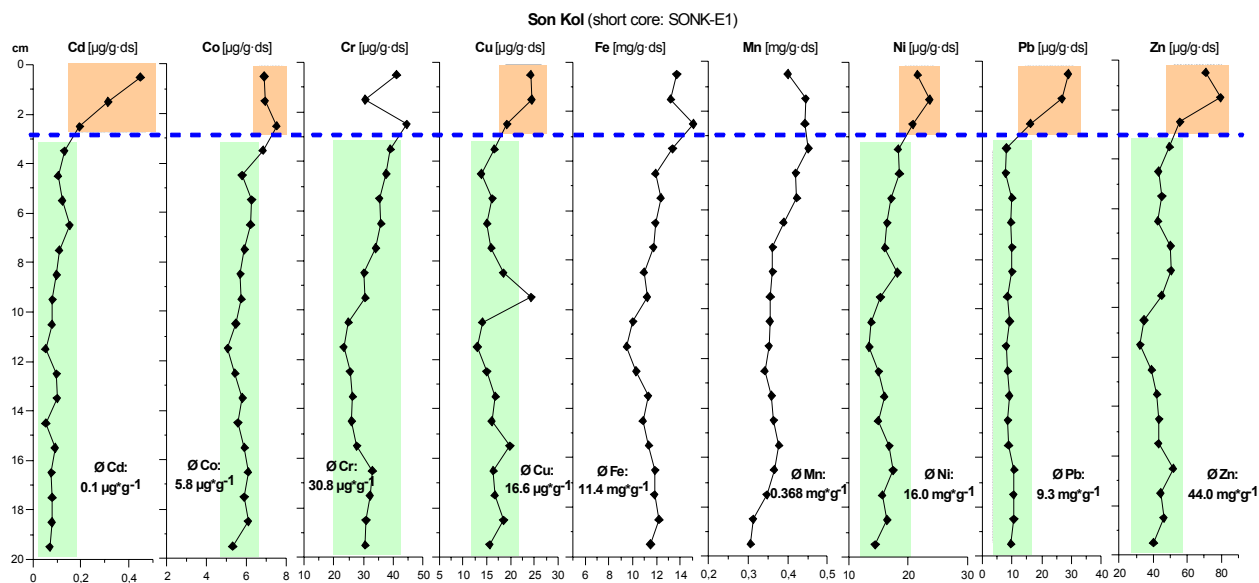


Abb. 1.23: Schwermetallgehalte in den Sedimenten des Son Kol (Sedimentkern SONK_11_E1). Der Bereich anthropogen erhöhter Schwermetallgehalte erstreckt sich bis in 3 cm Tiefe, darunter liegt der Bereich unbelasteter geogener Schwermetallgehalte (3–20 cm).

In Übereinstimmung mit den Resultaten aus dem Son Kol und dem Chatyr Kol konnten auch in den untersuchten Kurzkernen aus den Seen im Sary Chelek Nationalpark (Kyle Kol, Irik Kol, Tchatcha Kol) sowie dem Akk Kol in Zentralkirgistan (Abb. 1.24) insgesamt nur sehr geringe Anreicherungen der Schwermetallgehalte in den Oberflächensedimenten nachgewiesen werden. Die ermittelten Konzentrationen liegen dabei in allen Sedimentkernen unterhalb des globalen geogenen Hintergrundwertes für Tongesteine (Turekian & Wedepohl, 1961).

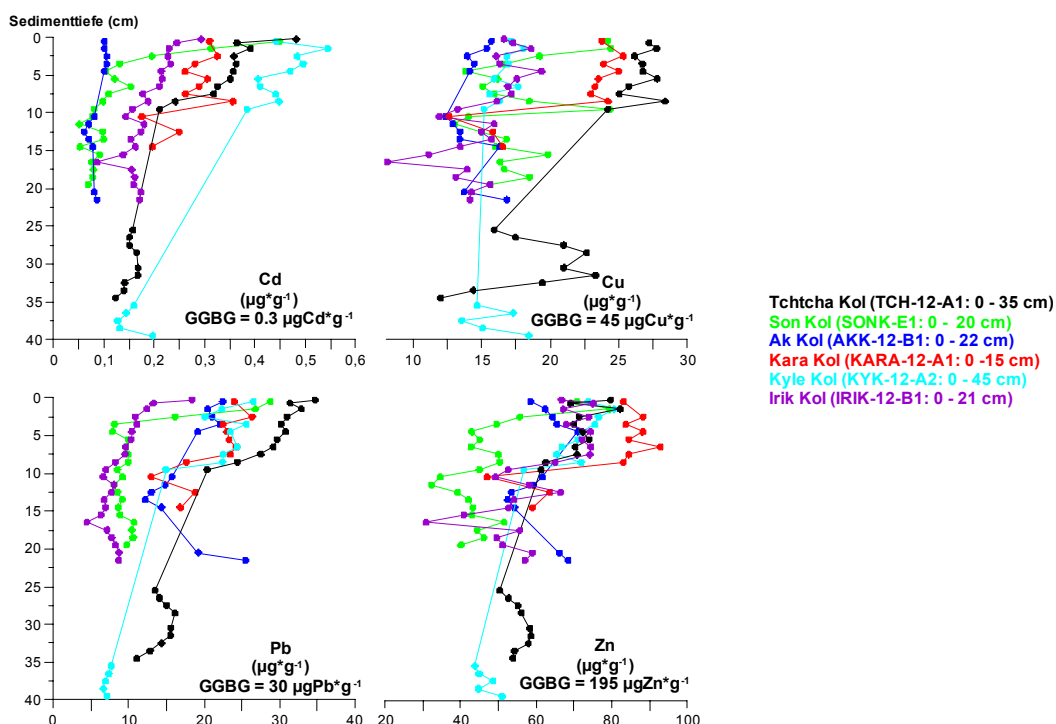


Abb. 1.24: Übersicht über die Gehalte an Cd, Cu, Pb und Zn in den Sedimenten des Tchatcha Kol, des Son Kol, des Akk Kol, des Kara Kol, des Kyle Kol und des Irik Kol.

Somit können die obersten Sedimentschichten als unbedenklich hinsichtlich ihrer Schwermetallbelastungen eingestuft werden. Trotz der insgesamt geringen Schwermetallkonzentrationen sind in einzelnen Seen leichte Anreicherungen für die Elemente Cd, Cu, Zn und Pb nachweisbar (Abb. 1.24). Die Anreicherungsfaktoren sind für jeden See unterschiedlich (Akk Kol: $AF_{Cu} = 1,4$, $AF_{Pb} = 1,6$, $AF_{Zn} = 1,3$; Kyle Kol: $AF_{Cd} = 3$, $AF_{Pb} = 3,7$, $AF_{Zn} = 1,8$; Tchatcha Kol: $AF_{Cd} = 2$, $AF_{Pb} = 2,5$, $AF_{Zn} = 1,3$), wobei sich die deutlichste Anreicherung jeweils für Pb zeigt, was auf einen überwiegend atmosphärischen anthropogenen Schwermetalleintrag in die Seen hindeutet. Durch die Identifizierung der Anreicherungshorizonte können jetzt auch gezielt Änderungen weiterer Parameter (z.B. Phosphorgehalt, Artengemeinschaften von Mikrofossilien) durch anthropogene Beeinflussung untersucht werden. Darüber hinaus können die Schwermetallgehalte der Sedimente unterhalb der Anreicherungsabschnitte als geogene Hintergrundwerte für die Bewertung von historischen, gegenwärtigen und zukünftigen Schwermetallkonzentrationen bei ähnlichen Untersuchungen herangezogen werden.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die dem GFZ zur Verfügung gestellte Zuwendung wurde im Rahmen des TP1 vorrangig für Personalkosten verbraucht. Finanziert wurden aus den bewilligten Mitteln ein Post-Doktorand (3 Jahre, TVÖD 13, 100 %), eine Technikerin (3 Jahre, TVÖD 10, 50 %) sowie mehrere studentische Hilfskräfte (insgesamt 36 Personalmonate). Weitere Kosten entstanden für extern durchgeführte Radiokarbondatierungen und Dienstreisen zu Konferenzen und Projekttreffen. Die Kosten für Geländearbeiten in Kirgistan und am GFZ durchgeführte Analysen (incl. Verbrauchsmittel) wurden vollständig vom GFZ getragen.

Die dem MPI-BGC zur Verfügung gestellte Zuwendung wurde gemäß dem Finanzierungsplan hauptsächlich für Personalmittel (1 Doktorandenstelle, 3 Jahre, TVÖD 13, 50 %) verwendet. Daneben entstanden Kosten für analytische Verbrauchsmittel (Lösungsmittel, Pipetten, Filter, Vials). Die für Dienstreisen zur Verfügung gestellten Mittel wurden für die Geländekampagne in Kirgistan im Jahr 2012 sowie für die Teilnahme an mehreren Konferenzen genutzt.

Am Institut für Geosysteme und Bioindikation der Technischen Universität Braunschweig wurde eine Wissenschaftler-Stelle (3 Jahre, TVÖD 13, 50 %) finanziert. Aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens des Wissenschaftlers wurde die bewilligte Zuwendung für die Finanzierung von studentischen Hilfskräften zur Kompensation der Wissenschaftler-Stelle eingesetzt. Ein weiterer Teil der bewilligten Mittel wurde gemäß dem Finanzierungsplan zur Deckung der Kosten für Verbrauchsmaterial verwendet.

Die der Freien Universität Berlin im Rahmen des TP1 zur Verfügung gestellten Mittel (abgerufen über die Arbeitsgruppe Cubasch / TP4) wurden ausschließlich für Verbrauchsmittel eingesetzt, um die geplanten Analysen erstellen zu können. Personalmittel wurden seitens der Freien Universität Berlin für das TP1 nicht eingesetzt.

Die der Senckenberg Forschungsstation für Quartärpaläontologie für eine Wissenschaftler-Stelle (3 Jahre, TVÖD 13, 50 %) zu Verfügung gestellten Mittel wurden größtenteils zur Deckung der Personalkosten für palynologische Arbeiten verwendet. Diese wurden während der Projektlaufzeit von Dr. F. Schlütz (Pollenanalyse und qualitative Interpretation Sihailongwan, 01.07.2011–31.12.2011), S. Hettler-Riedel (Pollenanalyse und Auswertung Son Kol, 15.02.2012–31.04.2014) und S. Hildebrandt (Pollenanalyse Chatyr Kol, 07.04.2014–31.07.2014) durchgeführt. Eine beantragte Laufzeitverlängerung bis zum 31.07.2014 aufgrund des späten Bewilligungsbescheides und der durch Personalwechsel bedingten Projektunterbrechungen wurde vom Zuwendungsgeber bewilligt. Dies hatte weder inhaltliche oder organisatorische Änderungen des Arbeitsplanes noch Auswirkungen auf das Gesamtbudget zur Folge. Mit Zustimmung des Zuwendungsgebers wurden überdies die für das Jahr 2012 bewilligten Mittel zur Finanzierung einer Tagungsreise nach Tokio sowie für Geländearbeiten in Kirgistan im Sommer 2012 ausgegeben. Die Feldkampagne wurde hauptsächlich genutzt, um rezente Pollenproben als Vergleichsmaterial zu gewinnen und die aktuelle Vegetation in der Umgebung des Son Kol zu charakterisieren.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da vor Projektbeginn nur begrenzte Informationen zur holozänen Klimaentwicklung in den ehemaligen Sowjetrepubliken Zentralasiens vorhanden waren (z.B. Beer *et al.*, 2007), waren die im Rahmen des TP1 geplanten und durchgeführten Arbeiten und insbesondere die Gewinnung neuer Sedimentkerne aus Seen in Kirgistan zwingend erforderlich. Obwohl bereits frühere Studien Seesedimente aus der Region als Paläoklimarchive nutzten (z.B. Beer *et al.*, 2007) und unter Beteiligung des GFZ schon während einer Bohrkampagne im Jahr 2007 Sedimentkerne aus dem Son Kol gewonnen worden waren (vgl. Mathis *et al.*, 2014, Huang *et al.*, 2014), stand ausreichendes und gut datiertes Kernmaterial für die geplanten hochauflösenden sedimentologisch-geochemischen und mikropaläontologischen Analysen zu Projektbeginn nicht zur Verfügung. Somit waren die durchgeführten Geländearbeiten sowohl zur Gewinnung neuer Sedimentkerne als auch zur Durchführung von Klima- und Umweltmonitoring und zur Beprobung von Oberflächensedimenten, Wasser, Pflanzen, Böden zwingend nötig, um die Rezentbedingungen zu charakterisieren und letztendlich Paläoklimarekonstruktionen durchführen zu können. Darüber hinaus konnten nur an neuen Sedimentkernen die geplanten (bio)geochemischen und mikropaläontologischen Analysen durchgeführt werden. Die Durchführung der zeit- und arbeitsintensiven Analytik und die anschließende Datenauswertung konnte vor dem Hintergrund der angestrebten umfassenden Rekonstruktion der holozänen Klimaentwicklung in Zentralasien nur durch erheblichen Personalaufwand und eine entsprechende Finanzierung sichergestellt werden. Dies gilt auch für die Gewinnung und Bearbeitung (z.B. hinsichtlich ihres Ostrakoden- und Diatomeenvorkommens, siehe Anhang) von Sedimentkernen aus weiteren Seen in Kirgistan, um neue Archive für zukünftige Vergleichsstudien zu identifizieren. Angesichts der bisher publizierten bzw. in Vorbereitung zur Publikation befindlichen Ergebnisse des TP1 können die für das Vorhaben aufgewandten Mittel aus unserer Sicht somit als angemessen bezeichnet werden.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die an den Seesedimentkernen aus Kirgistan erhobenen Proxydaten liefern einen substantiellen Beitrag zur Rekonstruktion der bisher eher lückenhaft dokumentierten holozänen Klimaentwicklung in Zentralasien. Insbesondere durch den Multiproxy-Ansatz ließen sich komplementäre Informationen gewinnen. Dies umfasst sowohl seespezifische Informationen zu hydrologischen Veränderungen, Seespiegelständen, Salinität und Biodiversität, aber auch zu Änderungen genereller klimatischer Parameter wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Die Daten rezenter Ostrakoden aus den kirgisischen Seen fließen in einen Datensatz vom Tibet-Plateau ein, der die Grundlage für die Analyse der Verbreitung von Arten in Bezug auf die jeweiligen klimatischen Verhältnisse bilden wird (siehe in Vorbereitung befindliches Publikationsvorhaben Börner et al.). In ihrer Gesamtheit tragen die gewonnenen Daten außerdem entscheidend zum besseren Verständnis großräumiger klimatischer Zusammenhänge zwischen der Westwindzirkulation der gemäßigten Breiten und dem asiatischen Monsunsystem bei und können für den Vergleich mit anderen regionalen Paläoklimaarchiven genutzt werden. Darüber hinaus liegen mit den hochauflösenden Pollendaten aus den Sedimenten des Sihailongwan sowie der darauf basierenden quantitativen Biom- und Klimarekonstruktion erstmals detaillierte paläoökologische Daten des gesamten Holozäns aus Nordostchina vor. In Verbindung mit der zuverlässigen Chronologie der Sedimente des Sihailongwan eignen sich auch diese Daten hervorragend für den Vergleich mit anderen regionalen Paläoklimadatensätzen sowie die Validierung von Modell-Ergebnissen. Insgesamt liefern die im Rahmen des TP1 gewonnenen Daten wichtige Vergleichsmöglichkeiten für andere paläoklimatische Datensätze innerhalb des CAME-Verbundes, aber auch für Modellierungsstudien.

Anzumerken ist, dass sich aufgrund der geringen Sedimentationsrate im Son Kol die geplante Untersuchung der Klimaschwankungen der letzten 2000 Jahre in hoher zeitlicher Auflösung nicht wie ursprünglich im Projektantrag vorgesehen realisieren ließ. Darüber hinaus decken die Sedimente des Son Kol nur die letzten etwa 6000 Jahre ab und ermöglicht somit nicht die ursprünglich geplante Rekonstruktion paläoklimatisch-hydrologischer Veränderungen in der Region während des gesamten Holozäns. Allerdings haben die vorliegenden Untersuchungen und Datierungen an den Sedimenten des Chatyr Kol gezeigt, dass mit diesem Sedimentkern das gesamte Holozän und möglicherweise auch Teile des Spätglazials untersucht werden können und er somit für die Erreichung des Projektziels geeignet ist. Außerdem sind die Sedimente fast durchgehend fein laminiert (sehr wahrscheinlich jahreszeitlich), was sie zu einem für diese Region bisher einzigartigen und äußerst viel versprechenden Klimaarchiv macht.

Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projekts wurden zwei Studien zur holozänen Paläoklimaentwicklung (Hydrologie, Vegetation) in Kirgistan publiziert (Huang *et al.*, 2014; Mathis *et al.*, 2014), die auf einer detaillierten Analyse von Sedimentkernen basieren, die im Jahr 2007 durch das GFZ aus dem Son Kol gewonnen wurden. Obwohl es sich bei diesen Arbeiten nicht um im Rahmen von CADY erstellte Publikationen handelt, waren an beiden Studien ehemalige Mitarbeiter des GFZ (H. Oberhänsli) bzw. am GFZ angestellte Wissenschaftler des TP1 (B. Plessen, S. Prasad) beteiligt. Da die im Rahmen dieser Studien untersuchten Sedimente jedoch nicht die letzten 2000 Jahre der regionalen Klimaentwicklung abdecken, bietet die im Rahmen von CADY an den neuen Sedimentkernen durchgeführte Erhebung zeitlich hochaufgelöster zusätzlicher Proxydaten (z.B. μ -XRF, Biomarker) die Möglichkeit eines substantiellen Erkenntnisgewinns bezüglich der regionalen Klimaentwicklung während des Holozäns. Darüber hinaus eröffnet die mikropaläontologische Untersuchung (Ostrakoden, Diatomeen) die Möglichkeit einer besseren Charakterisierung der klimatischen Bedingungen und der assoziierten Reaktion aquatischer Organismen.

Darüber hinaus wurde unter Beteiligung des TP1 eine Studie veröffentlicht, in der monsunbedingte hydrologische Änderungen am Nam Co auf dem Tibet-Plateau während der letzten 4000 Jahre in Zusammenhang mit Änderungen der Redoxbedingungen an der Sedimentoberfläche gesetzt werden (Kasper *et al.*, 2013). Dabei zeigte sich ein Zusammenhang zwischen schlechter Diatomeenerhaltung und besserer Sauerstoffversorgung des Sedimentes, was möglicherweise auch auf die Sedimente des Son Kol übertragbar ist.

Eine weitere Studie aus dem Bereich des nördlichen Tibet-Plateaus (Zhang *et al.*, 2013) verdeutlicht das Potenzial von Ostrakoden für die Rekonstruktion der Leitfähigkeit in Seen und liefert darüber hinaus Daten zu artenspezifischen Verbreitungsoptima, die zur Interpretation unserer Daten genutzt wurden (siehe Anhang zur Autökologie der Ostrakoden).

Darüber hinaus wurden mehrere Studien veröffentlicht, die einen direkten Vergleich zur aus den Pollenanalysen des Sihailongwan abgeleiteten holozänen Klimaentwicklung in Nordostchina bzw. zur generellen klimatischen Entwicklung in Zentralasien und dem Einflussbereich des asiatischen Monsunsystems erlauben (Dongges *et al.*, 2014; He *et al.*, 2013; Kalugin *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2013; Dallmeyer *et al.*, 2013; Ran & Feng, 2013; Zhu *et al.*, 2013).

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden durch die einzelnen Arbeitsgruppen des TP1 folgende Beiträge auf Konferenzen präsentiert (in chronologischer Reihenfolge):

- Schwarz, A., Klopschar, M. & Schwalb, A. (2012): **Holocene Central Asian climate dynamics reconstructed from lake sediments.** *6th Central European Diatom Meeting*, 23.–25. März 2012, Innsbruck, Österreich.
- Schwarz, A., Ptach, K., Lauterbach, S., Schwalb, A. & Prasad, S. (2012): **Multi-proxy climate reconstructions from Central Asian lake sediments.** *12th International Paleolimnology Symposium*, 21.–24. August 2012, Glasgow, Großbritannien.
- Stebich, M., Mingram, J., Spangenberg, A., Schlütz, F., Lenz, O., You, H. & Liu, J. (2013): **Climate teleconnections – Evidence from Asian pollen records.** *Indo-German Workshop Environmental Challenges in Asia*. 14.–17. Januar 2013, Potsdam, Deutschland.
- Stebich, M., Schlütz, F., Mingram, J. & Liu, J. (2013): **Holocene vegetation and climate dynamics in Northeast China inferred from palynological analyses of the Sihailongwan maar lake sediments.** *4th PAGES Open Science meeting The Past: A Compass for Future Earth*. 13.–16. Februar 2013, Goa, Indien.
- Stebich, M., Schlütz, F., Riedel, N., Mingram, J., Prasad, S. & Liu, J. (2013): **Holocene monsoon and vegetation changes – perspectives from India and Northeast-China.** *Sino-German Symposium Late Cenozoic Environmental Change in Eastern Eurasia and its Impact on Past and Present Biodiversity*, 19.–25. März 2013, Xishuangbanna, China.
- Lauterbach, S., Dulski, P., Gleixner, G., Hettler-Riedel, S., Mingram, J., Plessen, B., Prasad, S., Schwalb, A., Schwarz, A., Stebich, M. & Witt, R. (2013): **Mid- to Late Holocene climate development in Central Asia as revealed from multi-proxy analyses of sediments from Lake Son Kol (Kyrgyzstan).** *EGU General Assembly*, 7.–12. April 2013, Wien, Österreich.
- Witt, R., Lauterbach, S., Prasad, S., Mäusbacher, R. & Gleixner, G. (2013): **Recent and past hydrological and climatic changes at Lake Son Kol, Kyrgyzstan, Central Asia.** *28th Himalayan-Karakorum-Tibet Workshop / 6th International Symposium on Tibetan Plateau*, 20.–24. August 2013, Tübingen, Deutschland.
- Schwarz, A., Kasper, T., Frenzel, P., Haberzettl, T. & Schwalb, A. (2013): **Changing diatom associations and preservation as Holocene palaeoclimate indicator in Lake Nam Co (Tibetan Plateau).** *7th Central European Diatom Meeting*, 16.–20. September 2013, Thonon-les-Bains, Frankreich.
- Lauterbach, S., Plessen, B., Dulski, P., Mingram, J., Prasad, S. & CADY team members (2013): **Holocene climate variability in arid Central Asia as revealed from high-resolution sedimentological and geochemical analyses of laminated sediments from Lake Chatyr Kol (Central Tian Shan, Kyrgyzstan).** *AGU Fall Meeting*, 9.–13. Dezember 2013, San Francisco, USA.
- Witt, R., Lauterbach, S., Prasad, S., Mäusbacher, R. & Gleixner, G. (2013): **Influence of the Westerlies on arid regions during the Holocene recorded in sediments from Lake**

Son Kol and Chatyr Kol, Kyrgyzstan, Central Asia. *AGU Fall Meeting*, 9.–13. Dezember 2013, San Francisco, USA.

- Schwarz, A., Glodniok, S., Lauterbach, S., Plessen, B. & Schwalb, A. (2014): **Holocene climate-induced diatom and ostracod succession in Lake Chatyr Kol (Tian Shan, Kyrgyzstan).** *8th Central European Diatom Meeting*, 10.–13. April 2014, Zagreb, Kroatien.
- Lauterbach, S., Witt, R., Plessen, B., Dulski, P., Prasad, S., Mingram, J., Gleixner, G., Hettler-Riedel, S., Stebich, M., Schnetger, B., Schwalb, A. & Schwarz, A. (2014): **Climatic imprint of North Atlantic climate variability in the Central Tian Shan of Kyrgyzstan during the last 6000 years.** *International Conference Remote- and Ground-based Earth Observations in Central Asia*, 8.–9. September 2014, Bishkek, Kirgistan.
- Lauterbach, S., Plessen, B., Dulski, P., Mingram, J., Brauer, A. & CADY project members (2014): **Sediments from Lake Chatyr Kol (Kyrgyz Tian Shan) as an archive of Holocene climatic and environmental changes in mid-latitude Central Asia.** *International Conference Remote- and Ground-based Earth Observations in Central Asia*, 8.–9. September 2014, Bishkek, Kirgistan.
- Mingram, J., Lauterbach, S., Jusupova, K., Dubanaev, A., Orunbaev, S., Plessen, B., Schettler, G., Junusov, T. & Stebich, M. (2014): **The Kryrgyz-German Sary Chelek lake observatory.** *International Conference Remote- and Ground-based Earth Observations in Central Asia*, 8.–9. September 2014, Bishkek, Kirgistan.

Darüber hinaus wurden bereits eine Publikation zu den Analysen an den Sedimenten des Son Kol sowie eine Publikation, die sich aus den Arbeiten am Sihailongwan ergeben hat, in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht. Außerdem wurde eine populärwissenschaftliche Übersichtsarbeit zu paläoklimatischen Forschungsarbeiten in Zentralasien fertig gestellt:

- Lauterbach, S., Witt, R., Plessen, B., Dulski, P., Prasad, S., Mingram, J., Gleixner, G., Hettler-Riedel, S., Stebich, M., Schnetger, B., Schwalb, A. & Schwarz, A. (2014): **Climatic imprint of the mid-latitude Westerlies in the Central Tian Shan of Kyrgyzstan and teleconnections to North Atlantic climate variability during the last 6000 years.** *The Holocene* 24, 970–984.
- Rioual, P., Morales, E. A., Chu, G., Han, J., Li, D., Liu, J., Liu, Q., Mingram, J. & Ector, L. (2014): ***Staurosira longwanensis* sp. nov., a new araphid diatom (Bacillariophyta) from Northeast China.** *Fottea* 14, 91–100.
- Mingram, J., Lauterbach, S., Prasad, S., Helle, G., Plessen, B. & Schettler, G. (2013): **Paläoklima, Umwelt und Klimawandel in Zentralasien.** *System Erde* 2013-2, 56-65.

Des Weiteren wurden innerhalb des TP1 folgende akademische Abschlussarbeiten angefertigt bzw. befinden sich in Vorbereitung (in chronologischer Reihenfolge):

- Knabe, I. (2012): **Vergleich der Schwermetallgehalte der Sedimente des Song-Kul (Kirgistan) und des Gorinsees (Deutschland, Brandenburg)**. Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin.
- Ptach, K. (2012): **Artenvergesellschaftung von Ostrakoden in einem Sedimentkern aus dem Son Kol, Kirgisien**. Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- Picht, S. (2014). **Paläoökologie limnischer Ostrakoden aus Kirgisistan (Zentralasien)**. Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- Witt, R.: **Influence of the Westerlies on Central Asian Holocene climate variability**. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena. (in Vorbereitung)

Zusätzlich zu den oben genannten Arbeiten befinden sich folgende Publikationen zurzeit in Vorbereitung für die Einreichung in begutachteten Fachzeitschriften bzw. sind bereits eingereicht:

- Börner, N., Pröttel, R., Glodniok, S., Söndgerath, D., Naumann, K., Frenzel, P., Mischke, S. & Schwalb, A.: **Environmental factors controlling ostracod distribution on the Tibetan Plateau and adjacent areas**.
- Lauterbach, S., Dulski, P., Nowaczyk, N., Mingram, J. & Brauer, A.: **Microfacies and geochemical characterization of laminated Holocene sediments from Lake Chatyr Kol, southern Kyrgyzstan**.
- Lauterbach, S., Plessen, B., Wolff, C., Glodniok, S., Schwalb, A. & Schwarz, A.: **Imprint of the mid-latitude Westerlies on winter precipitation in Central Asia evidenced by combined $\delta^{18}\text{O}$ records from Kyrgyz lake sediments and speleothems**.
- Schwarz, A., Schwalb, A., Glodniok, S., Lauterbach, S., Mischke, S. & Mingram, J.: **Holocene climate-induced diatom and ostracod successions in Lake Son Kol (Central Tian Shan, Kyrgyzstan)**.
- Stebich, M., Rehfeld, K., Schlütz, F., Tarasov, P. & Mingram, J.: **Holocene vegetation and climate dynamics based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake, North-east China**.
- Witt, R., Günther, F., Doberschütz, S., Lauterbach, S., Mäusbacher, R., Yao, T. & Gleixner, G.: **Biogeochemical evidence for a freshwater period during the Last Glacial Maximum recorded in lake sediments from Nam Co, southern-central Tibetan Plateau**. (eingereicht).
- Witt, R., Lauterbach, S., Toney, J., Mäusbacher, R. & Gleixner, G.: **Reconstruction of the mid-latitude Westerlies dominated early to late Holocene climate using sedimentary *n*-alkanes and alkenones from lakes Chatyr Kol and Son Kol, Kyrgyzstan, Central Asia**.

- Witt, R., Toney, J., Lauterbach, S., Mäusbacher, R., & Gleixner, G.: **Recent and Holocene hydrological conditions of two Kyrgyz lakes Chatyr Kol and Son Kol support Central Asian climate dynamics under Westerlies influence.**
- Wolff, C., Plessen, B., Dudashvili, A., Breitenbach, S., Cheng, H., Edwards, R. L. & Strecker, M.: **Centennial-decadal precipitation evolution in Central Asia during the last 5000 years.** (eingereicht)

Teilprojekt 2: Rekonstruktion der Westwind- und Monsunvariabilität in Zentralasien mit Seesedimenten – Umweltmonitoring und Proxykalibration

Zuwendungsempfänger/ Förderkennzeichen

Friedrich-Schiller-Universität Jena

03G0813F

Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse in Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen

Im Rahmen des Teilprojekts 2 (TP2) sollten, exemplarisch für einen auf dem Tibet-Plateau gelegenen See, die aktuell am Nam Co ablaufenden seeinternen Prozesse und deren Abbildung in den Seesedimenten untersucht werden, da ohne Kenntnis und Verständnis dieser Prozesse die Interpretation der aus den Sedimenten gewonnenen Proxydaten bezüglich möglicher Klimasignale nur eingeschränkt möglich ist. Es handelt sich dabei in erster Linie um die Prozesse des vertikalen und horizontalen Materialtransportes im See, die sich aus der Produktion im und dem Eintrag in den See ergeben und durch meteorologische, hydrologische und hydrochemische Parameter gesteuert werden. Der Eintrag (Feststoffe, Lösung, Pollen, etc.) in den See wird im Wesentlichen durch Niederschlag und Wind gesteuert und enthält somit ein Klimasignal. Dies wird allerdings in jüngster Zeit von einem anthropogenen Signal überlagert, das sich unter anderem aus der verstärkten Bodenerosion im Zusammenhang mit der intensivierten Landnutzung im Einzugsgebiet ergibt. Entsprechendes gilt auch für die anorganische und organische Sedimentproduktion im See, die ebenfalls direkt oder indirekt Klimasignale aber auch anthropogene Überprägung abbildet. Die limnologischen Untersuchungen konzentrierten sich deshalb zum einen auf Prozesse, die von den Zuflüssen geprägt werden und zum anderen auf Prozesse die in der Wassersäule des Sees ablaufen und sowohl zyklische als auch saisonale Änderung aufweisen. Beide zusammen steuern in verschiedenen Zwischenschritten den resultierenden Sedimentflux zum Seeboden, aber auch Erosions- und Lösungsvorgänge am Seeboden und in der Wassersäule. Mit der Aufklärung dieser Prozessdynamik sollte ein Beitrag zum besseren Verständnis der zurückliegenden und aktuellen Umweltveränderungen auf dem Tibet-Plateau geleistet werden.

Dies umfasste folgende Arbeiten:

- Erfassung und Quantifizierung des Einflusses klimatischer Faktoren (z.B. Niederschlag, Verdunstung) auf Transportprozesse in den See und im See sowie die Sedimentation
- Abschätzung des anthropogenen Einflusses auf Transportprozesse und Sedimentation
- Erarbeitung eines prozessbasierten Verständnisses für die Signaltransformation in die Sedimente und die gewonnenen Proxydaten
- Validierung der Signaltransformation über einen längeren Zeitraum (Dekaden) mit Hilfe von Multiproxy-Untersuchungen an den oberflächennahen Sedimenten

Zur Erfassung des Materialtransports im See wurden mit den bewilligten Investitionsmitteln zwei Moorings konstruiert, die mit sequentiellen Sedimentfallen und je 2 Multiparameter-Sonden sowie Auslösesystemen ausgerüstet und fest im Nam Co installiert wurden. Ergänzt wurde dies durch Thermistoren, die an den Moorings in verschiedenen Wassertiefen eingesetzt wurden, sowie speziell durch das Institut für Materialwissenschaften der FSU Jena angefertigte Integralfallen, die in unterschiedlichen Wassertiefen installiert wurden. Darüber hinaus wurde vom ITP-CAS ein drittes, ursprünglich im Projekt nicht vorgesehenes Mooring mit Integralfallen und Thermistoren bereitgestellt. Eine weitere Multiparameter-Sonde wurde für mobile Messungen der limnologischen Parameter gekauft und eingesetzt. Für das Auslesen der Sonden, das Leeren der Fallen und die Probengewinnung und -analyse in China wurden die bewilligten Personal- und Reisemittel eingesetzt. Die röntgendiffraktometrischen sowie geochemischen Messungen an den Fallensedimenten erfolgten im Labor des Institutes für Geographie der FSU Jena, die rasterelektronischen Aufnahmen am Institut für Materialwissenschaften der FSU Jena, die Diatomeenanalysen am Institut für Geosysteme und Bioindikation der TU Braunschweig (Projektpartner im TP1) und die Analysen der Ostrakoden am Institut für Geowissenschaften der FSU Jena.

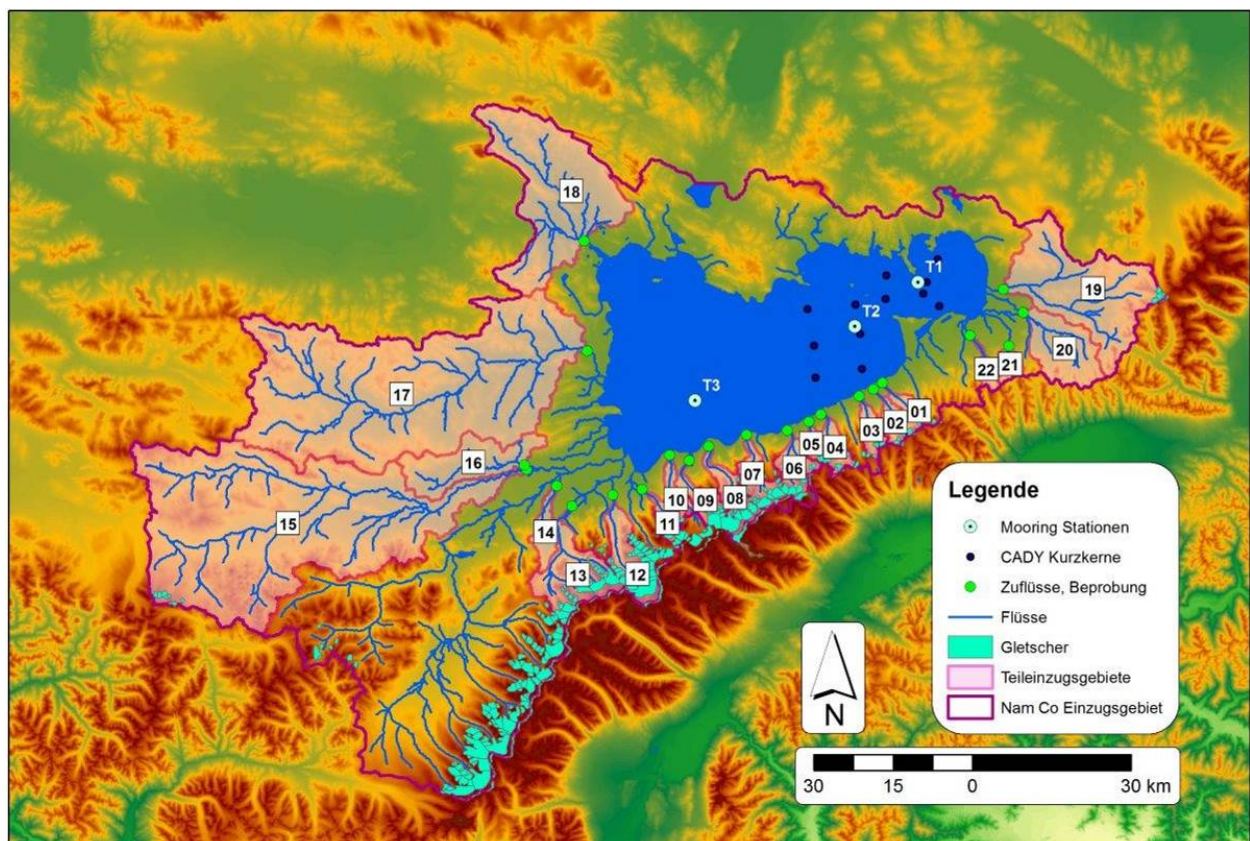


Abb. 2.1: Morphologische Karte des Nam Co mit seinen Teileinzugsgebieten und den Gletschern der Nyantangula Range sowie allen Beprobungslokalitäten. Die Beprobungsstationen der Zuflüsse sind grün markiert. Die Probenahme der lebenden Ostracoden erfolgte in der Nähe der Mooring-Station T1. Die Probenahme der Oberflächensedimente und -kerne konnte aus Zeitgründen nicht im vollen Umfang durchgeführt werden und wurde daher durch Messungen aus früheren Kampagnen ergänzt.

Die durchgeführten Messungen liefern erstmals für einen See des Tibet-Plateaus hoch aufgelöste Datensätze physikalischer, geochemischer und isotopenchemischer Parameter, die als Grundlagen für die Prozessforschung und damit zur besseren Interpretation aus Sedimentbohrkernen gewonnener Proxydaten hinsichtlich klimatischer Veränderungen verwendet werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse der Prozessstudie liefern für alle Seenprojekte in CAME geeignete Grundlagen zur Validierung der Klima-Proxydaten.

Mit den im Nam Co installierten Monitoringsystemen wurden ab November 2011 zeitlich hoch aufgelöst alle relevanten Parameter zur Analyse der Limnodynamik erfasst. Dabei zeigte sich eine generelle Übereinstimmung der Dynamik an den Stationen T1 (östliches Teilbecken) und T2 (Hauptbecken, Abb. 2.1) bei gleichzeitig schneller ablaufenden Veränderungen im kleineren östlichen Teilbecken. Aufgrund des enormen Datenumfangs wird sich die Darstellung an dieser Stelle auf die Station T2 und die wichtigsten Befunde konzentrieren. Dabei werden zunächst ausgewählte physikalische und chemische Seeparameter vorgestellt und anschließend die Verbindung zwischen den Zuflüssen und der Dynamik im See diskutiert. Ein Beispiel für die Messungen mit der mobilen Multiparameter-Sonde zeigt Abb. 2.2.

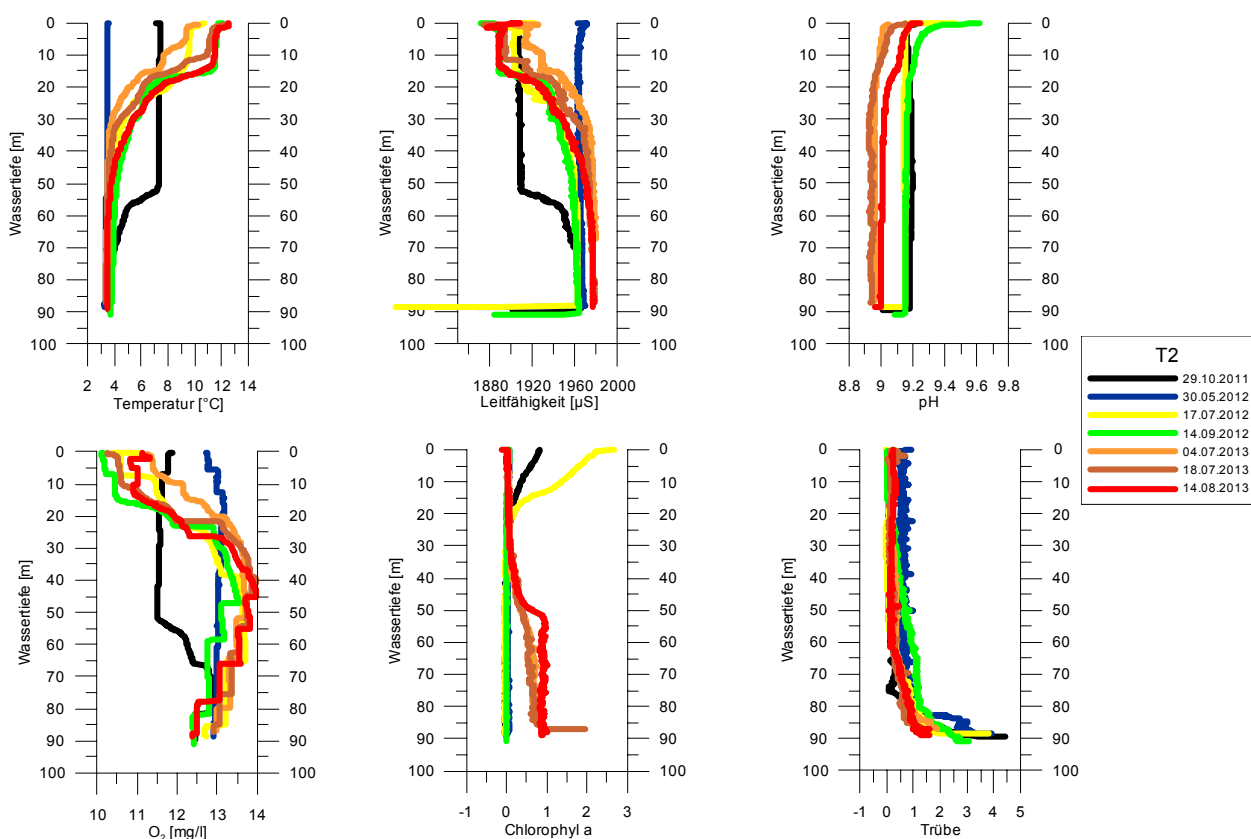


Abb. 2.2: Tiefenprofile für Temperatur, Leitfähigkeit, pH, O₂, Chlorophyll a und Trübe als Ergebnis der Messungen mit der mobilen Multiparameter-Sonde an der Station T2 im Zeitraum Oktober 2011 bis August 2013.

Die Sensitivität der eingesetzten Monitoringsysteme zeigt sich unter anderem in den aus den Druckmessungen abgeleiteten länger- und kurzfristigen Wasserstandsänderungen (Abb. 2.3A). Der Kurvenverlauf zeigt deutliche jahreszeitliche Veränderungen im Wasserstand von bis zu 1 m, die einerseits auf Niederschlags- und Schmelzwassereinträge und andererseits auf herbstli-

che Verdunstungsverluste zurückzuführen sind. Darüber hinaus ist in der zweiten Jahreshälfte 2012 eine deutliche Zunahme der kurzfristigen Schwankungen festzustellen, die als Wellengang interpretiert werden. Das Aussetzen dieser Schwankungen markiert das Zufrieren des Sees.

Mit den gewonnenen Temperaturdaten (Abb. 2.3B) kann gezeigt werden, dass es sich beim Nam Co um einen dimiktischen See mit zwei Vollzirkulationszeiten handelt. Dabei fällt die Zirkulationsphase im Frühjahr (Mai) mit zwei Wochen relativ kurz aus, wogegen sie im Herbst (November / Dezember) vier Wochen andauert. Im Frühjahr erfolgt die Ausbildung der Thermokline innerhalb weniger Tage bis in eine Wassertiefe von etwa 22 m; die maximale Wassertemperatur an der Oberfläche wird mit 12°C Anfang August erreicht. Nach dem Zufrieren zeigt sich eine winterliche Homothermiephase mit einer graduellen Erwärmung des Sees vom Seeboden aus und einer resultierenden inversen Temperaturschichtung der Wassersäule. Dies beweist erstmals, dass Permafrostbedingungen unter dem See auszuschließen sind. Im September 2012 zeigen die Messungen der Wassertemperatur Tagesschwankungen bis in eine Wassertiefe von mehr als 36 m (Abb. 2.3C).

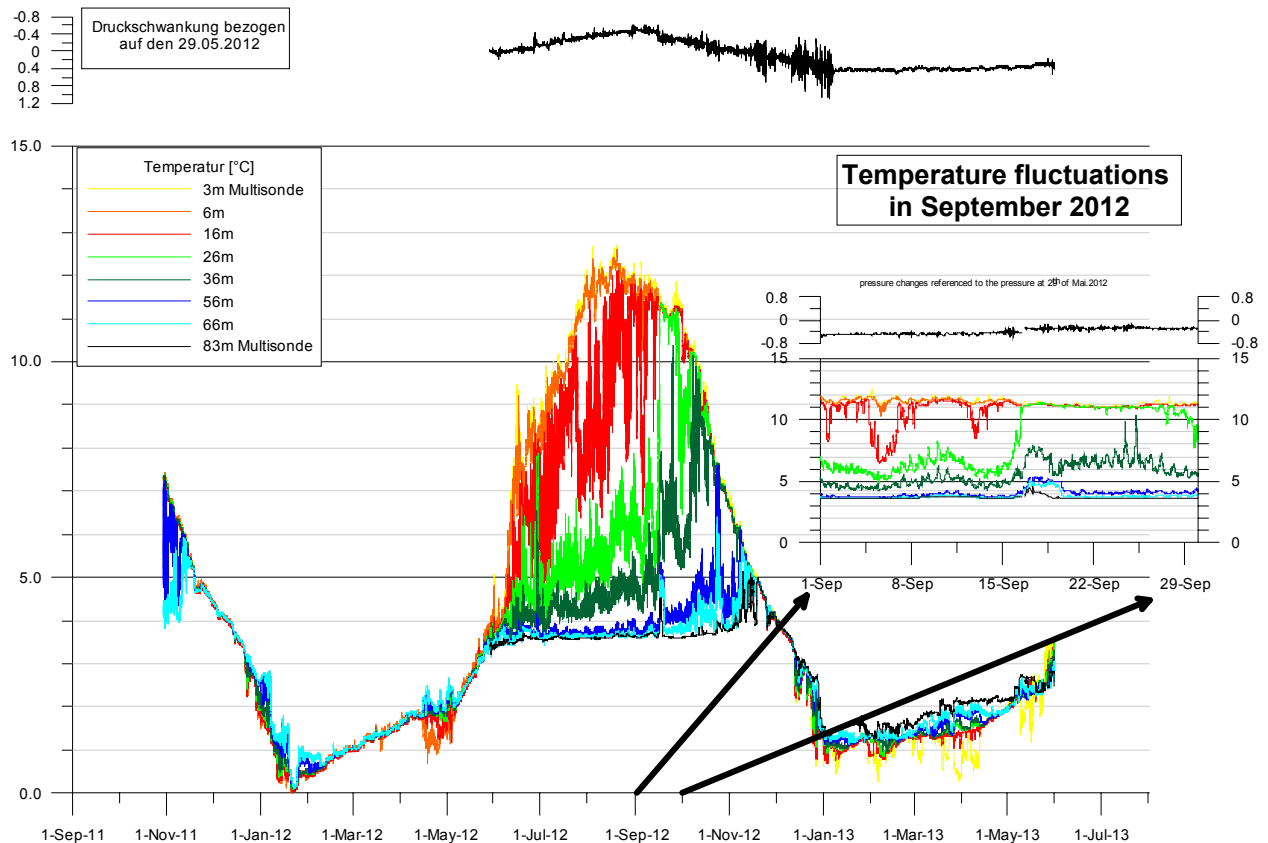


Abb. 2.3: Wasserstandsänderungen (oben) und Wassertemperatur in 6 bis 83 m Wassertiefe an der Station T2 zwischen November 2011 und Juni 2013 sowie zeitlich hoch aufgelöst für den September 2012.

Allerdings überprägt die permanente Winddurchmischung die kurzfristigen Schwankungen im oberflächennahen Bereich und induziert homotherme Bedingungen im Wasserkörper über 6 m Wassertiefe. Darüber hinaus lässt sich in größeren Wassertiefen eine deutliche Dynamik erkennen: In 16 m Wassertiefe sind mehrmals mittelfristige deutliche Temperaturänderungen festzu-

stellen, die auf eine Zufuhr und Einschichtung kälteren Wassers und dessen anschließender Vermischung zurückzuführen sind. Demgegenüber steht die Einschichtung eines seebodennahen, dichten aber wärmeren Wasserkörpers (z.B. am 17. September 2012), der sich über 3 Tage von 93 m bis 36 m Wassertiefe bemerkbar macht.

Der Verlauf des Sauerstoffgehalts im Messzeitraum dokumentiert sowohl Änderungen im Tiefenwasser als auch an der Oberfläche. Diese sind zum Teil parallelisierbar mit den zuvor beschriebenen Einschichtungsvorgängen (z.B. Mitte September 2012). Dabei herrscht während des gesamten Messzeitraumes in allen Tiefen Sauerstoffsättigung (Abb. 2.2). Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Abbau der organischen Substanz (allochthone und autochthone Bildungen) im See unter oxidativen Bedingungen erfolgen kann. Die geringsten Sauerstoffgehalte werden im Tiefenwasser gegen Ende der Monsunperiode erreicht, was auf den verstärkten Eintrag und Abbau organischer Substanz hindeuten könnte. Während der Eisbedeckung ergeben sich starke Schwankungen, die auf die oben angesprochene temperaturinduzierte vertikale Zirkulation hindeuten.

Der pH-Wert als wichtiger chemischer Parameter zeigt eine eher geringe Schwankungsbreite im alkalischen Bereich (pH 9,15–9,35) mit leichtem Jahresgang (Abb. 2.2). Demgegenüber sind die Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit deutlich stärker ausgeprägt (Abb. 2.4) und zeigen zwei jahreszeitliche Regimes.

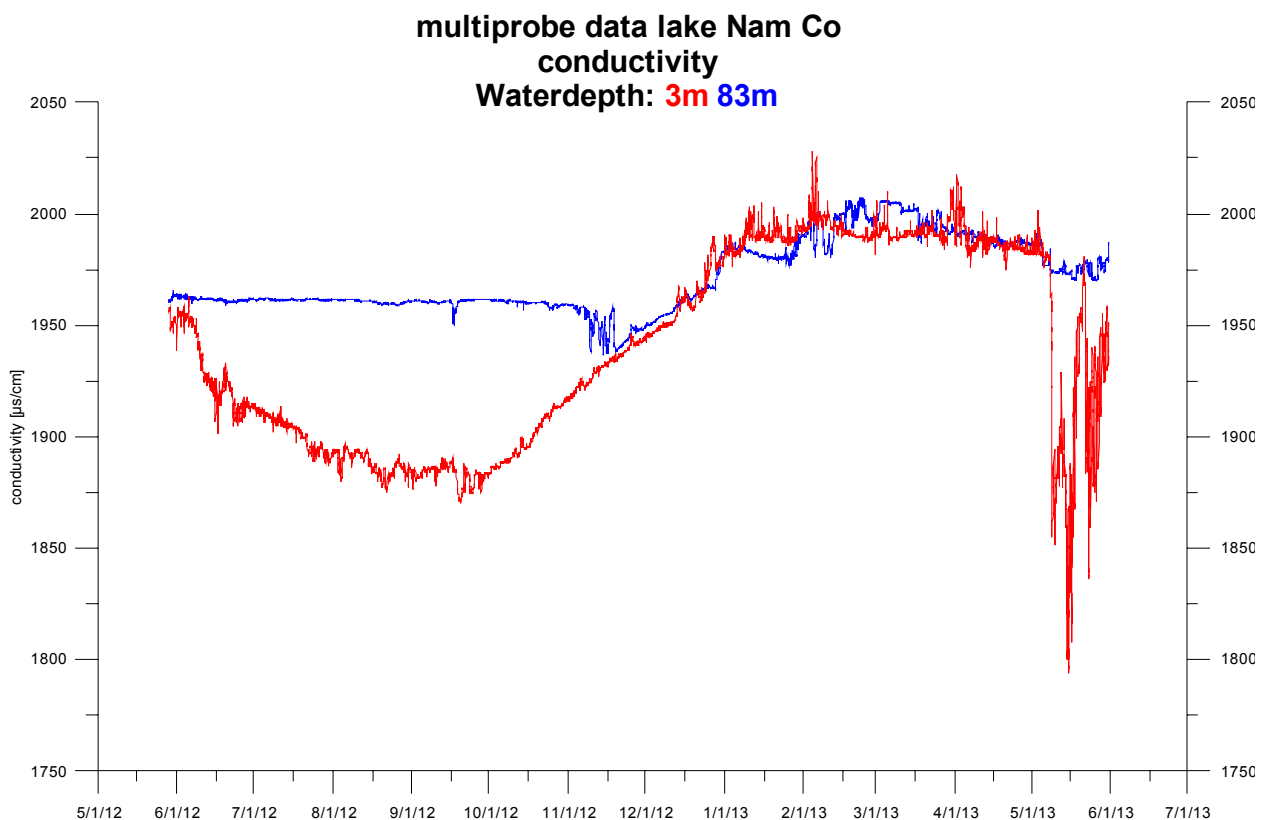


Abb. 2.4: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit in 3 und 83 m Wassertiefe an der Station T2 von November 2011 bis Juni 2013.

Im Sommer und Herbst zeigen sich deutliche Veränderungen in der Differenz zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser, die ihr Maximum gegen Ende der Monsunperiode erreicht. Die Aufhebung der Unterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser spiegelt das Einsetzen der Homothermie im November / Dezember und die thermisch bedingte Durchmischung wider (vgl. Abb. 2.2). Von Mitte Mai bis Anfang Juni 2013 zeigen sich dann starke Schwankungen, die auf einen stark wechselnden Frischwassereintrag und damit auf die Eis- und Schneeschmelze zurückgeführt werden können. Auch die kleineren Leitfähigkeitsschwankungen im Oberflächewasser während des Sommers werden wie im Fall der Wassertemperatur auf Niederschlags- und Schmelzwasserereignisse zurückgeführt. Eine Erhöhung des Seespiegels ist damit allerdings nicht verbunden. Aus den deutlichen Leitfähigkeitssignalen deutet sich aber die Möglichkeit an, die Zuflüsse zu quantifizieren.

Die Trübe-Werte im Oberflächenwasser (3 m Wassertiefe) zeigen im Jahresverlauf nur kleinskalige Variationen, wobei die höchsten Werte im März und April unter der Eisedecke gemessen werden (Abb. 2.5). Dagegen variiert die Trübe im Tiefenwasser (83 m Wassertiefe) deutlicher. Auch hier werden von Mitte Februar bis Mitte April während der Eisbedeckung Höchstwerte von bis zu 40000 FTU gemessen.

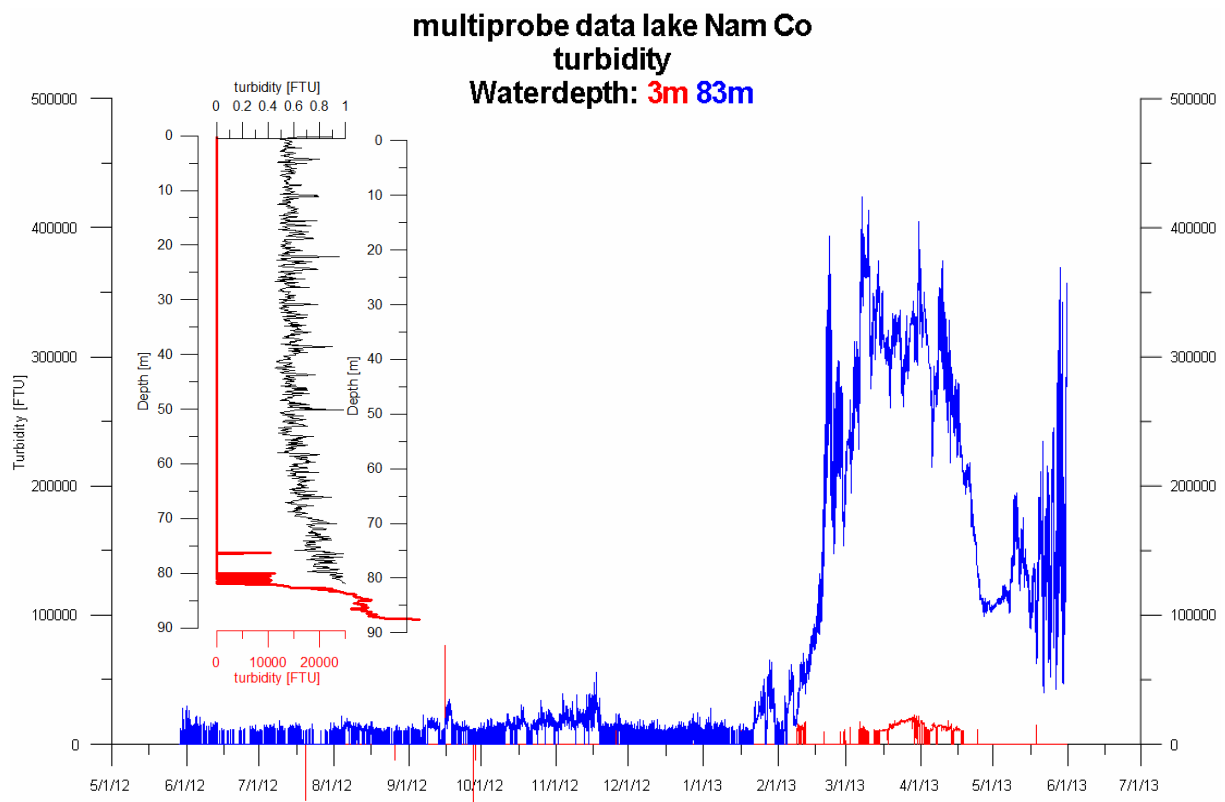


Abb. 2.5: Verlauf der Trübe über den Zeitraum von Juni 2012 bis Juni 2013 sowie ein ausgewähltes, für den Nam Co typisches Tiefenprofil mit einem Trübestrom (high-density underflow) am Seeboden.

Ähnlich hohe Werte werden sonst nur noch während der Schneeschmelze und mit Beginn der Monsunniederschläge erreicht, was darauf hindeutet, dass der Feststofftransport in die tieferen Bereiche des Sees über Trübestrome erfolgt.

Neben den mit den Multiparameter-Sonden erfassten Daten spiegeln auch die mit den Sedimentfallen gewonnenen Proben diese *in situ*-Prozesse im Sedimentationsgeschehen wider. Die Messwerte in der tiefsten Sedimentfalle liegen bei allen Messungen deutlich höher. Mit den Daten der Sedimentfallen kann außerdem die Bildung von Monohydrocalcit erstmals im Jahresgang in der Wassersäule verfolgt werden (Abb. 2.6).



Abb. 2.6: Sedimentfallenmaterial mit idiomorphen Monohydrocalcit-Kristallen (Pfeile) in einem Gemisch von Diatomeen und Mineralen. Daraus ist ersichtlich, dass der Monohydrocalcit in der Wassersäule gebildet wurde.

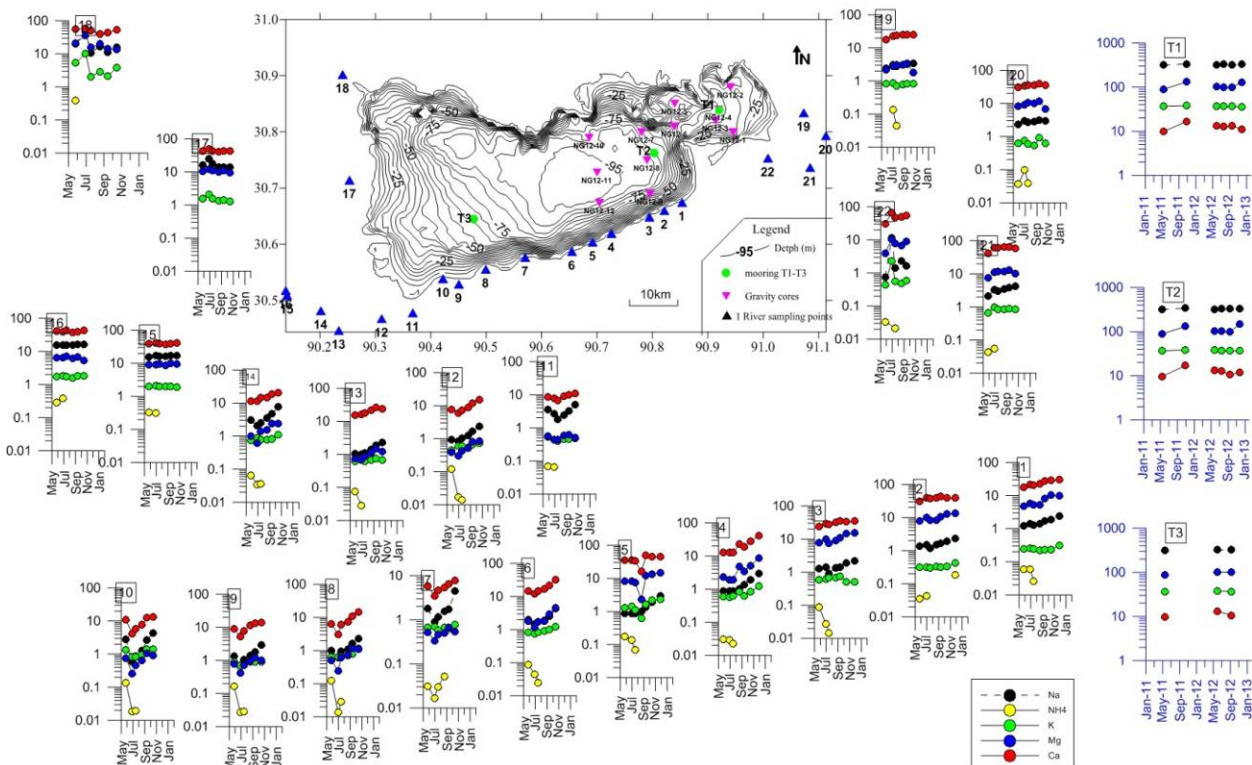


Abb. 2.7: Kationen der Wasserproben der Zuflüsse (schwarze Skalen) sowie des Sees (blaue Skalen, Mittelwerte aus Tiefenprofilen).

Die Auswertung der in den Monaten Mai bis November entnommenen monatlichen wasserchemischen Proben aus dem See und seinen Zuflüssen zeigt für die Zuflüsse zwei unterschiedliche Wassertypen (Abb. 2.7). Während die Zuflüsse mit Gletschern im Einzugsgebiet durch einen deutlichen Verdünnungseffekt während des Monsuns und insgesamt geringere Konzentrationen der gemessenen Kationen gekennzeichnet sind (z.B. Nr. 5 bis 12), zeichnen sich die Zuflüsse aus nicht vergletschertem Gebiet durch insgesamt höhere Kationenkonzentrationen sowie einen gleich bleibenden (z.B. Nr. 14 und 15) oder ansteigenden (z.B. Nr. 1 und 4) Jahresverlauf aus. Diese höheren und gleich bleibenden Konzentrationen deuten auf einen deutlich höheren Grundwasseranteil am Abfluss hin. Im See selbst bleiben die Konzentrationen im Wesentlichen konstant. Auffällig sind allerdings deutliche Unterschiede in den Konzentrationsniveaus: Während Ca gegenüber den Zuflüssen abgereichert ist, sind Na, Mg und K deutlich angereichert. Bei Na liegt die Konzentration im See etwa 100× höher als in den Zuflüssen. Die Abreicherung von Ca kann, wie die REM-Aufnahmen (Abb. 2.6) belegen, mit der Ausfällung von Calzit und Monohydrocalzit erklärt werden. Ähnlich den Kationen zeigen auch die Anionen regionale Unterschiede, insbesondere beim Verhältnis Hydrogenkarbonat / Sulfat.

In der Sauerstoffisotopie ($\delta^{18}\text{O}$) des Wassers der Zuflüsse des Nam Co sind ausgeprägte räumliche und zeitliche Schwankungen zu beobachten, wobei die Einzugsgebiete 8, 9 und 18 die höchsten Schwankungen zeigen (Abb. 2.8). Generell zeigen sich im saisonalen Verlauf die schwersten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zu Beginn der Monsunsaison (Mai) und die leichtesten Werte während des Monsunmaximums (August).

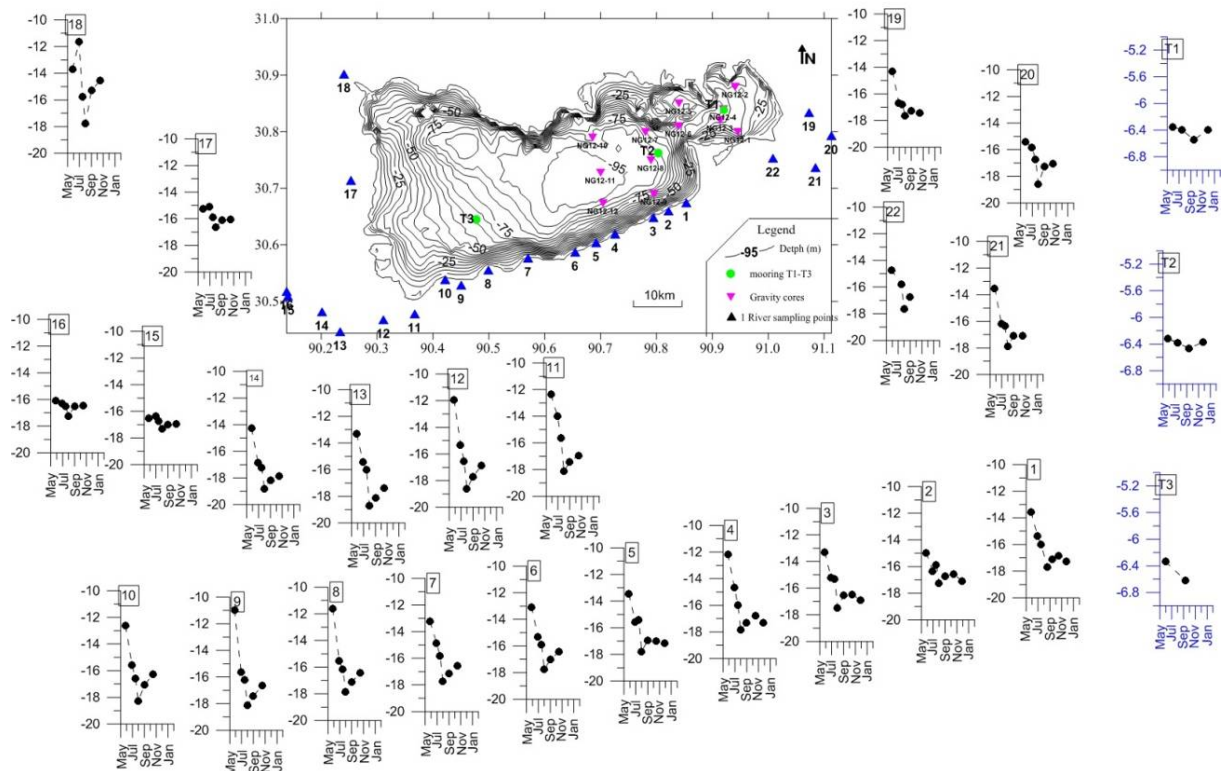


Abb. 2.8: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Wasserproben der Zuflüsse (schwarze Skalen) sowie des Sees (blaue Skalen, Mittelwerte aus Tiefenprofilen).

In der Post-Monsunzeit steigen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte dann wieder leicht um 2‰ an. Dieses saisonale Muster ist in allen Zuflüssen erkennbar, zeigt sich aber in den westlichen Einzugsgebieten (15, 16, 17) nur in stark gedämpfter Form. Die isotopische Zusammensetzung des Wassers der Zuflüsse spiegelt demzufolge in ihrem saisonalen Muster überwiegend die isotopische Zusammensetzung des lokalen Niederschlags wider, dessen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Jahren 2006 bis 2008 einen Schwankungsbereich zwischen -25‰ im Monsunmaximum und -5,3‰ zu Beginn des Monsuns zeigen. Die Monsunniederschläge im Juni, Juli und August (Mittelwerte) zeigten für diesen Zeitraum $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen -19 und -22‰ und liegen damit am Nam Co nur unwesentlich höher als in Lhasa. Die sehr schweren Werte zu Beginn des Monsuns und der Anstieg im Postmonsun könnten den für das Tibet-Plateau vermuteten *recycling effect* bestätigen.

Das Wasser der Mehrzahl der Zuflüsse des Nam Co liegt in seiner isotopischen Zusammensetzung im Bereich der *Himalayan and Tibetan Plateau River Meteoric Water Line* (Hren et. al., 2009). Die verbleibenden befinden sich alle im Westen des Sees und zeigen aufgrund ihrer großen Einzugsgebiete ebenso wie der See selbst eine isotopische Anreicherung aufgrund der Evaporation (Abb. 2.9). Die Isotopenverhältnisse des Seewassers zeigen dabei eine Signatur, die sich deutlich von der isotopischen Zusammensetzung der Zuflüsse unterscheidet. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Seewassers sind mit -6,75 ‰ bis 6,15 ‰ isotopisch deutlich schwerer als die der Zuflüsse, was auch für die δD -Werte zutrifft. Dies wird in erster Linie durch Evaporation verursacht, da es sich beim Nam Co um ein geschlossenes System handelt.

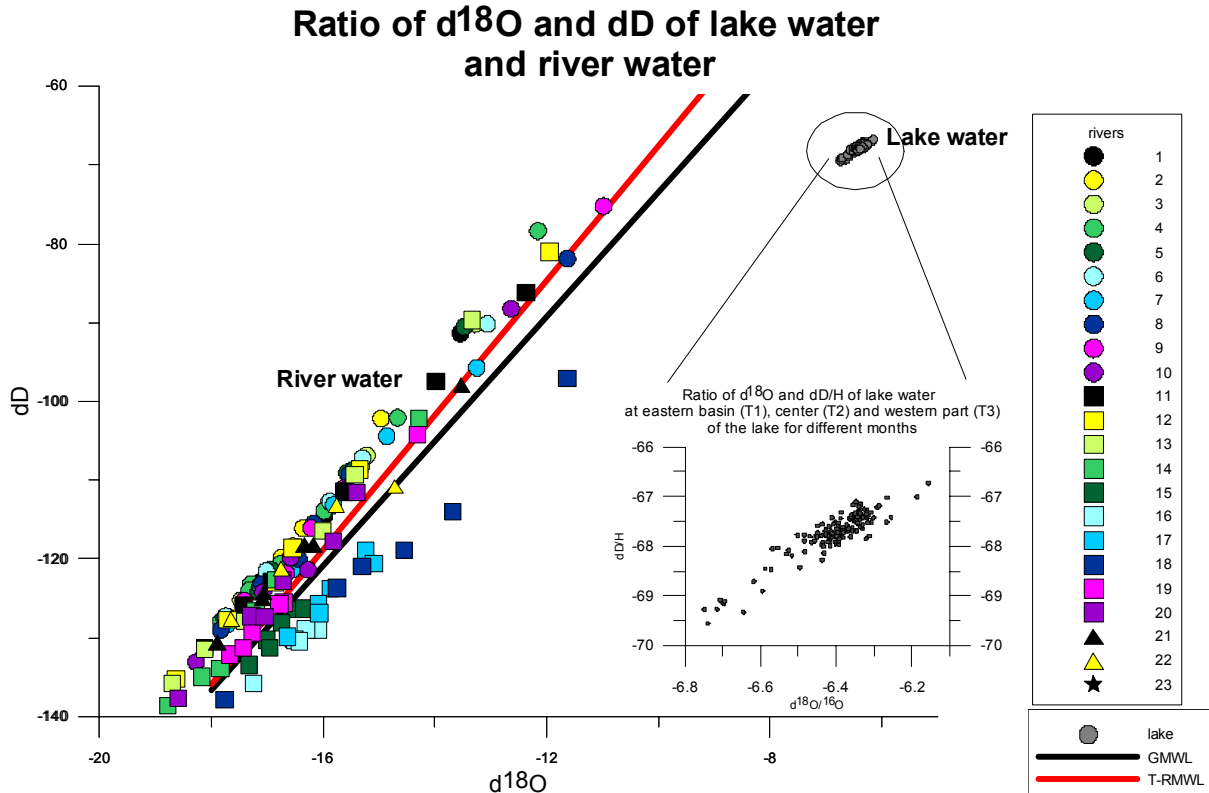


Abb. 2.9: $\delta^{18}\text{O}$ - und δD -Werte der Wasserproben der Zuflüsse des Nam Co sowie des Sees (Mittelwerte aus Tiefenprofilen) in Bezug zur Global Meteoric Water Line (GMWL, schwarze Linie) und zur Himalayan and Tibetan Plateau River Meteoric Water Line (T-RMWL, rote Linie, Hren et al., 2009).

Im Vergleich zum Seewasser sind die an Ostrakodenschalen gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nochmals deutlich schwerer, was sehr wahrscheinlich auf Fraktionierung bei der Schalenbildung zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu besteht ein klarerer Zusammenhang zwischen dem Isotopensignal des Seewassers und den Karbonaten in den Oberflächensedimenten. Die gemessenen Karbonate in den Sedimentfallen zeigen ca. 1 ‰ schwerere Werte als die Karbonate im Sediment. Damit kann nun das Isotopensignal vom Niederschlag bis ins Sediment verfolgt werden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Schalen adulter Individuen der Ostrakodenart *Leucocytherella sinensis* weisen keinen signifikanten Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Individuen auf (Abb. 2.10); die einzige Ausnahme stellt die Probe vom 3. Juni dar, in der die weiblichen Individuen deutlich höhere Werte zeigen. Es lässt sich jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen Ostrakoden aus dem Epi- und Hypolimnion beobachten, wobei die Werte im Hypolimnion weitestgehend zwischen -4 und -3 ‰ liegen und Mitte Juli mit -3 ‰ ihr Maximum erreichen. Im Epilimnion zeigt sich ein Kurvenverlauf, der mit einem Absinken der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ab Mitte Juni bis auf -5 ‰ beginnt und ab Anfang Juli einen stetigen Anstieg bis auf -3,5 ‰ aufweist.

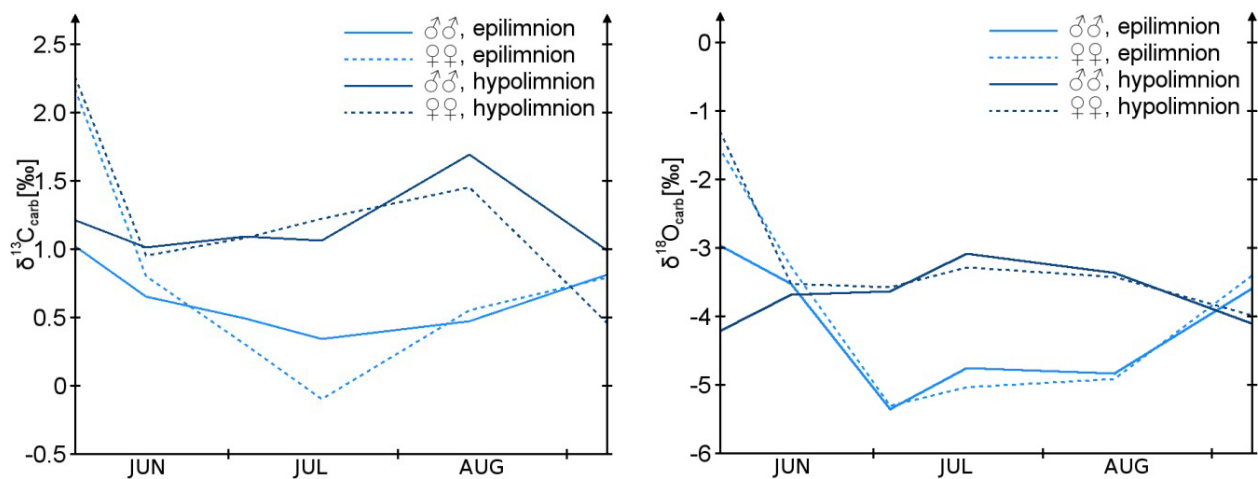


Abb. 2.10: $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Schalen adulter männlicher und weiblicher Individuen von *Leucocytherella sinensis* über den gesamten Zeitraum des Monitorings. Die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen wurde am GFZ Potsdam mit einem MAT 253 IRMS durchgeführt, das mit einer Carbonate Kiel IV-Anlage gekoppelt war. Dabei wurde der NBS19-Standard genutzt (Friedman et al., 1982). Die analytische Genauigkeit ist $< 0,04$ ‰ für $\delta^{13}\text{C}$ und $< 0,06$ ‰ für $\delta^{18}\text{O}$.

Bei den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten ist ein größerer Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Individuen von *Leucocytherella sinensis* erkennbar. Auch hier weisen die weiblichen Individuen in der Probe vom 3. Juni mit mehr als 2,0 ‰ einen deutlich höheren Wert auf als die männlichen Exemplare. Ursache hierfür – ebenso wie für die erhöhten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte – kann sein, dass die weiblichen Individuen früher kalzifizieren und somit die isotopische Signatur aus der Zeit vor Juni speichern. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Individuen im Hypolimnion liegen zwischen 0,5 und 2,0 ‰, wobei die höchsten Werte Mitte August zu verzeichnen sind und die niedrigsten Anfang September. Bei den Individuen im Epilimnion zeigt sich ein deutlicher Kurvenverlauf, der Mitte Juli seinen Tiefpunkt mit 0-0,5 ‰ erreicht, um anschließend stetig auf 0,8 ‰ anzusteigen.

Der Gehalt an biogenem Silizium in den Sedimentfallenproben verläuft über den Untersuchungszeitraum parallel zur Anzahl der Diatomeen (Abb. 2.11). Daraus lässt sich schließen, dass die an den Sedimentkernen gemessenen Werte für biogenes Silizium als Proxy für die Produktivität im See verwendet werden können. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Gehalte an Ca und anorganischem Kohlenstoff (TIC) während der Monsunzeit abnehmen, was auf eine Verschiebung des $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ -Gleichgewichtes (Verdünnung) bei höherem Frischwassereintrag durch Niederschlag hindeutet. Damit wird die Interpretation der Ca- und TIC-Werte aus verschiedenen Sedimentkernen validiert, die hohe Ca- und TIC-Werte mit einer positiven und niedrige Werte mit einer negativen Wasserbilanz verknüpft. In die gleiche Richtung weisen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der abgelagerten Karbonate (u.a. Monohydrocalcit). Die Messungen zeigen eine $\delta^{18}\text{O}$ -Abreicherung in den Monsunmonaten August und September, was zumindest zum Teil auf den Eintrag isotopisch leichteren Niederschlagwassers zurückgeführt werden kann. Allerdings könnte auch die Fraktionierung durch Temperaturzunahme im Wasser eine Rolle spielen (vgl. Abb. 2.3).

Betrachtet man die in den sequentiellen Sedimentfallen abgelagerten Materialmengen, so ergeben sich drei Phasen (jeweils 14 Tage) mit erhöhtem Eintrag (Abb. 2.11): nach dem Auftauen des Sees im Juni, in der ersten Septemberhälfte sowie in der ersten Novemberhälfte. Die frühe und die späte Phase zeigen jeweils hohe Gehalte an Ca bzw. TIC sowie geringe Gehalte an biogenem SiO_2 , während die Phase im September durch hohe Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC) und biogenem SiO_2 geprägt ist. Vergleichbares zeigen die $\delta^{18}\text{O}$ -Daten mit schwereren Werten im Juni und November (-5,0 ‰) und dem leichtesten Wert im September (-5,8 ‰). Die Proben mit schwereren $\delta^{18}\text{O}$ -Werten enthalten gleichzeitig viel TIC während die Probe aus dem September den niedrigsten TIC-Gehalt besitzt. Die am Seeboden abgelagerten Karbonate weisen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von -5,0 bis -5,2 ‰ auf, woraus sich ergibt, dass es sich bei den sedimentierten Karbonaten weitgehend um autochthon gefällte Karbonate handelt, die die Prozesse im See widerspiegeln. Dies wird durch die in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen abgebildeten ideal idiomorphen Monohydrocalcit-Kristalle bestätigt (Abb. 2.6).

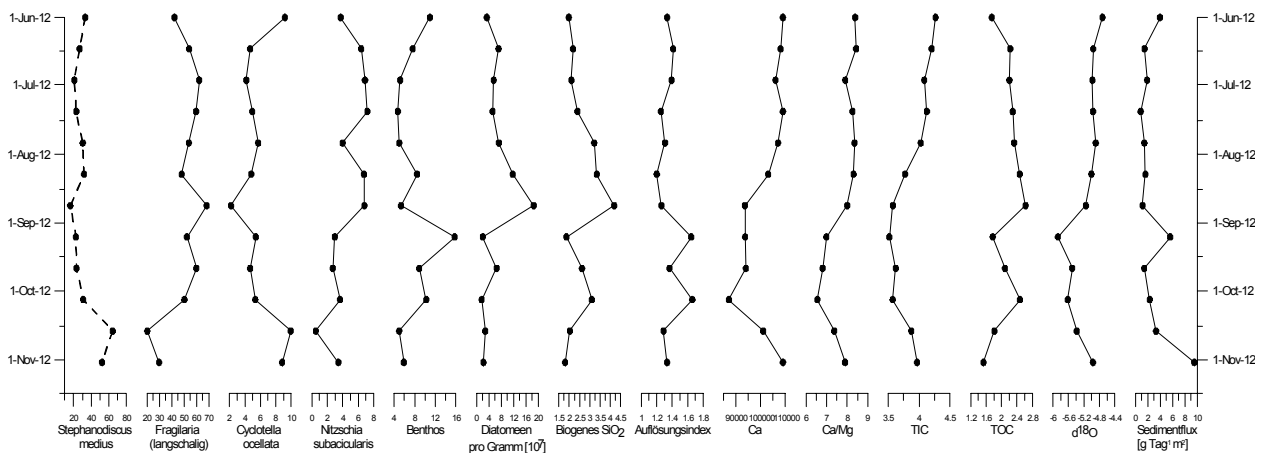


Abb. 2.11: Ausgewählte biogene, geochemische sowie isotopenchemische Parameter am Material aus den Sedimentfallen für den Expositionszeitraum 1. Juni bis 16. November 2012.

Die Ergebnisse des Monitorings am Nam Co zeigen, dass der Projektansatz neue Erkenntnisse über den Einfluss klimatischer Steuergrößen auf seeintern ablaufende Prozesse liefert und die seeinternen Prozesse in diesem Hochgebirgssee nachverfolgt werden können. Dies bietet die Möglichkeit, Proxydaten aus den vorhandenen Sedimentkernen vom Nam Co und auch anderen Seen besser zu interpretieren. Von den Erkenntnissen dieser Prozessstudien können auch andere seebezogene Projekte innerhalb von CAME profitieren. Die ursprünglichen Ziele des Projektantrags wurden somit weitestgehend erreicht.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligte Summe für das Projekt betrug insgesamt 348.856 €. Davon wurden rund 140.045 € für Investitionen in das Messnetz am Nam Co (Sedimentfallen, Multiparameter-Sonden, Funktionselektronik) aufgewendet. In Absprache mit der FSU Jena und dem BMBF wurde das aufgebaute Messnetz dem ITP übergeben. Für das Personal (den im Projekt angestellten Post-Doc sowie lokale Hilfskräfte) wurden 92.824 € ausgegeben. Für Reisen in das Untersuchungsgebiet und den Aufenthalt an der Forschungsstation Nam Co sowie für die Teilnahme an Tagungen und Projektbesprechungen ergaben sich insgesamt Reisekosten in Höhe von 37.924 €. Dazu kommt ein Betrag von 22.500 € für Laboranalysen, die im Wesentlichen am ITP in Lhasa und Beijing durchgeführt wurden.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Tatsache, dass aktuelle Untersuchungen zu rezenten Sedimentationsprozessen bislang weder von Seen des Tibetischen Hochlandes noch aus einem monsunbeeinflussten See und dessen Einzugsgebiet vorliegen, erschwert nicht nur die Kalibration von aus Seesedimenten gewonnenen Proxydaten und damit die Abschätzungen über die längerfristige Entwicklung von Ökosystemen in Hochgebirgen, sondern auch die Abschätzung der Veränderung der Prozessraten. Dies ist von besonderer Bedeutung, da mit der prognostizierten Erwärmung in allen Hochgebirgsregionen der Erde eine Veränderung der Prozessraten erwartet wird, so z.B. die erhöhte Bereitstellung von Lockermaterial für Murgänge und größere Abflussereignisse in Gerinnen. Mit dem Aufbau eines zeitlich hoch auflösenden Messnetzes im Nam Co, den oben ausführlich dargestellten Dauermessungen und unterstützenden Untersuchungen im Einzugsgebiet des Sees, wurde diese Lücke erstmals geschlossen. Vor diesem Hintergrund sind die geleisteten Arbeiten als absolut notwendig zu bewerten.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Verbundvorhaben diente der Aufklärung der Klimadynamik in Zentralasien und zielte somit während seiner Laufzeit weder als Gesamtprojekt noch in den einzelnen Teilprojekten auf eine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung ab. Jedoch bedeutet die Verknüpfung dendro- und se-

dimentklimatologischer Forschungen (TP1, TP2, TP3) mit Klimamodellierung (TP4) einen neuen wissenschaftlichen Ansatz, der zu einem erheblichen Fortschritt für die Klimarekonstruktion in Zentralasien führen wird.

Die mit den Monitoring-Systemen am Nam Co gewonnenen sedimentologischen und limnologischen Daten, die auch in Kooperation mit dem TP1 ausgewertet wurden, haben Vorbildfunktion für ein systematisches Monitoring an anderen Seen des Tibet-Plateaus und dienen in Kombination mit den dendroklimatologischen Multiparameter-Studien (TP3) und den Multiproxy-Analysen an Seesedimentkernen aus Kirgistan (TP1) zur Entwicklung von Transferfunktionen zur Saisonalität von physischen und biologischen Prozessen, die auch für die Ableitung entsprechender Informationen aus Paläodaten geeignet sind. Mit den durchgeführten Messungen wurden zum ersten Mal die Stoffumsätze und Transportprozesse in einem monsunbeeinflussten Hochgebirgssee zeitlich hoch aufgelöst erfasst und über einen Zeitraum von mehreren Jahren analysiert. Dies ist auch für die Interpretation der paläogeographischen Befunde aus den verschiedenen Geoarchiven, die im Rahmen des von der DFG und der CAS geförderten Schwerpunktprogramms 1372 "Tibetan Plateau: Formation – Climate – Ecosystems" (TiP) sowie anderer internationaler Forschungsk Kooperationen untersucht werden, von zentraler Bedeutung. Deshalb kann erwartet werden, dass die Ergebnisse eine große Verbreitung in den internationalen wissenschaftlichen Fachkreisen erreichen werden. Wissenschaftliche Veröffentlichungen in internationalen begutachteten Zeitschriften stellen ein wesentliches Ergebnis des beantragten Vorhabens dar.

Das wirtschaftliche Potential der durchgeführten Untersuchungen liegt darin, dass die Ergebnisse dazu beitragen, die Klimavariabilität in der Untersuchungsregion in der Vergangenheit besser zu verstehen und die zukünftige Klimaentwicklung besser beurteilen zu können, wodurch Klima- und Umweltgefahren bei volkswirtschaftlichen Risikoanalysen besser abgeschätzt und in verschiedene Szenarien integriert werden können. Weiterhin können die gewonnenen Daten dazu beitragen, die Klimasensitivität verschiedener alpiner Ökosysteme besser bewerten zu können, was für die Entwicklung und Ausführung von Klimaanpassungsstrategien von großer Bedeutung ist.

Die Erfahrungen aus den durchgeführten Messungen und Probennahmen geben wichtige Anhaltspunkte für die Einrichtung und den Betrieb von länger laufenden Monitoring-Stationen unter entsprechend extremen Umweltbedingungen. Obwohl die Mehrzahl der eingesetzten Geräte zuverlässig funktioniert hat, waren bei einzelnen Sonden bei Vergleichsmessungen mit Sonden anderer Hersteller große Unterschiede bei den aufgezeichneten Werten zu beobachten, was entweder auf die geringen Druckverhältnisse (z.B. bei der Kalibrierung der Sauerstoffsonden) in großer Höhe (>4700 m) zurückgeführt werden kann oder aber nicht erklärt werden konnte. Weiterhin gab es Probleme mit den Verankerungen / Halterungen der Moorings. Obwohl die Messgeräte für die Oberflächenmessungen 3 m unter dem niedrigsten Seespiegelstand angebracht wurden (Erfahrungswert aus früheren Untersuchungen), kam es zum Abscheren der Halterungen. Ob die im Herbst detektierten sehr hohen Wellen oder aber winterlicher Eisgang dafür verantwortlich war, ist noch nicht geklärt.

Obwohl in dem Vorhaben keine Erfindungen bzw. Schutzrechtsanmeldungen im eigentliche Sinne geplant waren, bietet die Weitergabe der gewonnenen Erfahrungen (zahlreiche Messgeräte, vorwiegend Produkte aus deutscher Produktion, wurden erstmals in Höhen über 4.700 m eingesetzt) an die Hersteller die Möglichkeit, diese Erfahrungen in die Produktweiterentwicklung einfließen zu lassen, was sich ggf. auch wirtschaftlich auswirken könnte. Es ist absehbar, dass damit die Position der Hersteller sowohl auf dem expandierenden chinesischen als auch auf dem Weltmarkt gegenüber internationalen Konkurrenten gestärkt wird.

Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Arbeitsgruppen

Während der Laufzeit sind keine Untersuchungen mit übertragbaren Ergebnissen von dritter Seite publiziert worden.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Derzeit sind zwei Publikationen in Vorbereitung, in denen die zum AGU Fall Meeting im Dezember 2014 eingereichten Beiträge (siehe unten) ausführlich dokumentiert und diskutiert werden. Zudem haben sich mehrere Publikationen zur Sedimentdynamik im Nam Co, die in ihrer Interpretation auf dem durch die Arbeiten in TP2 verbesserten Verständnis der seeintern ablaufenden Prozesse und dem damit in Verbindung stehenden Signaltransfer beruhen, aus der Zusammenarbeit im Verbundvorhaben CAME, in das auch das DFG Schwerpunktprogramm 1372 “Tibetan Plateau: Formation – Climate – Ecosystems” (TiP) integriert ist, ergeben (siehe Publikationsliste). Darüber hinaus werden die Ergebnisse nach Prüfung und parallel zu den Veröffentlichungen in die Geodatenbank PANGAEA eingepflegt, die vom World Data Center MARE am Alfred-Wegener-Institut (AWI) und der Universität Bremen (MARUM) unterhalten wird. Im Rahmen des gesamten Verbundvorhabens CAME wurde eine internetbasierte Informationsplattform für die Öffentlichkeit und Entscheidungsträger eingerichtet (CADY: www.cady-climate.org, CAME: www.zentralasien.senckenberg.de). Zudem hat sich das Teilprojekt mit seinen Erfahrungen und Ergebnissen am Capacity Building Programm (Summer School on Asian Climate Dynamics) umfassend beteiligt.

Präsentationen bei internationalen Konferenzen (in chronologischer Reihenfolge)

- Daut, G., Baade, J., Haberzettl, T., Wang, J. & Mäusbacher, R. (2012): **Modern sedimentation processes on lake Nam Co, Tibetan Plateau, China – Project presentation and first results.** *12th International Paleolimnology Symposium*, 21.–24. August 2012, Glasgow, Großbritannien.

- Wang, J., Ju, J., Daut, G., Wang, Y. & Zhu, L. (2013): **Seasonal variations of oxygen and hydrogen isotopes from water samples of Nam Co lake and inflowing river water.** *28th Himalayan-Karakorum-Tibet Workshop / 6th International Symposium on Tibetan Plateau*, 20.–24. August 2013, Tübingen, Deutschland.
- Wang, J., Ju, J., Daut, G., Wang, Y. & Zhu, L. (2013): **Spatio-temporal variability of modern sedimentation rates in Lake Nam Co, central Tibetan Plateau, China – the first results from sediment traps.** *AGU Fall Meeting*, 9.–13. Dezember 2013, San Francisco, USA.
- Wang, J., Ju, J., Daut, G., Huang, L., Ma, Q., Haberzettl, T., Baade, J., Mäusbacher, R. & Zhu, L. (2014): **Spatial and seasonal variability of thermal stratification in Lake Nam Co, Central Tibetan Plateau.** *EGU General Assembly*, 27. April – 2. Mai 2014, Wien, Österreich.
- Daut, G., Wang, J., Ju, J., Plessen, B., Fürstenberg, S., Baade, J., Frenzel, B., Haberzettl, T., Mäusbacher, R. & Zhu, L. (2014): **Seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ of inflowing river water, lake water, sediment trap material and ostracod shells of Lake Nam Co and its catchment (Tibet, China) – a proxy calibration study.** *AGU Fall Meeting*, 15.–19. Dezember 2014, San Francisco, USA.
- Wang, J., Ju, J., Daut, G., Wang, Y., Ma, Q., Huang, L., Mäusbacher, R. & Zhu, L. (2014): **Seasonal variations of chemical compositions of lake and inflowing river water from Nam Co catchment – a three-year monitoring study.** *AGU Fall Meeting*, 15.–19. Dezember 2014, San Francisco, USA.

Publikationen

- Wang, J., Zhu, L., Wang, Y., Ju, J. & Daut, G.: **Spatial variability of surface sediments from Lake Nam Co, central Tibetan Plateau, China, and their implications to environmental change studies.** *Journal of Great Lakes Research* (in Begutachtung).
- Witt, R., Günther, F., Doberschütz, S., Lauterbach, S., Mäusbacher, R., Yao, T. & Gleixner, G.: **Biogeochemical evidence for a freshwater period during the Last Glacial Maximum recorded in lake sediments from Nam Co, southern-central Tibetan Plateau.** *Journal of Paleolimnology* (in Begutachtung).
- Doberschütz, S., Frenzel, P., Haberzettl, T., Kasper, T., Wang, J., Zhu, L., Daut, G., Schwalb, A. & Mäusbacher, R. (2014): **Monsoonal forcing of Holocene paleoenvironmental change on the central Tibetan Plateau inferred using a sediment record from Lake Nam Co (Xizang, China).** *Journal of Paleolimnology* 51, 253–266.

- Kasper, T., Haberzettl, T., Doberschütz, S., Daut, G., Wang, J., Zhu, L., Nowaczyk, N. & Mäusbacher, R. (2012): **Indian Ocean Summer Monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of Lake Nam Co, central Tibetan Plateau (China).** *Quaternary Science Reviews* 39, 73–85.
- Li, M., Wang, J. Zhu, L., Wang, L. & Yi, C. (2012): **Distribution and formation of monohydrocalcite from surface sediments in Nam Co Lake, Tibet.** *Quaternary International* 263, 85–92.

Teilprojekt 3: Hochaufgelöste dendroklimatische Multi-Parameter Studien – Monsundynamik des 20. Jahrhunderts vor dem Hintergrund der letzten 1500 Jahre

Zuwendungsempfänger / Förderkennzeichen

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

03G0813A

Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse in Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen

Teilprojekt 3 (TP3) hatte zur Aufgabe, ein Standortnetzwerk von Jahrringparameterchronologien (Jahrringbreite, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) zu erstellen und saisonale Klimasignale durch dendroökologisches Monitoring an einem geeigneten zentralasiatischen Standort zu erfassen. Dabei wurde für die Suche, Beprobung und Erarbeitung neuer 1000-jähriger Jahrringbreitenchronologien auf Standorte in Kirgistan (Abb. 3.1) fokussiert. Gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern (siehe oben) wurden außerdem Jahrringisotopenzeitreihen von existierenden Jahrringbreitenchronologien für Klimarekonstruktionen erstellt. Dieses Netzwerk von Standorten ermöglicht die Erstellung räumlicher Rekonstruktionen und erleichtert den Vergleich mit anderen Klimaarchiven.



Abb. 3.1: Karte mit den Untersuchungs-Standorten des Teilprojekts 3 in Kirgistan.

In Kirgistan wurde ein Standortnetzwerk von insgesamt neun Wacholder- und Fichtenstandorten etabliert (Abb. 3.1). Darüber hinaus wurden zum Vergleich Jahrringisotopenchronologien von

Randbereichen der CADY-Region erstellt (Altai-Gebirge, Baikal-Region, Tibet). Des Weiteren wurde 2012 ein Monitoring-Standort im UNESCO Biosphären-Reservat Sary Chelek im Westteil des Tien Shan eingerichtet. Seit 2013 ist an diesem Standort auch ein See-Monitoring etabliert. Die dendroökologischen Untersuchungsmethoden sind ferner mit dem CAME-Verbundprojekt CLASH (Koordinator A. Bräuning) abgestimmt, in dessen Rahmen Dendro-Monitoring auf dem Tibet-Plateau durchgeführt wird.

Dendroökologisches Monitoring

Neben der Installation einer Klimastation wurde im Rahmen des dendroökologischen Monitorings im Juni 2012 in der Nähe des Sees Sary Chelek ($41^{\circ} 52' N / 71^{\circ} 58' E$) in Kirgistan auf ca. 1920 m NN eine dendroökologische Messstation zur Untersuchung der für Zentralasien dendroklimatisch wichtigen Baumarten Fichte und Wacholder eingerichtet. Die Untersuchungen wurden mit dem Wachstums-Monitoring an Wachholdern begonnen und im Frühjahr 2013 auf Fichten ausgeweitet. Jeweils fünf Individuen der beiden Baumarten wurden ausgewählt und mit Xylemsaftfluss-Sensoren (halbstündliche Erfassung der Transpirationsraten) und Dendrometern (halbstündliche Holzzuwachsmessungen zur Bestimmung der intra-annuellen Wachstumsdynamik) ausgestattet. Darüber hinaus wurden Temperatur- und Feuchtesensoren (Boden, Luft) installiert. Sowohl die Energieversorgung der Monitoringstation (Solarpaneele) als auch der Datenlogger wurden durch eine Umzäunung vor Viehverbiss geschützt. Da die Sensoren an den Bäumen selbst nicht geschützt werden konnten, kam es durch Viehverbiss zum Verlust der Saftflussensoren (Abb. 3.2).



Abb. 3.2: Zerstörte Xylemsaftfluss-Sensoren am Monitoring-Standort SaryChelek.

Da eine Ersatzbeschaffung nicht möglich war, konnten die initiierten Untersuchungen zur Bestimmung der Transpiration einzelner Bäume nicht erfolgreich durchgeführt werden und wurden eingestellt. Es liegen deshalb keine auswertbaren Daten zum Xylemsaftfluss und daraus abgeleiteten Transpirationsraten vor.

Dagegen lieferten die Dendrometer in den Jahren 2012 und 2013 nahezu lückenlose Ergebnisse. Es zeigte sich dabei, dass das Wachstumsniveau einzelner Individuen sehr unterschiedlich ist (Abb. 3.3). Generell folgt der intra-annuelle Holzzuwachs der Wacholder im Tien Shan dem bekannten allgemeinen Jahrestrend mit raschem Zuwachs während des Frühjahrs und Frühsommers. Im Verlauf des Sommers nimmt der Zuwachs deutlich ab und ist scheinbar rückläufig, da der Wassergehalt der Baumstämme mit zunehmender Sommertrockenheit abnimmt, was zu Abnahme des Stammumfangs führt. Darüber hinaus lassen sich die bekannten Tagesgänge von Schrumpfen und Schwellen der Baumstämme erkennen. Auffällig sind kurzzeitige größere Zuwächse im Zeitraum von Ende September bis Dezember 2012 (Abb. 3.3). Diese gehen wahrscheinlich auf einzelne Niederschlagsereignisse zurück, die bei entsprechend geeigneten Temperaturen zu einer kurzzeitigen Wachstumsverstärkung führen.

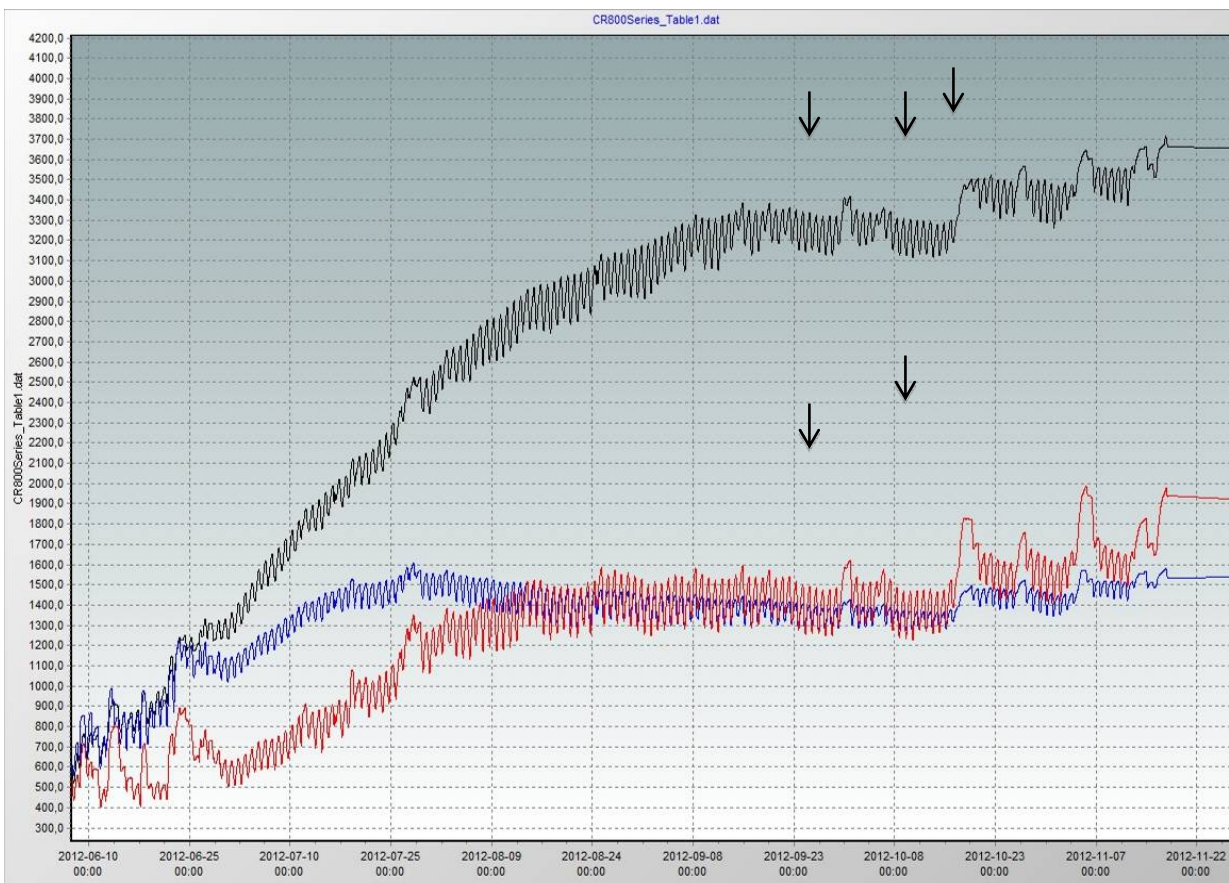


Abb. 3.3: Zuwachsverlauf der Vegetationsperiode 2012 von drei Wacholderbäumen am Monitoring-Standort Sary Chelek. Dem raschen intra-annuellen Holzzuwachs während des Frühjahrs und Frühsommers, folgt ein scheinbar negatives Wachstum infolge zunehmender Sommertrockenheit und Abnahme des Wassergehalts im Baumstamm. Weiterhin ist der Tagesgang von Schrumpfen und Schwellen der Baumstämme erkennbar. Auffällig sind kurzzeitige größere Zuwächse im Zeitraum von Ende September bis Dezember (Pfeile) die zeitlich mit einzelnen Niederschlagsereignissen einhergehen.

Etablierung eines dendrochronologischen Netzwerks

Des Weiteren konnte im Rahmen des TP3 erfolgreich ein Jahrringbreitennetzwerk von neun Hochlagen-Standorten im Tien Shan Kirgistans erstellt werden (Abb. 3.1). An jedem Standort wurden 2–3 Bohrkerne von mindestens 15 Individuen pro Baumart (Wacholder und Fichte) entnommen. Die einzelnen Bohrkerne wurden präpariert und die Jahrringe vermessen, gezählt und mit Hilfe dendrochronologischer Standardverfahren (ARSTAN, Cofecha) datiert sowie abschließend einzelne Standortchronologien erstellt (Abb. 3.4).

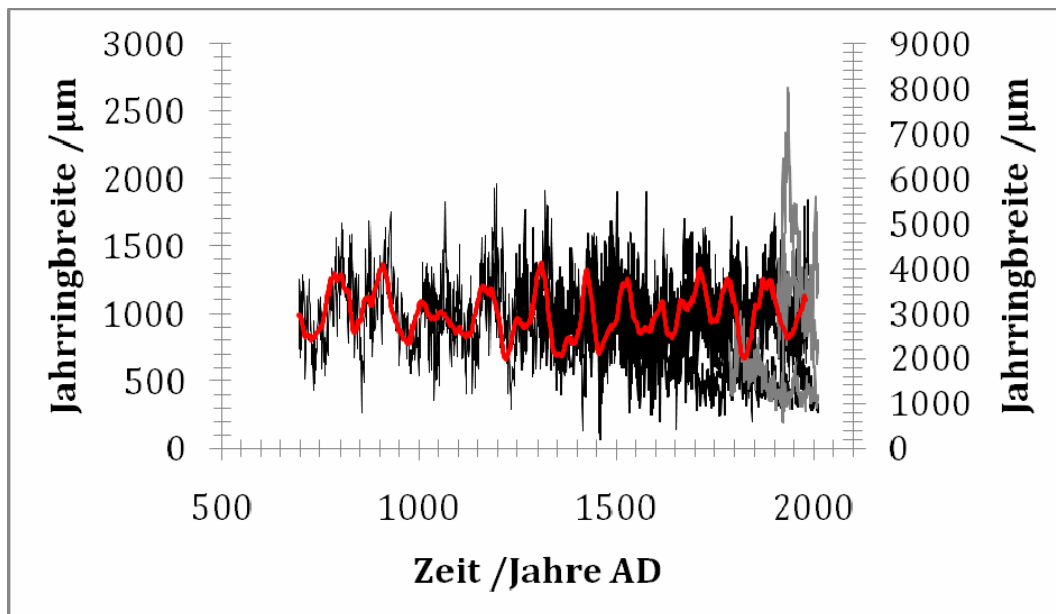


Abb. 3.4: Standortchronologien des kirgisischen Jahrringbreiten-Netzwerks: 6 Wacholderchronologien (linke Ordinate, schwarz – Standortchronologien, rot – 30-jähriges Mittel über alle Chronologien) und 3 Fichtenchronologien (rechte Ordinate, grau – Standortchronologien). Deutlich erkennbar ist das allgemein höhere Wachstumsniveau der Fichten.

Nachdem die gewonnen Holzproben datiert waren, wurde die Analyse weiterer Jahrringparameter wie z.B. stabiler Isotope ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) durchgeführt. Bei der Analyse der Jahrringbreiten der Wacholder zeigte sich, dass die standardmäßige Beprobung des Materials zur Analyse stabiler Isotope aufgrund der für Wacholder typischen holzanatomischen Besonderheiten wie z.B. Haselwüchsigkeit mit extrem geringen jährlichen Zuwachsraten von z.T. nur wenigen μm (Ausbildung von Mikro-Ringen), intra-annualen Dichteschwankungen und auskeilenden Jahrringen (Abb. 3.5) extrem schwierig ist und mit klassischen Verfahren (Abtrennen von Jahrringen mittels Skalpell) nicht zu leisten ist. Es war deshalb notwendig, die klassischen Aufbereitungs- und Analyseverfahren zu verbessern und abzuändern (Schollän *et al.*, 2014). Die so erstellte längste Wacholder-Jahrringchronologie reicht von AD 2012 bis AD 694 zurück, wohingegen die analysierten Fichten nicht älter als 300 Jahre sind. Somit konnten Hilfe der neuen Methodiken 50-jährige Chronologien zur Kalibration der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Messungen erstellt werden.

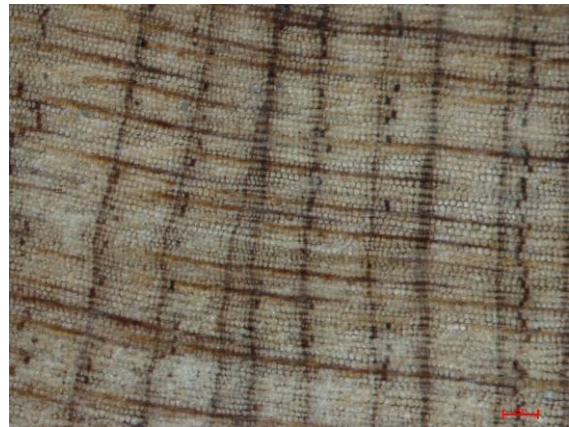


Abb. 3.5: Mikroskopaufnahmen von holzanatomischen Besonderheiten der Wacholderproben aus dem Tien Shan: „Haselwüchsigkeit“ (oben), intra-annuelle Dichteschwankung (unten links), „auskeilender“ Jahrring (unten rechts).

Kalibrierung / Vergleich von Jahrringisotopenzeitreihen mit instrumentellen Klimadaten und atmosphärischer CO₂-Konzentration

Die durchgeführten Kalibrierungsstudien haben gezeigt, dass $\delta^{13}\text{C}$ signifikant mit dem Sommer-niederschlag (JJA) korreliert und $\delta^{18}\text{O}$ sowohl mit der Sommertemperatur als auch mit der sommerlichen Niederschlagsmenge korreliert. Die weitergehende Auswertung der vorliegenden $\delta^{13}\text{C}$ -Zeitreihen befasste sich mit der Untersuchung des Einflusses der steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentration und der zunehmenden Erwärmung bzw. Trockenheit auf das Baumwachstum. 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. Freiland- und Laborexperimente haben gezeigt, dass Pflanzen auf erhöhte CO₂-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. Dabei gilt, dass je höher die WUE ist, desto eher ist ein Baum in der Lage, trockene Perioden ohne Einschränkung der Assimilation, d.h. ohne größere Wachstumseinbrüche zu überstehen.

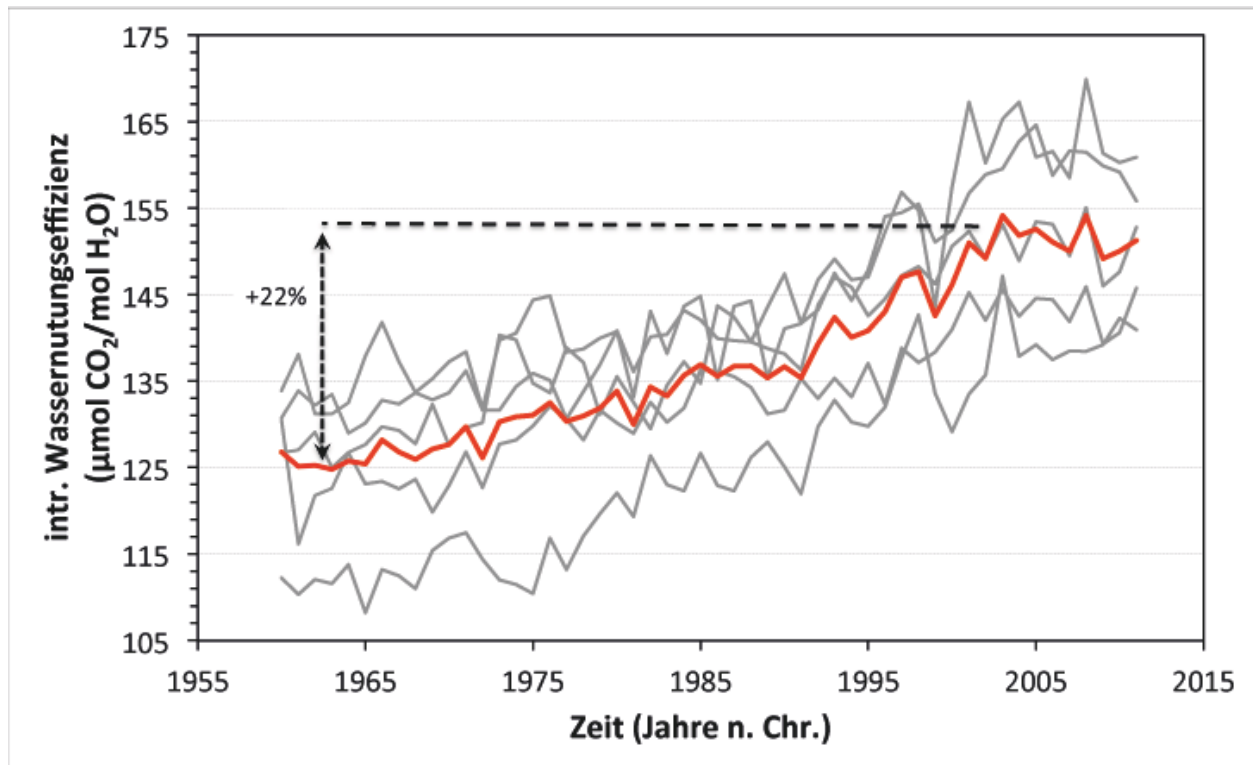


Abb. 3.6: Trendverlauf der intrinsischen Wassernutzungseffizienz von Wachholdern des Tien Shan zwischen 1962 und 2011. Es ist eine deutliche Zunahme von ca. 22 % zu beobachten, die allerdings seit den 1990er Jahren asymptotisch abflacht (Jivcov, 2013).

Leider ist im Detail nur wenig bekannt darüber wie sich bestimmte Baumarten langfristig an den Klimawandel und die etwa 35%ige Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration seit ca. AD 1850 angepasst haben. Langzeituntersuchungen 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 zum Einflusse der Wasserdampftranspiration auf das Klima ziehen. Eine Erhöhung der WUE infolge der gestiegenen CO_2 -Konzentration der Atmosphäre kann mit einer reduzierten Wasserdampfabgabe durch die Transpiration einhergehen, da die Bäume aufgrund des verbesserten CO_2 -Angebots die Spaltöffnungen ihrer Blätter / Nadeln vermehrt schließen und ihre Transpiration einschränken können. Mit Hilfe eines neuartigen physikalischen Verfahrens, der so genannten Jahrringisotopenanalyse, ist es möglich die langfristigen Veränderungen in der Wassernutzungseffizienz wichtiger Baumarten der Region zu bestimmen und mit ihren Wachstumstrends zu vergleichen. Die mit Hilfe der $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse in Jahrringen berechnete Wassernutzungseffizienz wird als intrinsische Wassernutzungseffizienz (WUE_i) bezeichnet und kann unmittelbar zu den Jahrringbreiten der untersuchten Bäume in Beziehung gesetzt werden. Bei unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die WUE_i während der betrachteten Jahre 1960–2011 um ca. 22 % angestiegen ist (Abb. 3.6), aber seit Beginn der 1990er Jahre asymptotisch in eine Sättigung übergeht. 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 CO₂-Konzentration zu einer Verbesserung der Kohlenstoffassimilation, d.h. Photosynthese geführt, welche allerdings nicht in einer Zunahme der Holzbiomasseakkumulation zum Ausdruck kommt. Weitergehende Analysen zur Klärung dieser Diskrepanz, insbesondere im Vergleich zu Daten europäischer Studien, stellen Herausforderungen für Nachfolgeprojekte dar.

Multi-Parameter Rekonstruktionen

Aufgrund der dargelegten technischen Herausforderungen zu Beginn des Projekts konnte die Erstellung langer Isotopenzeitreihen bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden. Dennoch werden die Analysen im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten fortgeführt und bis Ende 2015 erfolgreich beendet werden können. Einzelne Isotopenchronologien der CADY-Region konnten bereits abschlossen werden und die daraus hervorgegangenen Temperatur- und Niederschlagsrekonstruktionen sind bereits in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht (Siderova *et al.*, 2013).

Darüber hinaus wurden erste Vergleiche von $\delta^{18}\text{O}$ -Daten eines Speleothems aus der Region Osh in Kirgisistan mit einer jährlich aufgelösten, kontinuierlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe aus Jahrringen von Wachholdern aus dem Karakorum in Pakistan durchgeführt (Abb. 3.7).

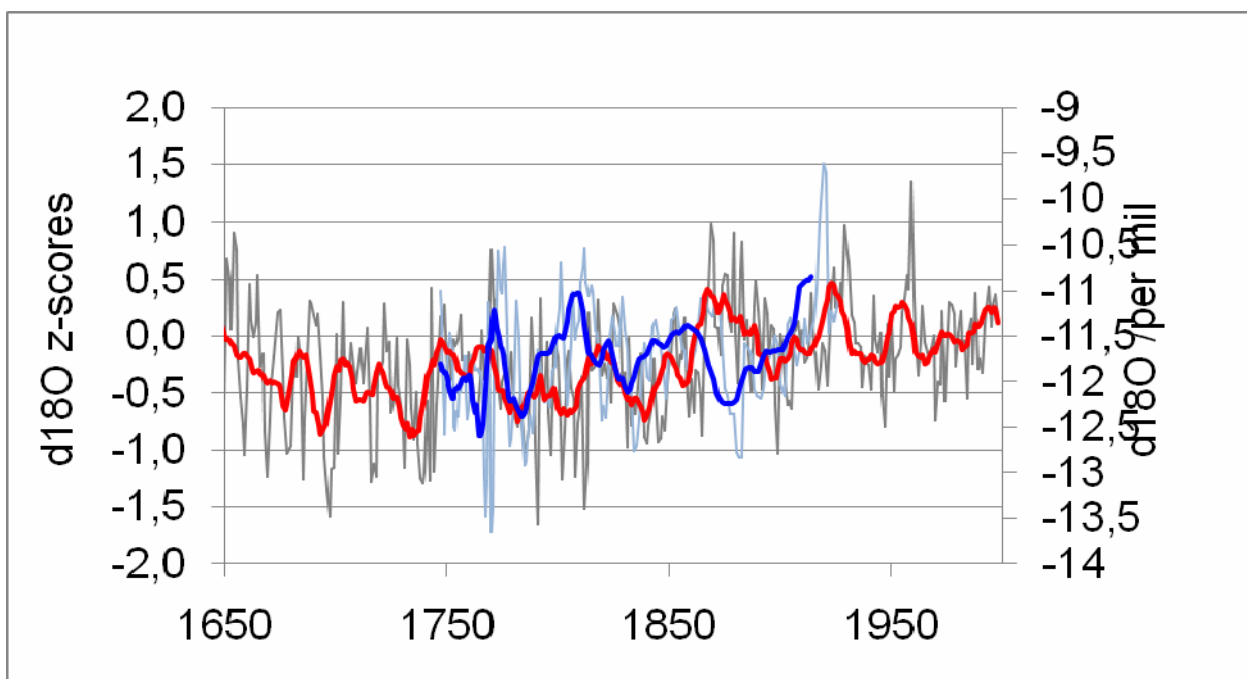


Abb. 3.7: $\delta^{18}\text{O}$ -Daten eines Stalagmiten aus der Region Osh in Kirgisistan (blau, fett = Mittel über 10 Datenpunkte), sowie einer Jahrringchronologie aus dem Karakorumgebirge Pakistans (grau = Jahreswerte, rot = 10jähriges gleitendes Mittel). Wenn man die Stalagmitendaten ab ca. 1790 um 25 Jahre verschiebt sind die dekadischen Schwankungen nahezu deckungsgleich.

$\delta^{18}\text{O}$ spiegelt in beiden Archiven die Niederschlagsdynamik in der jeweiligen Region wider. Beide Standorte liegen etwa auf dem gleichen Längengrad, sind aber bezüglich ihrer geographischen Breite ca. 600 km voneinander entfernt. Es scheint, als würden die Niederschlagsverhältnisse in der westwindgeprägten Region des Tien Shan im pentadischen bis dekadischen Frequenzbereich etwa 25 Jahre früher umschlagen als im teilweise monsungeprägten Karakorum. Andererseits sind Ungenauigkeiten in der Datierung der Stalagmitendaten zu berücksichtigen. Wenn man mögliche Datierungsfehler berücksichtigt und die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve des Stalagmiten ab ca. AD 1790 um 20–30 Jahre verschiebt sind die dekadischen Schwankungen mit den Jahrringisotopenwerten nahezu deckungsgleich.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die dem Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ für das TP3 zur Verfügung gestellte Zuwendung wurde für die Finanzierung einer Doktorandenstelle (3 Jahre, TVÖD 13, 50 %) verwendet. Darüber hinaus wurden mehrere studentische Hilfskräfte (insgesamt 36 Personalmonate) finanziert. Weitere Kosten für analytische Verbrauchsmittel, Geländearbeiten in Kirgistan und am GFZ durchgeführte Analysen wurden vollständig vom GFZ getragen.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Publikationen

- Schollän, K., Heinrich, I. & Helle, G. (2014): **UV-laser-based microscopic dissection of tree rings – a novel sampling tool for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ studies.** *New Phytologist* 201, 1045–1055.
- Sidorova, O. V., Siegwolf, R. T. W., Myglan, V. S., Ovchinnikov, D. V., Shishov, V. V., Helle, G., Loader, N. J. & Saurer, M. (2013): **The application of tree-rings and stable isotopes for reconstructions of climate conditions in the Russian Altai.** *Climatic Change* 120, 153–167.

Des Weiteren wurde innerhalb des TP3 folgende akademische Abschlussarbeit angefertigt:

- Jivcov, S. (2013): **Dendroklimatische Analysen von *Juniperus seravschanica* aus Kirgistan.** Diplomarbeit, Universität Bonn.

Außerdem wurde während der Projektlaufzeit folgender Konferenzbeitrag präsentiert:

- Schollän, K. & Helle, G. (2013): **UV-laser microdissection system – A novel approach for the preparation of high-resolution stable isotope records ($\delta^{13}\text{C}$ / $\delta^{18}\text{O}$) from tree rings.** *EGU General Assembly*, 7.–12. April 2013, Wien, Österreich.

Teilprojekt 4: Klimamodellierung auf globalen und regionalen Skalen von der Vergangenheit zur Zukunft

Zuwendungsempfänger / Förderkennzeichen

Freie Universität Berlin

03G0813D

Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse in Gegenüberstellung zu den vorgegebenen Zielen

Die im Rahmen des Teilprojekts 4 (TP4) durchgeführten Arbeiten umfassten die Anpassung regionaler und globaler Klimasimulationen, die Durchführung von Kontrollsimulationen, Sensitivitätstest bezüglich des klimatischen Einflusses des Tibet-Plateaus, regionale Paläoklimasimulationen und den Vergleich mit entsprechenden proxybasierten Klimarekonstruktionen sowie die Untersuchung der Antriebsmechanismen für Klimaveränderungen und den Vergleich mit anderen Modellierungen.

Vergleich zwischen Modellierungs- und Proxydaten bezüglich extremer Dürren in Asien

Unter Annahme eines fortschreitenden Anstiegs der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen ist gemäß neuester Klimaprojektionen für den Einflussbereich des indischen Monsuns im kommenden Jahrhundert ein Anstieg in der Auftretenswahrscheinlichkeit sehr feuchter Klimabedingungen zu erwarten (Dai, 2013; Stocker *et al.*, 2013), jedoch sind die dafür verantwortlichen klimatischen Mechanismen noch nicht hinreichend verstanden. Um die Zusammenhänge zwischen globalen klimatischen Veränderungen und Feuchtigkeitsänderungen in Zentralasien besser zu verstehen, wurden eine Reihe von Klimasimulationen aus dem PMIP3/CMIP5-Programm (*Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase 3 / Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) für die letzten 1000 Jahre analysiert.

Zum Vergleich modellierter und aus Proxydaten abgeleiteter hydrologisch-klimatologischer Bedingungen wurde der *Palmer Drought Severity Index* (PDSI; Cook *et al.*, 2010) berechnet. Der Vergleich der Modellierungen mit Proxydaten des *Monsoon Asia Drought Atlas* (MADA; Cook *et al.*, 2010) weist dabei eine gute Übereinstimmung bezüglich des Zeitpunkts, der Dauer und der räumlichen Verteilung von extremen Dürreperioden in Asien in der Vergangenheit auf. Explizit wurden fünf extreme Dürreperioden in Süd- und Zentralasien während der letzten 1000 Jahre bezüglich ihres zeitlich-räumlichen Auftretensmusters und möglicher zugrunde liegender klimatischer Mechanismen analysiert. Dabei handelt es sich um (1) die Dürre zwischen AD 1351 und AD 1368, die mit dem Niedergang des Königreichs der Khmer zusammenfällt, (2) die Dürre des späten 16. Jahrhunderts (AD 1560–1587), (3) die Dürre des späten 17. Jahrhunderts (AD 1682–1699), (4) die *Strange Parallels Drought* (AD 1756–1768) und (5) die *East India Drought* (AD 1790–1796).

Die Klimasimulationen zeigen diesbezüglich, dass das Auftreten von extremen Dürreperioden in Asien in direktem Zusammenhang mit der Ausbildung von El Niño-ähnlichen Bedingungen im zentralen Teil des äquatorialen Pazifiks steht, wobei vermutet wird, dass die *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) durch solare und vulkanische Aktivität beeinflusst wird (Adams *et al.*, 2003; Mann *et al.*, 2005).

Exemplarisch lassen sich für zwei der durchgeführten PMIP3/CMIP5-Modellsimulationen während des Auftretens extremer Dürreperioden in Asien höhere Wassertemperaturen der Meeresoberfläche (SST) im zentralen Teil des tropischen Pazifiks und im Indischen Ozean, wie sie auch unter El Niño-Bedingungen zu beobachten sind, verzeichnen (Abb. 4.1 und 4.2). Die Resultate der Modellierungen, insbesondere die signifikante Korrelation zwischen dem PDSI und der Wassertemperatur der Meeresoberfläche, bestätigen die von Krishnan *et al.* (2009) formulierte Hypothese, dass eine Westwärtsverlagerung der positiven SST-Anomalie in den zentralen Teil des Pazifiks extreme Dürreperioden in Indien nach sich ziehen könnte. Darüber hinaus zeigt die zeitliche Entwicklung der SST-Anomalie in den beiden untersuchten Modellen ECHAM5/MPIOM und GISS-E2-R eine hohe Korrelation mit den simulierten SST-Anomalien in der Niño 4-Region (Abb. 4.1a und 4.2a) sowie eine gute Korrelation mit Temperaturrekonstruktionen für die Nordhemisphäre (Shi *et al.*, 2013). Des Weiteren zeigen sich während der untersuchten letzten 1000 Jahre deutliche negative Anomalien in mehreren Proxyparametern (Abb. 4.1a und 4.2a) nach explosiven vulkanischen Eruptionen in den Tropen, so z.B. in der Mitte des 15. Jahrhunderts (Ausbruch des Pinatubo) und zu Beginn des 19. Jahrhunderts (Ausbrüche des Tambora, des Galunggung, des Babuyan Claro und des Cosiguina). Das in diesem Zusammenhang beobachtete Auftreten negativer SST-Anomalien ist weitestgehend konsistent mit Temperaturrekonstruktionen für die Nordhemisphäre (Shi *et al.*, 2013).

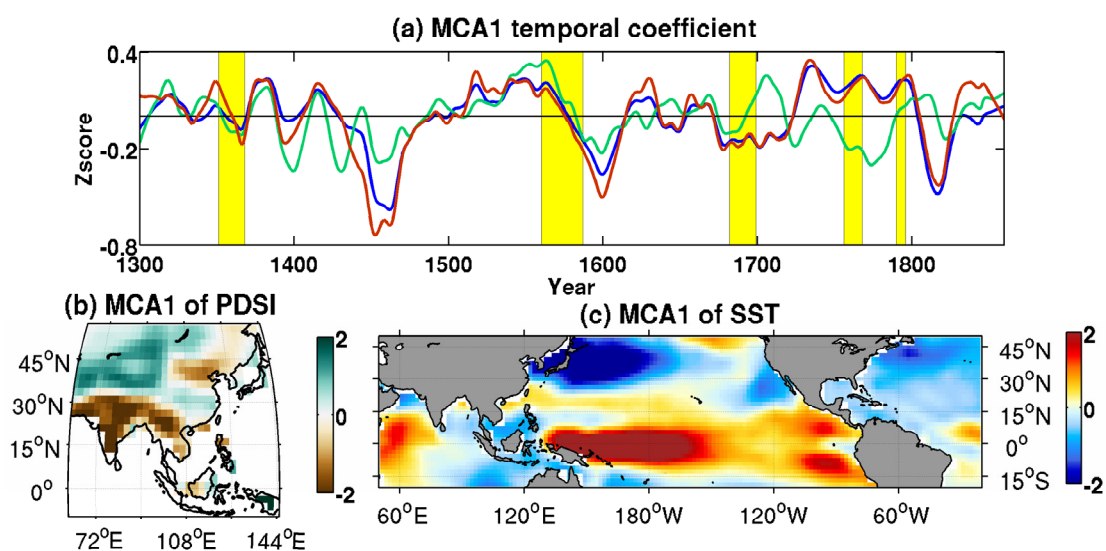


Abb. 4.1: Ergebnisse der gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Simulation mit ECHAM5/MPIOM: a) Erster Modus der Maximum Covariance Analysis (MCA1) für den PDSI (grün), die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur (SST, blau) und den Niño 4-Index (rot, zweifach überhöht). Die fünf extremen Dürreperioden sind gelb hervorgehoben. (b) Räumliches Muster des MCA1 für den PDSI. (c) Räumliches Muster des MCA1 für die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur (SST).

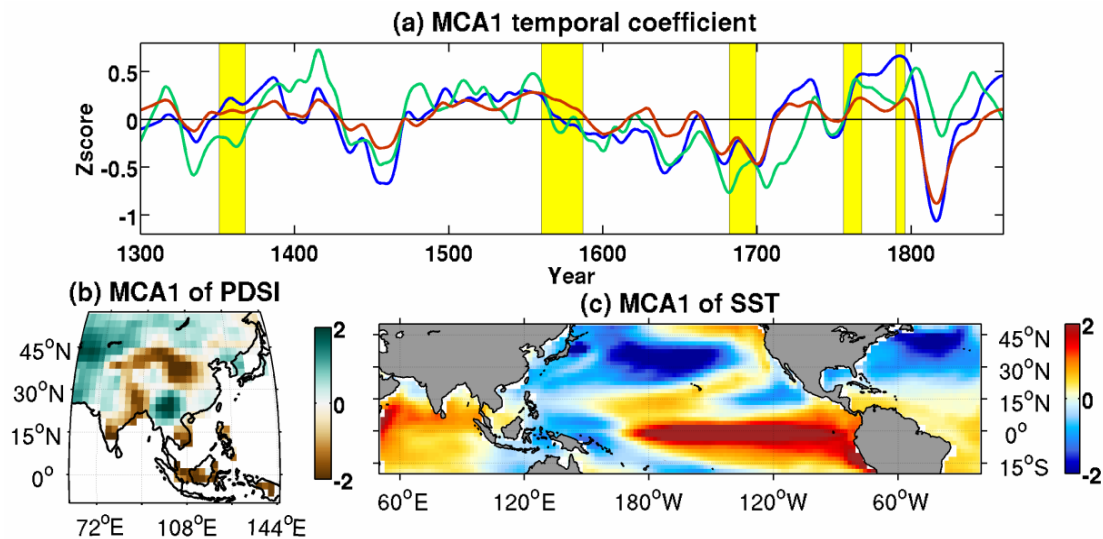


Abb. 4.2: Ergebnisse der gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Simulation mit GISS-E2-R: a) Erster Modus der Maximum Covariance Analysis (MCA1) für den PDSI (grün), die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur (SST, blau) und den Niño 4-Index (rot, zweifach überhöht). Die fünf extremen Dürreperioden sind gelb hervorgehoben. (b) Räumliches Muster des MCA1 für den PDSI. (c) Räumliches Muster des MCA1 für die Anomalie der Meeresoberflächentemperatur (SST).

Während der analysierten extremen Dürreperioden zeigt sich eine Abschwächung der monsunbedingten Konvektion über Indien und dem nördlichen Teil des Arabischen Meers, wohingegen die Konvektion über dem westlichen und zentralen Teil des äquatorialen Pazifiks verstärkt ist. Für die letzten ca. 150 Jahre (1856–2004) besteht eine gute Übereinstimmung zwischen der modellierten SST-Anomalie und der anhand von Proxydaten rekonstruierten Feuchtigkeitsverteilung (MADA) und SST-Anomalie (Cook *et al.*, 2010). Die Abschwächung der monsunbedingten Konvektion ist dabei, in Übereinstimmung mit England *et al.* (2014), wahrscheinlich auf die Abschwächung der pazifischen Passatwinde und des Somali-Jets zurückzuführen. Insbesondere ersteres führt durch eine Verringerung des windgesteuerten Upwellings im Bereich des zentralen und westlichen äquatorialen Pazifiks zur Ausbildung einer positiven SST-Anomalie wie unter El Niño-Bedingungen. Die erhöhten Wasseroberflächentemperaturen begünstigen dabei über atmosphärische Rückkopplung das Ausbleiben der Monsunniederschläge über dem indischen Subkontinent. Jedoch sind vor dem Hintergrund zukünftiger Klimaszenarien, insbesondere steigender Treibhausgaskonzentrationen, weitere Studien zum Verständnis der Beziehung zwischen ENSO und indischem Monsunsystem nötig.

Paläoklimasimulationen mit dem Atmosphären-Zirkulationsmodell ECHAM5

Die im Rahmen des TP4 durchgeführten paläoklimatischen Modellierungen konzentrierten sich darüber hinaus auf ausgewählte Zeitscheiben von jeweils 200 Jahren Länge während des Mittelalterlichen Klimaoptimums (MCA, AD 900–1100) und der Kleinen Eiszeit (LIA, AD 1515–1715).

Aufgrund der limitierten Kapazität an Rechenleistung wurden dabei nur die im Rahmen des Millennium-Experiments (Jungclaus *et al.*, 2010) durchgeführten hochaufgelösten Simulationen des Feuchtigkeitssignals in Zentralasien analysiert. Die Simulationen wurden mit dem Erdsystem-Modell COSMOS (räumliche Auflösung ca. $3.75^\circ \times 3.75^\circ$, 19 vertikale Ebenen) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg durchgeführt, welches das Ozean-Zirkulationsmodell MPI-OM (horizontale Auflösung ca. $3^\circ \times 3^\circ$, 40 vertikale Ebenen) und das Atmosphären-Zirkulationsmodell ECHAM5 (räumlich Auflösung ca. $1.8^\circ \times 1.8^\circ$, 31 vertikale Ebenen) vereint. Das Ergebnis der durchgeführten Simulationen zeigt, dass die Ensemblesimulation *mil014* im Vergleich zu den proxybasierten Rekonstruktionen das robusteste Signal zeigt.

Die simulierten Feuchteänderungen zwischen Mittelalterlichem Klimaoptimum und Kleiner Eiszeit wurden mit neun, anhand von Proxydaten aus lakustrinen und marinen Sedimenten, Moorablagerungen und Stalagmiten (Ely *et al.*, 1996; Chauhan *et al.*, 2000; Denniston *et al.*, 2000; Kar *et al.*, 2002; Bhattacharya *et al.*, 2007; Sinha *et al.*, 2011; Ponton *et al.*, 2012; Anoop *et al.*, 2013; Menzel *et al.*, 2013; Sanwal *et al.*, 2013; Prasad *et al.*, 2014; Sarkar *et al.*, 2014) abgeleiteten Paläoklimarekonstruktionen verglichen. Die simulierten und die anhand der Proxydaten rekonstruierten jährlichen Feuchtigkeitsänderungen zeigen im Gebiet des Himalayas und des indischen Subkontinents eine gute Übereinstimmung. Während die modellierten Feuchtigkeitsänderungen im Bereich des Himalayas generell konsistent mit den Rekonstruktionen anhand der dort zahlreich vorhandenen Paläoklimaarchive sind, zeigt sich im Bereich des indischen Subkontinents, auch aufgrund der geringeren Dichte verfügbarer proxybasierter Rekonstruktionen, eine deutliche Übereinstimmung zwischen modellierten und rekonstruierten Feuchtigkeitsänderungen nur für die Sommermonate. Dabei muss angemerkt werden, dass die Proxydaten für Zentralindien hauptsächlich auf den Ergebnissen der Arbeiten an den Sedimenten des Lonar-Kratersees beruhen (Prasad *et al.*, 2014). Diese Daten können aufgrund der zeitlichen Länge des Datensatzes und des verwendeten Multiproxy-Ansatzes als repräsentativ für Zentralindien angesehen werden und wurden für den Untersuchungszeitraum mit historischen Daten abgeglichen.

Im Rahmen der durchgeführten Modellierungen zu Feuchtigkeitsänderungen im Gebiet des Himalaya und des indischen Subkontinents wurden vorrangig die Hypothese von Rehfeld *et al.* (2013), nach der wärmere (kältere) Klimabedingungen zu einer Verstärkung (Abschwächung) des Indischen Sommermonsuns führen, sowie die physikalische Mechanismen hinter diesem Zusammenhang untersucht. Unter Erweiterung der theoretischen Betrachtungen von Rehfeld *et al.* (2013) konnten im Rahmen der Modellierungen drei Gebiete im Einflussbereich des Indischen Sommermonsuns identifiziert werden, die deutliche Feuchtigkeitsanomalien während der Sommer- und Wintermonate zeigen. Dies sind (1) der westliche und zentrale Himalaya, die im Winter durch Änderungen in der Stärke der Westwinde beeinflusst werden, (2) der östliche Himalaya, der während des Sommers durch Änderungen im thermischen Gradient zwischen dem Golf von Bengalen und dem indischen Subkontinent sowie die Wechselwirkung zwischen Indischem Sommermonsun und Ostasiatischem Sommermonsun beeinflusst wird, und (3) Zentralindien, wo die Feuchtigkeitsanomalie während der Sommermonate durch die Wassertemperatur der Meeresoberfläche im nördlichen Teil des Arabischen Meers gesteuert wird.

Wie von Prasad *et al.* (2014) gezeigt, variieren dabei die Stärke der großskaligen Advektion feuchter Luftmassen in Richtung des indischen Subkontinents sowie die Verbindung zwischen dem *Indo Pacific Warm Pool* und dem Indischen Sommermonsun auf einer Zeitskala von mehreren Jahrhunderten.

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Rehfeld *et al.* (2013) zeigen die von uns durchgeführten Analysen des Unterschieds zwischen Mittelalterlichem Klimaoptimum und Kleiner Eiszeit (MCA-LIA) eine Nordwärtsverschiebung des Monsunaktivität während wärmerer Klimabedingungen und daraus resultierend eine Abschwächung der Monsunniederschläge über Zentralindien bzw. eine Verstärkung über dem östlichen Himalaya. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kombination von Modellierungs- und Proxydaten, wie sie im Rahmen des TP4 angewendet wurde, zu einem verbesserten Verständnis von Klimaveränderungen in der Vergangenheit führt und zur Validierung von Klimasimulationen genutzt werden kann, was außerdem Rückschlüsse über die Mechanismen hinter Klimaänderungen erlaubt (vgl. Polanski *et al.*, 2014).

Regionale Klimasimulationen mit COSMO-CLM

Aufgrund der topographischen Komplexität Asiens wurden die regionalen Feuchtigkeitsänderungen während der letzten 1000 Jahre außerdem mit einem regionalen Klimamodell untersucht. Dabei lag der Fokus auf der Entwicklung der Feuchtigkeitsvariabilität im ariden Teil Zentralasiens und den zugrunde liegenden Antriebsmechanismen. Für die Simulation der kleinräumigen regionalen Klimaänderungen wurde das vom Deutschen Wetterdienst entwickelte Klimamodell COSMO-CLM in der Version 4.8 clm17 (Stappeler *et al.*, 2003; Dobler & Ahrens, 2008; Asharaf *et al.*, 2012) genutzt. Nach der Evaluierung des Klimamodells bezüglich seiner Fähigkeit die räumlich-zeitliche Verteilung von trockenen und feuchten Bedingungen in der jüngeren Vergangenheit gemäß existierender instrumenteller Beobachtungen und Re-Analyse-Daten realistisch zu reproduzieren, wurde das Modell dazu benutzt, extreme Feuchtigkeitsänderungen während der letzten 1000 Jahre zu simulieren. Diesbezüglich zeigt die Analyse des Klimas der jüngeren Vergangenheit (1979–2006) nach dem El Niño-Ereignis 1997/1998 eine deutliche Änderung in der Auftretenswahrscheinlichkeit trockener Bedingungen in Zentralasien.

Die durchgeführten Modellsimulationen decken verschiedene Klimabedingungen während des letzten Jahrtausends ab. Dabei können innerhalb der drei untersuchten Zeitabschnitte (präindustrielle Zeit, Kleine Eiszeit, Mittelalterliches Klimaoptimum) Feucht- und Trockenphasen unterschieden werden. Mittels des Vergleichs der Antriebsmechanismen von Feuchtigkeitsänderungen im ariden Teil Zentralasiens während ausgewählter Zeitfenster (jeweils sechs Abschnitte von je 30 Jahren Dauer) wurden die Unterschiede zwischen natürlichen auftretenden extremen Feucht- und Trockenphasen untersucht. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass während der Kleinen Eiszeit gegenüber dem Mittelalterlichen Klimaoptimum eine deutliche positive Anomalie in der jährlichen Niederschlagsmenge zu verzeichnen ist. Diese Anomalie zeigt dabei eine räumliche Ausbreitung vom ariden Teil Zentralasiens bis in den monsunbeeinflussten Teil Asiens und ist in Zentralasien durch verstärkte Winterniederschläge dominiert wogegen im mon-

sunbeeinflussten Teil Asiens die Sommerniederschläge dominieren. Der Sommermonsun steht dabei in direktem Zusammenhang zu negativen SST-Anomalien im Zentralpazifik und positiven SST-Anomalien im Nordatlantik. Während feuchter Phasen im Winter führt eine Abkühlung im Bereich des Nordatlantiks zu verstärkten Niederschlägen in Zentralasien. Darüber hinaus zeigt sich in trockeneren Phasen während der Kleinen Eiszeit eine positive Niederschlagsanomalie über Nordostasien sowie verstärkte Westwindaktivität im Sommer, wohingegen in Trockenphasen während des Mittelalterlichen Klimaoptimums trockenere Bedingungen über dem monsunbeeinflussten Teil Asiens dominieren und eine El Niño-ähnliche SST-Anomalie im Pazifik sowie eine Verschiebung der Westwinde in Richtung Äquator zu beobachten ist. Verstärkte Westwinde während der Sommermonate des generell trockeneren Mittelalterlichen Klimaoptimums führen im westlichen Teil Zentralasiens (30–40° Nord und 60–80° Ost) zu verstärkten Niederschlägen.

Da die durchgeführten Simulationen nur auf einem einzigen globalen Zirkulationsmodell basieren, ist eine jahrgenaue zeitliche Einordnung der beobachteten klimatischen Veränderungen nicht möglich. Nichtsdestotrotz geben die Simulationen für längere Abschnitte (30 Jahre) innerhalb der untersuchten Intervalle die durch natürliche externe Antriebsmechanismen gesteuerte Klimavariabilität korrekt wieder. Die Verwendung unterschiedlicher globaler Zirkulationsmodelle für das dynamische Down-Scaling mit verschiedenen regionalen Zirkulationsmodellen könnte die Genauigkeit der Modellierungen erhöhen, allerdings ist für diesen Ansatz der rechentechnische Aufwand bislang zu hoch.

Modellierungen zum klimatischen Einfluss des Tibet-Plateaus

Als weiterer Teil der paläoklimatischen Simulationen im TP4 wurde mit dem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodell ECHAM5/MPIOM der Einfluss des Tibet-Plateaus auf das asiatischen Monsunsystem und das globale Klimageschehen untersucht. Dabei wurden sowohl ein Kontroll-Szenario mit der tatsächlichen Topographie des Tibet-Plateaus (CTRL) als auch ein Szenario ohne Tibet-Plateau (NOTP) simuliert. Die Resultate der Modellsimulationen zeigen, den signifikanten Einfluss des Tibet-Plateaus auf die atmosphärische Zirkulation.

Unter realen Bedingungen (mit Tibet-Plateau, CTRL) zeigen die Ergebnisse der Modellierung eine den heutigen Verhältnissen entsprechende Verteilung der Monsunniederschläge während der Sommermonate (Abb. 4.3a) mit deutlichen Maxima über dem indischen Subkontinent, Südostasien sowie im Bereich des äquatorialen Pazifiks. Diese Niederschlagsmaxima sind vorrangig im Bereich aufwärtiger Luftmassenbewegungen lokalisiert (Abb. 4.3b) und können somit als konvektive Niederschläge klassifiziert werden. Auch die atmosphärische Zirkulation über dem Pazifik entspricht in der Kontroll-Simulation in ihrem Muster den zu erwartenden Bedingungen mit aufsteigenden Winden im westlichen Teil des äquatorialen Pazifiks, absteigenden Winden an der Westküste Amerikas und westwärts gerichteten oberflächennahen Passatwinden über dem Pazifik (Walker-Zirkulation).

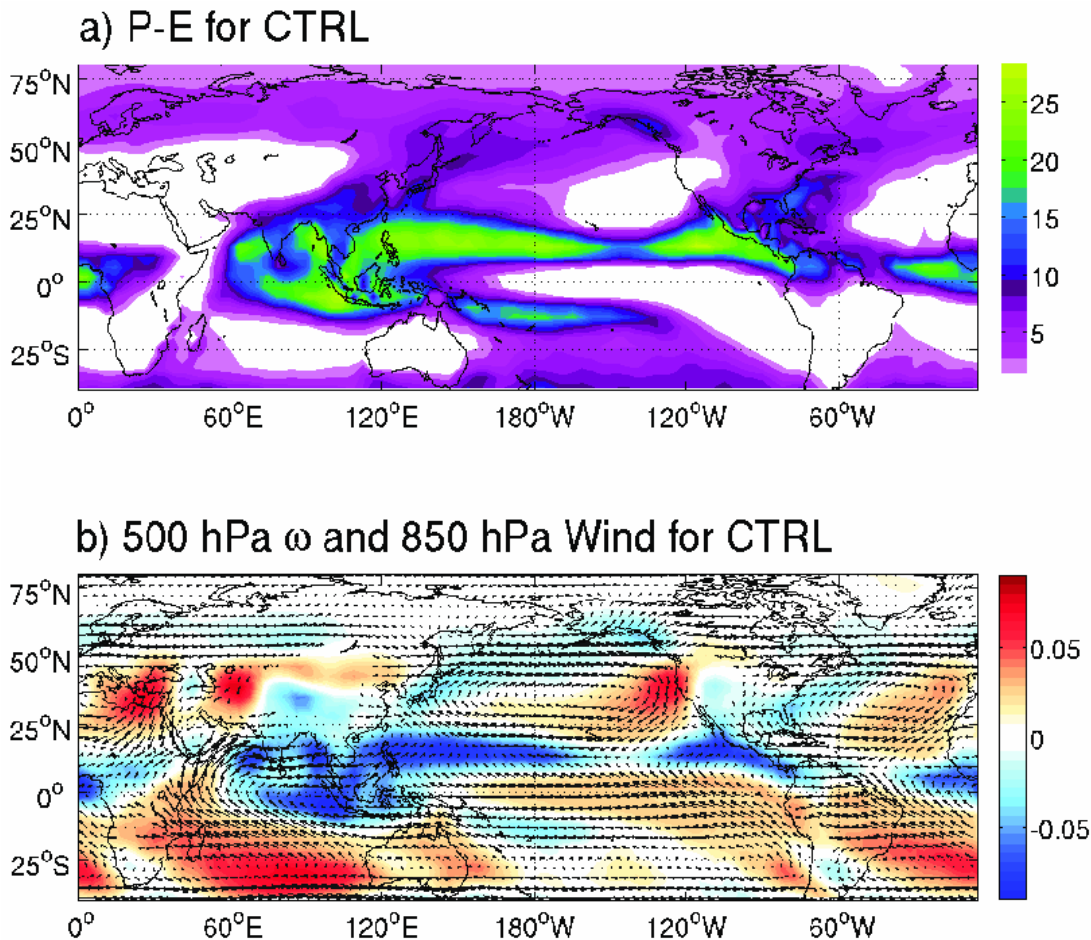


Abb. 4.3: (a) Differenz zwischen Niederschlag und Evaporation (P-E, mm/d) während der Sommermonate (JJAS) für die Kontroll-Simulation mit Tibet-Plateau (CTRL). (b) 500 hPa-Isohypse für die Kontroll-Simulation mit Tibet-Plateau (CTRL) als Indikator für aufwärtsgerichtete ($\omega < 0$ Pa/s, blau) und abwärtsgerichtete ($\omega > 0$ Pa/s, rot) Luftmassenströmungen. Zusätzlich sind das räumliche Muster und die Geschwindigkeit (m/s) der oberflächennahen Winde (850 hPa) dargestellt. Die maximale Pfeillänge entspricht 12 m/s.

Größere antizyklonale Strömungsmuster lassen sich an der windabgewandten Seite des Tibet-Plateaus sowie im Nordpazifik und Nordatlantik nachweisen (Abb. 4.3b). Im Bereich des Nordatlantiks kommt es dadurch zur Ausbildung der Nordatlantischen Zirkulation, d.h. zu einer Nordwärtsbewegung warmen Oberflächenwassers und dessen Absinken in hohen nördlichen Breiten nach erfolgtem Wärmeaustausch mit der Atmosphäre.

Anhand des Unterschieds zwischen der Kontroll-Simulation und der Simulation ohne Tibet-Plateau (CTRL-NOTP) lässt sich im Folgenden der Einfluss der Orographie auf das globale Klimageschehen abschätzen. Im NOTP-Szenario ist eine deutliche Abschwächung des Asiatischen Sommermonsuns, insbesondere über Ostchina, sowie eine Verschiebung der Intertropischen Konvergenzzone (ITCZ) in Richtung Äquator zu beobachten (Abb. 4.3c). Darüber hinaus zeigt sich über dem östlichen Teil des äquatorialen Pazifiks eine Abschwächung der atmosphärischen Konvektion sowie eine Verschiebung in Richtung des Zentralpazifiks und Amerikas.

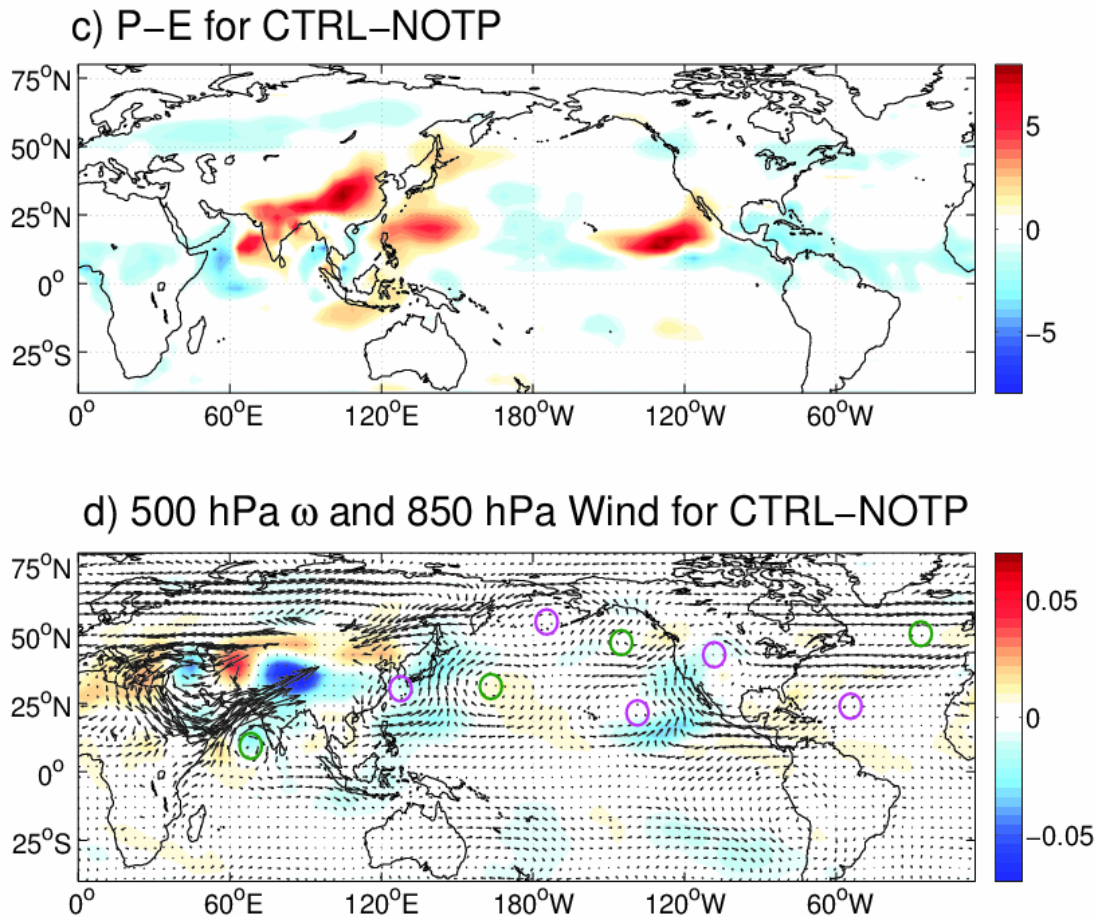


Abb. 4.3: (c) Differenz zwischen Niederschlag und Evaporation ($P-E$, mm/d) während der Sommermonate (JJAS) für die Simulation ohne Tibet-Plateau im Vergleich zur Kontrollsimulation (CTRL-NOTP). (b) 500 hPa-Isohypse für die Simulation CTRL-NOTP als Indikator für aufwärtsgerichtete ($\omega < 0$ Pa/s, blau) und abwärtsgerichtete ($\omega > 0$ Pa/s, rot) Luftmassenströmungen. Zusätzlich sind das räumliche Muster und die Geschwindigkeit (m/s) der oberflächennahen Winde (850 hPa) dargestellt. Die maximale Pfeillänge entspricht 12 m/s. Magentafarbene und grüne Kreise kennzeichnen zyklonale bzw. antizyklonale Zirkulationsbewegungen.

Als markantester Unterschied zeigt sich in der NOTP-Simulation eine weiträumige Abschwächung der aufwärtsgerichteten atmosphärischen Vertikalbewegung im Einflussbereich des Sommermonsuns, insbesondere im Einflussbereich des Somali-Jets (Abb. 4.3d). Dabei ist wahrscheinlich die deutliche Abschwächung des Somali-Jets, der den östlichen Teil Afrikas sowie den Jemen und Oman streift, für die Abschwächung des Feuchtigkeitstransports in die indische Monsunregion im NOTP-Szenario verantwortlich. Auf der windabgewandten Seite des Tibet-Plateaus, welches die größte topographische Barriere im Untersuchungsgebiet darstellt, zeigt sich im NOTP-Szenario das Fehlen der alternierenden Hoch- und Tiefdruckgebiete (Abb. 4.3d). Außerdem ist eine Abschwächung der Passatwinde zu beobachten, was zu einer Verstärkung der Walker-Zirkulation im Bereich des äquatorialen Pazifiks führt und somit zu verstärktem Aufstieg von Luftmassen über Indonesien und verstärktem Absinken über dem östlichen Pazifik beiträgt. Darüber hinaus zeigen die Winde in 1,5–2 km Höhe (850 hPa) im Bereich des Nordatlantiks ein verstärktes antizyklonales Zirkulationsmuster (Abb. 4.3d), was zu einer Veränderung der Ozeanoberflächenströmung in diesem Gebiet führt.

Im Gegensatz dazu fehlt das antizyklonale Strömungsmuster über dem westlichen Teil des Nordpazifiks im NOTP-Szenario. Des Weiteren sorgt die Ausbildung einer starken zyklonalen Zirkulationszelle über dem Mittleren Osten für verstärkten Transport von Feuchtigkeit aus dem westlichen Arabischen Meer in die Monsunregion. (Abb. 4.3d).

Neben dem direkten Einfluss auf das Klima in Asien, hat ein Fehlen des Tibet-Plateaus in den entsprechenden Simulationen auch Auswirkungen auf die globalen klimatischen Verhältnisse. So beeinflusst das Fehlen des Tibet-Plateaus beispielsweise die Wassertemperatur der Meeresoberfläche und die windgesteuerte Ozeanzirkulation im Bereich des Nordatlantiks und führt dort zu einem verminderten Absinken warmen Oberflächenwassers in tiefere Bereiche des Ozeans und somit zu einer Abschwächung der Nordatlantischen Zirkulation. Dies hat zur Folge, dass auch die Wärmeaufnahme über dem Nordatlantik reduziert ist. Da die Meeresoberflächentemperaturen im Nordatlantik wiederum statistisch signifikant mit der Niederschlagsverteilung in der asiatischen Monsunregion korreliert sind, zeigt sich im NOTP-Szenario neben einer Abkühlung im Nordatlantik eine weiträumige Reduktion der Niederschläge über dem Gebiet des indischen Subkontinents und Südostchinas.

Unter Berücksichtigung der so genannten *β -plane barotropic theory* kommt es an der windabgewandten Seite einer topographischen Barriere bei sich ostwärtsbewegenden Luftmassen zu einer Serie alternierender zyklonaler und antizyklonaler Zirkulationszellen. Die quantitativen Modellsimulationen zeigen das Fehlen dieses Zirkulationsmusters im NOTP-Szenario. Wie in den Simulationen mit globalen Zirkulationsmodellen zeigt sich im NOTP-Szenario eine deutliche Abschwächung des Somali-Jets, der als Hauptantrieb des so genannten *moisture conveyor belt* für den Feuchtigkeitstransport in Richtung des indischen Subkontinents verantwortlich ist.

Aus den gewonnenen Ergebnissen lässt sich schließen, dass das globale Klimasystem signifikant von Telekonnektionen zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst wird und dass diese Wechselwirkungen in entscheidendem Maße in Modellierungsstudien berücksichtigt werden sollten. Jedoch fehlen bislang aufgrund des hohen rechentechnischen Aufwands für gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle noch in großem Maße Langzeitsimulationen mit hoher räumlicher Auflösung, um den klimatischen Einfluss des Tibet-Plateaus auf das globale Klimageschehen hinreichend zu bestimmen. So ist beispielsweise für die im Rahmen des TP4 durchgeführten Simulationen zu konstatieren, dass das verwendete zeitliche Integrationsintervall wahrscheinlich nicht ausreichend war, um auch in den tiefen Bereichen des Ozeans den Gleichgewichtszustand zu erreichen; dazu wären wahrscheinlich Integrationsintervalle in der Ordnung geologischer Zeitskalen (d.h. von mehreren tausend Jahren) nötig. Um die Widerspruchsfreiheit der Modelle bezüglich der Empfindlichkeit des Nordatlantiks auf Änderungen in der Topographie im Bereich Tibets zu erhöhen, ist es darüber hinaus ebenfalls nötig, zahlreiche Simulationen mit unterschiedlichen Klimamodellen und/oder Ausgangsszenarien durchzuführen. Außerdem könnte eine Erhöhung der räumlichen Auflösung der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodelle zeigen, dass der Einfluss durch topographische Änderungen induzierter Mechanismen auf das Klimasystem größer ist, als sich mit den bisherigen niedrig aufgelösten Klimasimulationen feststellen lässt.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die der Freien Universität Berlin im Rahmen des TP4 zur Verfügung gestellten Mittel wurden für die Finanzierung einer Doktorandenstelle (3 Jahre, TVÖD 13, 50 %) sowie mehrerer studentische Hilfskräfte verwendet. Der Aufgabenbereich des Doktoranden umfasste dabei die Modellanpassung sowie die Durchführung der Modellrechnungen und deren Auswertung. Diese Tätigkeiten wurden durch die Arbeit der studentischen Hilfskräfte unterstützt.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Basierend auf den im Rahmen des TP1 bereits erhobenen (Lauterbach *et al.*, 2014) und noch zu publizierenden Proxydaten für Zentralasien eröffnet sich die Möglichkeit, die bisher für die Monsunregion durchgeführten Modellierungen zur holozänen Klimavariabilität und Vergleiche mit Proxydaten (Polanski *et al.*, 2014) mit den angepassten globalen und regionalen Klimamodellen auch auf den zentralasiatischen Raum auszuweiten und so neue Erkenntnisse zu Wechselwirkungen zwischen Monsunsystem und Westwindzirkulation in diesem Gebiet zu gewinnen. Insbesondere die identifizierten Zyklizitäten und Zeitpunkte bedeutender klimatischer Veränderungen in Zentralasien (Lauterbach *et al.*, 2014) können jetzt mit den Ergebnissen von Klimasimulationen verglichen werden. Darüber hinaus eröffnet sich auch die Möglichkeit der Konstruktion neuer Simulationen mit längeren Integrationsintervallen. Die Erfahrungen aus den bisher durchgeführten Modellsimulationen bieten dabei nützliche Ansatzpunkte zur Untersuchung der Antriebsmechanismen klimatischer Veränderungen. Ensemblesimulationen mit unterschiedlichen Klimamodellen und/oder Ausgangsszenarien könnten zudem die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse erhöhen.

Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Arbeitsgruppen

Während der Laufzeit sind keine Untersuchungen mit übertragbaren Ergebnissen von dritter Seite publiziert worden.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden folgende Beiträge auf Konferenzen präsentiert (in chronologischer Reihenfolge):

- Polanski, S., Fallah, B., Leckebusch, G. & Cubasch, U. (2012): **Indian Monsoon and its variability during the last Millennium – a model-proxy-intercomparison study**. *AGU Fall Meeting*, 3.–7. Dezember 2012, San Francisco, USA.

- Fallah, B., Polanski, S., Kirchner, I. & Cubasch, U. (2013): **Modeling Central Asian climate dynamics – Simulation of drought in Central Asia during the Last Millennium.** *Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) Benutzerworkshop*, 26. Februar 2013, Hamburg, Deutschland.
- Polanski, S., Fallah, B., Prasad, S. & Cubasch, U. (2013): **Simulation of Indian Monsoon variability in the Medieval Warm Period using ECHAM5 General Circulation Model.** *EGU General Assembly*, 7.-12. April 2013, Wien, Österreich.
- Fallah, B., Polanski, S., Prasad, S. & Cubasch, U. (2013): **Simulation of drought in Central Asia during the Last Millennium.** *EGU General Assembly*, 7.-12. April 2013, Wien, Österreich.
- Fallah, B., Polanski, S. & Cubasch, U. (2013): **Could the mega droughts during the last millennium have been predicted?** *28th Himalayan-Karakorum-Tibet Workshop / 6th International Symposium on Tibetan Plateau*, 20.–24. August 2013, Tübingen, Deutschland.
- Fallah, B., Sodoudi, S. & Cubasch, U. (2014): **The response of Asian summer monsoon to the Tibetan plateau heating simulated by ECHAM5/MPIOM and COSMO-CLM.** *EGU General Assembly*, 27. April – 2. Mai 2014, Wien, Österreich.
- Fallah, B., Sodoudi, S. & Cubasch, U. (2014): **A comparison of model simulations of Asian megadroughts during the past millennium with proxy reconstructions.** *International Symposium on Loess, Soils and Climate Change in Southern Eurasia*, 15.–19. Oktober 2014, Gorgan, Iran.

Darüber hinaus wurden folgende Artikel in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht bzw. eingereicht oder befinden sich in Vorbereitung:

- Polanski, S., Fallah, B., Befort, D. J., Prasad, S. & Cubasch, U. (2014): **Regional moisture change over India during the past Millennium: A comparison of multi-proxy reconstructions and climate model simulations.** *Global and Planetary Change* 122, 176–185.
- Fallah, B. & Cubasch, U. (2014): **A comparison of model simulations of Asian megadroughts during the past Millennium with proxy reconstructions.** *Climate of the Past Discussions* 10, 2685–2716.
- Polanski, S., Fallah, B., Prasad, S. & Cubasch, U. (2013): **Simulation of the Indian Monsoon and its Variability during the last Millennium.** *Climate of the Past Discussions* 9, 703–740.
- Fallah, B., Cubasch, U., Prömmel, K. & Sodoudi, S.: **A numerical model study on the behaviour of Asian summer monsoon due to orographical forcing of Tibetan Plateau.** (eingereicht).

- Fallah, B., Sodoudi, S. & Cubasch, U.: **Westerly jet stream and past millennium climate change in Arid Central Asia simulated by COSMO-CLM model.** (eingereicht).
- Fallah, B., Sodoudi, S. & Cubasch, U.: **Bimodality and regime behavior in atmosphere-ocean interactions during the planetary energy imbalance.** (in Vorbereitung).

Des Weiteren wurden innerhalb des TP4 folgende akademische Abschlussarbeiten angefertigt bzw. befinden sich in Vorbereitung:

- Hanf, F. (2012): **The ocean-atmosphere coupling of the South Asian Summer Monsoon during the last Millennium.** Masterarbeit, Freie Universität Berlin.
- Mentzel, F. (2012): **Auswirkungen verschiedener Auflösungen von ECHAM6 auf die Simulation des indischen Sommermonsuns.** Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin.
- Fallah, B.: **Modelling the Central Asian Climate Dynamics.** Dissertation, Freie Universität Berlin. (in Vorbereitung)

Literatur

- An, C., Lu, Y., Zhao, J., Tao, S., Dong, W., Li, H., Jin, M. & Wang, Z. (2012): **A high-resolution record of Holocene environmental and climatic changes from Lake Balikun (Xinjiang, China): Implications for Central Asia.** *The Holocene* 22: 43–52.
- Anoop, A., Prasad, S., Plessen, B., Basavaiah, N., Gaye, B., Naumann, R., Menzel, P., Weise, S. & Brauer, A. (2013): **Palaeoenvironmental implications of evaporative gaylussite crystals from Lonar Lake, central India.** *Journal of Quaternary Science* 28, 349–359.
- Asharaf, S., Dobler, A. & Ahrens, B. (2012): **Soil moisture-precipitation feedback processes in the Indian Summer Monsoon season.** *Journal of Hydrometeorology* 13, 1461–1474.
- Beer, R., Heiri, O. & Tinner, W. (2007): **Vegetation history, fire history and lake development recorded for 6300 years by pollen, charcoal, loss on ignition and chironomids at a small lake in southern Kyrgyzstan (Alay Range, Central Asia).** *The Holocene* 17, 977–985.
- Bhattacharyya, A., Sharma, J., Shah, S. K. & Chaudhary, V. (2007): **Climatic changes during the last 1800 yrs BP from Paradise Lake, Sela Pass, Arunachal Pradesh, Northeast Himalaya.** *Current Science* 93, 983–987.
- Bjune, A.E., Bakke, J., Nesje, A. & Birks, H. J. B. (2005): **Holocene mean July temperature and winter precipitation in western Norway inferred from palynological and glaciological lake-sediment proxies.** *The Holocene* 15, 177–189.
- Bluszcz, P., Kirilova, E., Lotter, A. F., Ohlendorf, C. & Zolitschka B. (2008): **Global Radiation and Onset of Stratification as Forcing Factors of Seasonal Carbonate and Organic Matter Flux Dynamics in a Hypertrophic Hardwater Lake (Sacrower See, Northeastern Germany).** *Aquatic Geochemistry* 14, 73–98.
- Bondarev, L.G., Gobedzhishvili, R.G. & Solomina, O.N. (1997): **Fluctuations of local glaciers in the southern ranges of the former USSR: 18,000-8000 BP.** *Quaternary International* 38–39, 103–108.
- Brassell, S. C., Eglinton, G., Marlowe, I. T., Pflaumann, U. & Sarnthein, M. (1986): **Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment.** *Nature* 320, 129–133.
- Chapman, M. R. & Shackleton, N. J. (2000): **Evidence of 550-year and 1000-year cyclicities in North Atlantic circulation patterns during the Holocene.** *The Holocene* 10, 287–291.
- Chauhan, M. S., Mazari, R. K. & Rajagopalan, G. (2000): **Vegetation and climate in upper Spiti region, Himachal Pradesh during late Holocene.** *Current Science* 79, 373–377.
- Chen, F., Yu, Z., Yang, M., Ito, E., Wang, S., Madsen, D. B., Huang, X., Zhao, Y., Sato, T., Birks, H. J. B., Boomer, I., Chen, J., An, C. & Wünnemann, B. (2008): **Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history.** *Quaternary Science Reviews* 27, 351–364.

- Chu, G., Sun, Q., Xie, M., Lin, Y., Shang, W., Zhu, Q., Shan, Y., Xu, D., Rioual, P., Wang, L. & Liu, J. (2014): **Holocene cyclic climatic variations and the role of the Pacific Ocean as recorded in varved sediments from northeastern China.** *Quaternary Science Reviews* 102, 85–95.
- Cook, E. R., Anchukaitis, K. J., Buckley, B. M., D'Arrigo, R. D., Jacoby, G. C. & Wright, W. E. (2010): **Asian Monsoon failure and megadrought during the last Millennium.** *Science* 328, 486–489.
- Cosford, J., Qing, H., Eglington, B., Matthey, D., Yuan, D., Zhang, M. & Cheng, H. (2008): **East Asian monsoon variability since the Mid-Holocene recorded in a high-resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China.** *Earth and Planetary Science Letters* 275, 296–307.
- Dai, A. (2013): **Increasing drought under global warming in observations and models.** *Nature Climate Change* 3, 52–58.
- Dallmayer, A., Claussen, M., Wang, Y. & Herzsuh, U. (2013): **Spatial variability of Holocene changes in the annual precipitation pattern: a model-data synthesis for the Asian monsoon region.** *Climate Dynamics* 40, 2919–2936.
- Dansgaard, W. (1964): **Stable isotopes in precipitation.** *Tellus* 16, 436–468.
- Denniston, R. F., Gonzalez, L. A., Asmerom, Y., Sharma, R. H. & Reagan, M. K. (2000): **Speleothem evidence for changes in Indian summer monsoon precipitation over the last ~2300 years.** *Quaternary Research* 53, 196–202.
- Dobler, A. & Ahrens, B. (2008): **Precipitation by a regional climate model and bias correction in Europe and South Asia.** *Meteorologische Zeitschrift* 17, 499–509.
- Dongges, J.F., Donner, R.V., Marvan, N., Breitenbach, S.F.M., Rehfeld, K. & Kurths, J. (2014): **Nonlinear regime shifts in Holocene Asian monsoon variability: potential impacts on cultural change and migratory patterns.** *Climate of the Past* 10, 895–975.
- Ely, L. L., Enzel, Y., Baker, V. R., Kale, V. S. & Mishra, S. (1996): **Changes in the magnitude and frequency of late Holocene monsoon floods on the Narmada River, central India.** *GSA Bulletin* 108, 1134–1148.
- England, M. H., McGregor, S., Spence, P., Meehl, G. A., Timmermann, A., Cai, W., Gupta, A. S., McPhaden, M. J., Purich, A. & Santoso, A. (2014): **Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus.** *Nature Climate Change* 4, 222–227.
- Fletcher, W. J., Debret, M. & Sanchez-Goñi, M. F. (2012): **Mid-Holocene emergence of a low-frequency millennial oscillation in western Mediterranean climate: Implications for past dynamics of the North Atlantic atmospheric Westerlies.** *The Holocene* 23, 153–166.

- Frenzel, P., Wrozyna, C., Xie, M., Zhu, L. & Schwalb, A. (2010): **Palaeo-water depth estimation for a 600-year record from Nam Co (Tibet) using an ostracod-based transfer function.** *Quaternary International* 218, 157–165.
- Friedman, I., O’Neil, J. & Cebula G. (1982): **Two new carbonate stable-isotope standards.** *Geostandards Newsletter* 6, 11–12.
- Garcin, Y., Schwab, V. F., Gleixner, G., Kahmen, A., Todou, G., Sene, O., Onana, J.-M., Achoundong, G. & Sachse, D. (2012): **Hydrogen isotope ratios of lacustrine sedimentary *n*-alkanes as proxies of tropical African hydrology: Insights from a calibration transect across Cameroon.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 79, 106–126.
- Gibson, J. J. & Edwards, T. W. D. (2002): **Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada.** *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1026.
- Günther, F., Aichner, B., Siegwolf, R., Xu, B., Yao, T. & Gleixner, G. (2013): **A synthesis of hydrogen isotope variability and its hydrological significance at the Qinghai-Tibetan Plateau.** *Quaternary International* 313, 3–16.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. (2001): **PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis.** *Palaeontologia Electronica* 4, 1–9.
- He, Y., Zhao, C., Wang, Z., Wang, H., Song, M., Liu, W. & Liu, Z. (2013): **Late Holocene coupled moisture and temperature changes on the northern Tibetan Plateau.** *Quaternary Science Reviews* 80, 47–57.
- Hong, Y. T., Wang, Z.G., Jiang, H. B., Lin, Q. H., Hong, B., Zhu, Y. X., Wang, Y., Xu, L. S., Leng, X. T. & Li, H. D. (2001): **A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose.** *Earth and Planetary Science Letters* 185, 111–119.
- Hou, J. Z., D’Andrea, W. J. & Huang, Y. S. (2008): **Can sedimentary leaf waxes record D/H ratios of continental precipitation? Field, model, and experimental assessments.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 3503–3517.
- Hren, M. T., Bookhagen, B., Blisniuk, P. M., Booth, A. L. & Chamberlain, C. P. (2009): **$\delta^{18}\text{O}$ and δD of streamwaters across the Himalaya and Tibetan Plateau: Implications for moisture sources and paleoelevation reconstructions.** *Earth and Planetary Science Letters* 288, 20–32.
- Huang, X., Oberhänsli, H., von Suchodoletz, H., Prasad, S., Sorrel, P., Plessen, B., Mathis, M. & Usabaliyev, R. (2014): **Hydrological changes in western Central Asia (Kyrgyzstan) during the Holocene: Results of a paleolimnological study from Son Kul.** *Quaternary Science Reviews* 103, 134–152.

- Hurrell, J. W. (1995): **Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation.** *Science* 269, 676–679.
- Irmeler, R., Daut, G. & Mäusbacher, R. (2006): **A debris flow calendar derived from sediments of lake Lago di Braies (N-Italy).** *Geomorphology* 77, 69–78.
- Jackson, M. G., Oskarsson, N., Trønnnes, R. G., McManus, J. F., Oppo, D.W., Grönvold, K., Hart, S. R. & Sachs, J. P. (2005): **Holocene loess deposition in Iceland: Evidence for millennial-scale atmosphere-ocean coupling in the North Atlantic.** *Geology* 33, 509–512.
- Jonsson, C. E., Leng, M. J., Rosqvist, G. C., Seibert, J. & Arrowsmith, C. (2009): **Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden.** *Journal of Hydrology* 376, 143–151.
- Juggins, S. (2001): **The European Diatom Database – Version 1.0.** (abrufbar unter <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/index.jsp>).
- Jungclauss, J. H., Lorenz, S. J., Timmreck, C., Reick, C. H., Brovkin, V., Six, K., Segschneider, J., Giorgetta, M. A., Crowley, T. J., Pongratz, J., Krivova, N. A., Vieira, L. E., Solanki, S. K., Klocke, D., Botzet, M., Esch, M., Gayler, V., Haak, H., Raddatz, T. J., Roeckner, E., Schnur, R., Widmann, H., Claussen, M., Stevens, B. & Marotzke, J. (2010): **Climate and carbon-cycle variability over the last Millennium.** *Climate of the Past* 6, 723–737.
- Kalugin, I., Darin, A., Rogozin, D. & Tretyakov, G. (2013): **Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia.** *Quaternary International* 290–291, 245–252.
- Kar, R., Ranhotra, P. S., Bhattacharyya, A. & Sekar, B. (2002): **Vegetation vis-a-vis climate and glacial fluctuations of the Gangotri Glacier since the last 2000 years.** *Current Science* 82, 347–351.
- Kasper, T., Frenzel, P., Haberzettl, T., Schwarz, A., Daut, G., Meschner, S., Wang, J., Zhu, L. & Mäusbacher, R. (2013): **Interplay between redox conditions and hydrological changes in sediments from Lake Nam Co (Tibetan Plateau) during the past 4000 cal BP inferred from geochemical and micropalaeontological analyses.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 392, 261–271.
- Kawahata, H., Ohshima, H., Shimada, C. & Oba, T. (2003): **Terrestrial-oceanic environmental change in the southern Okhotsk sea during the Holocene.** *Quaternary International* 108, 67–76.
- Krishnan, R., Kumar, V., Sugi, M. & Yoshimura, J. (2009): **Internal feedbacks from monsoon –midlatitude interactions during droughts in the Indian Summer Monsoon.** *Journal of the Atmospheric Sciences* 66, 553–578.

- Kubota, Y., Tada, R. & Kimoto, K. (2014): **Quantitative reconstruction of East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene based on oxygen isotope mass-balance calculation in the East China Sea.** *Climate of the Past Discussions* 10, 1447–1492.
- Lauterbach, S., Witt, R., Plessen, B., Dulski, P., Prasad, S., Mingram, J., Gleixner, G., Hettler-Riedel, S., Stebich, M., Schnetger, B., Schwalb, A. & Schwarz, A. (2014): **Climatic imprint of the mid-latitude Westerlies in the Central Tian Shan of Kyrgyzstan and teleconnections to North Atlantic climate variability during the last 6000 years.** *The Holocene* 24, 970–984.
- Li, J., Mackay, A. W., Zhang, Y. & Li, J. (2013): **A 1000-year record of vegetation change and wildfire from maar lake Erlongwan in northeast China.** *Quaternary International* 290–291, 313–321.
- Li, X., Zhao, K., Dodson, J. & Zhou, X. (2011): **Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: New evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China.** *Quaternary Science Reviews* 30, 3457–3466.
- Liu, J., Wang, B. & Yang, J. (2008): **Forced and internal modes of variability of the East Asian summer monsoon.** *Climate of the Past* 4, 225–233.
- Liu, H. Y., Lin, Z. S., Qi, X. Z., Li, Y. X., Yu, M. T., Yang, H. & Shen, J. (2012): **Possible link between Holocene East Asian monsoon and solar activity obtained from the EMD method.** *Nonlinear Processes in Geophysics* 19, 421–430.
- Makohonienko, M., Kitagawa, H., Fujiki, T., Liu, X., Yasuda, Y. & Yin, H. (2008): **Late Holocene vegetation changes and human impact in the Changbai Mountains area, Northeast China.** *Quaternary International* 184, 94–108.
- Mann, M. E., Cane, M. A., Zebiak, S. E. & Clement, A. (2005): **Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years.** *Journal of Climate* 18, 447–456.
- Mathis, M., Sorrel, P., Klotz, S., Huang, X. & Oberhänsli, H. (2014): **Regional vegetation patterns at lake Son Kul reveal Holocene climatic variability in central Tien Shan (Kyrgyzstan, Central Asia).** *Quaternary Science Reviews* 89, 169–185.
- Menzel, P., Gaye, B., Wiesner, M. G., Prasad, S., Stebich, M., Das, B. K., Anoop, A., Riedel, N. & Basavaiah, N. (2013): **Influence of bottom water anoxia on nitrogen isotopic ratios and amino acid contributions of recent sediments from small eutrophic Lonar Lake, central India.** *Limnology and Oceanography* 58, 1061–1074.
- Mischke, S., Herzsuh, U., Massmann, G. & Zhang, C. (2007): **An ostracod-conductivity transfer-function for Tibetan lakes.** *Journal of Paleolimnology* 38, 509–524.

- Mügler I., Gleixner, G., Günther, F., Mäusbacher, R., Daut, G., Schütt, B., Berking, J., Schwalb, A., Schwark, L., Xu, B., Yao, T., Zhu, L. & Yi, C. (2010): **A multi-proxy approach to reconstruct hydrological changes and Holocene climate development of Nam Co, Central Tibet.** *Journal of Paleolimnology* 43, 625–648.
- Müller, G. (1979): **Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971.** *Umschau* 79, 778-783.
- Neff, U., Burns, S. J., Mangini, A., Muddelsee, M., Fleitmann, D. & Matter, A. (2001): **Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago.** *Nature* 411, 290–293.
- Polanski, S., Fallah, B., Befort, D. J., Prasad, S. & Cubasch, U. (2014): **Regional moisture change over India during the past Millennium: A comparison of multi-proxy reconstructions and climate model simulations.** *Global and Planetary Change* 122, 176–185.
- Polissar, P. J. & Freeman, K.H. (2010): **Effects of aridity and vegetation on plant-wax δD in modern lake sediments.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 5785–5797.
- Ponton, C., Giosan, L., Eglinton, T. I., Fuller, D. Q., Johnson, J. E., Kumar, P. & Collett, T. S. (2012): **Holocene aridification of India.** *Geophysical Research Letters* 39, L03704.
- Prasad, S., Anoop, A., Riedel, N., Sarkar, S., Menzel, P., Basavaiah, N., Krishnan, R., Fuller, D., Plessen, B., Gaye, B., Röhl, U., Wilkes, H., Sachse, D., Sawant, R., Wiesner, M. & Stebich, M. (2014): **Prolonged monsoon droughts and links to Indo-Pacific warm pool: A Holocene record from LonarLake, central India.** *Earth and Planetary Science Letters* 391, 171–182.
- Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison S. P., Leemans, R., Monserud, R. A. & Solomon, A. M. (1992): **A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate.** *Journal of Biogeography* 19, 117–134
- Rach, O., Brauer, A., Wilkes, H. & Sachse, D. (2014): **Delayed hydrological response to Greenland cooling at the onset of the Younger Dryas in western Europe.** *Nature Geoscience* 7, 109–112.
- Ran, M. & Feng, Z. (2013): **Holocene moisture variations across China and driving mechanisms: A synthesis of climate records.** *Quaternary International* 313–314, 179–193.
- Rehfeld, K., Marwan, N., Breitenbach, S. F. M. & Kurths, J. (2013): **Late Holocene Asian summer monsoon dynamics from small but complex networks of paleoclimate data.** *Climate Dynamics* 41, 3–19.
- Ricketts, R. D., Johnson, T. C., Brown, E. T. Rasmussen, K. A. & Romanovsky, V. V. (2001): **The Holocene paleolimnology of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan: Trace element and stable isotope composition of ostracodes.** *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 176, 207–227.

- Roth, S. & Reijmer, J. J. G. (2005): **Holocene millennial to centennial carbonate cyclicality recorded in slope sediments of the Great Bahama Bank and its climatic implications.** *Sedimentology* 52, 161–181.
- Sachse, D., Radke, J. & Gleixner, G. (2004): **Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary n-alkanes record modern climate variability.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 4877–4889.
- Sachse, D., Radke, J. & Gleixner, G. (2006): **δD values of individual n-alkanes from terrestrial plants along a climatic gradient – Implications for the sedimentary biomarker record.** *Organic Geochemistry* 37, 469–483.
- Sanwal, J., Kotlia, B. S., Rajendran, C., Ahmad, S. M., Rajendran, K. & Sandiford, M. (2013): **Climatic variability in Central Indian Himalaya during the last ~1800 years: Evidence from a high resolution speleothem record.** *Quaternary International* 304, 183–192.
- Sarkar, S., Wilkes, H., Prasad, S., Brauer, A., Riedel, N., Stebich, M., Basavaiah, N. & Sachse, D. (2014): **Spatial heterogeneity in lipid biomarker distributions in the catchment and sediments of a crater lake in central India.** *Organic Geochemistry* 66, 125–136
- Schettler, G., Liu, Q., Mingram, J., Stebich, M. & Dulski, P. (2006): **East-Asian monsoon variability between 15 000 and 2 000 cal. yr BP recorded in varved sediments of Lake Sihailongwan (northeastern China, Long Gang volcanic field).** *The Holocene* 16, 143–157.
- Schollän, K., Heinrich, I. & Helle, G. (2014): **UV-laser-based microscopic dissection of tree rings – a novel sampling tool for $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ studies.** *New Phytologist* 201, 1045–1055.
- Schneider, H., Höfer, D., Irmeler, R., Daut, G. & Mäusbacher, R. (2010): **Correlation between climate, man and debris flow events - A palynological approach.** *Geomorphology* 120, 48–55
- Shi, F., Yang, B., Mairesse, A., von Gunten, L., Li, J., Bräuning, A., Yang, F. & Xiao, X. (2013): **Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies.** *Climate Research* 56, 231–244.
- Sidorova, O. V., Siegwolf, R. T. W., Myglan, V. S., Ovchinnikov, D. V., Shishov, V. V., Helle, G., Loader, N. J. & Saurer, M. (2013): **The application of tree-rings and stable isotopes for reconstructions of climate conditions in the Russian Altai.** *Climatic Change* 120, 153–167.
- Sinha, A., Berkelhammer, M., Stott, L., Mudelsee, M., Cheng, H. & Biswas, J. (2011): **The leading mode of Indian Summer Monsoon precipitation variability during the last millennium.** *Geophysical Research Letters* 38, L15703.

- Stebich, M., Mingram, J., Han, J. & Liu, J. (2009): **Late Pleistocene spread of (cool-)temperate forests in Northeast China and climate changes synchronous with the North Atlantic region.** *Global and Planetary Change* 65, 56–70.
- Steppeler, J., Doms, G., Schattler, U., Bitzer, H. W., Gassmann, A., Damrath, U. & Gregoric, G. (2003): **Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM.** *Meteorology and Atmospheric Physics* 82, 75–96.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. (2013): **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge und New York.
- Tarasov, P., Jin, G. Y. & Wanger, M. (2006): **Mid-Holocene environmental and human dynamics in northeastern China reconstructed from pollen and archaeological data.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 241, 284–300.
- Theroux, S., Toney, J., Amaral-Zettler, L. & Huang, Y. (2013): **Production and temperature sensitivity of long chain alkenones in the cultured haptophyte *Pseudoisochrysis paradoxa*.** *Organic Geochemistry* 62, 68–73.
- Toney, J. L., Huang, Y., Fritz, S. C., Baker, P. A., Grimm, E. & Nyren, P. (2010): **Climatic and environmental controls on the occurrence and distributions of long chain alkenones in lakes of the interior United States.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 1563–1578.
- Turekian, K. & Wedepohl, K. (1961): **Distribution of the elements in some major units of the earth's crust.** *Geological Society of America Bulletin* 72, 175–192.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X. & An, Z. (2008): **Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years.** *Nature* 451, 1090–1093.
- Wang, Y., Herzschuh, U., Shumilovskikh, L. S., Mischke, S., Birks, H. J. B., Wischnewski, J., Böhner, J., Schlütz, F., Lehmkuhl, F., Diekmann, B., Wünnemann, B. & Zhang, C. (2014): **Quantitative reconstruction of precipitation changes on the NE Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum – extending the concept of pollen source area to pollen-based climate reconstructions from large lakes.** *Climate of the Past* 10, 21–39.
- Wang, B., Xiang, B. & Lee, J.-Y. (2013): **Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions.** *Proceeding of the National Academy of Sciences* 110, 2718–2722.

- Wrozyna, C., Frenzel, P., Steeb, P., Zhu, L., Mackensen, A. & Schwalb, A. (2010): **Stable isotope and ostracode species assemblage evidence for lake level changes of Nam Co, southern Tibet, during the past 600 years.** *Quaternary International* 212, 2–13.
- Wünnemann, B., Mischke, S. & Chen, F. (2006): **A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234, 223–238.
- Xu, D., Lu, H., Chu, G., Wu, N., Shen, C., Wang, C. & Mao, L. (2014): **500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record.** *Nature Scientific Reports* 4, 3611.
- Xu, Q., Xiao, J., Li, Y., Tian, F. & Nakagawa, T. (2010): **Pollen-based quantitative reconstruction of Holocene climate changes in the Daihai Lake area, Inner Mongolia, China.** *Journal of Climate* 23, 2856–2868.
- Yancheva, G., Nowaczyk, N., Mingram, J., Dulski, P., Schettler, G., Negendank, J. F., Liu, J., Sigman, D. M., Peterson, L. C. & Haug, G. H. (2007): **Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon.** *Nature* 445, 74–77.
- Yuan, F., Sheng, Y., Yao, T., Fan, C., Li, J., Zhao, H. & Lei, Y. (2011): **Evaporative enrichment of oxygen-18 and deuterium in lake waters on the Tibetan Plateau.** *Journal of Paleolimnology* 46, 291–307.
- Zhang, W., Mischke, S., Zhang, C., Gao, D. & Fan, R. (2013): **Ostracod distribution and habitat relationships in the Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau.** *Quaternary International* 313–314, 38–46.
- Zhao, Y. & Yu, Z. (2012): **Vegetation response to Holocene climate change in East Asian monsoon-margin region.** *Earth-Science Reviews* 113, 1–10.
- Zhu, J., Mingram, J. & Brauer, A. (2013): **Early Holocene aeolian dust accumulation in northeast China recorded in varved sediments from Lake Sihailongwan.** *Quaternary International* 290–291, 299–312.
- Adams, J. B., Mann, M. E. & Ammann, C. M. (2003): **Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing.** *Nature* 426, 274–278.

Anhang

Abschlussbericht Verbundprojekt CADY

Tab. A1: Ostrakodenarten in Seen in Kirgistan (r – rezent (in Oberflächenproben bzw. im obersten cm von Kurzkernen), f – fossil (im Kernverlauf)).

Art/See	Sary Chelek	Kyle Kol	Tchatcha Kol	Aram Kol	Akk Kol	Kara Kol	Son Kol	Chatyr Kol
<i>Candona candida</i>		f		f	r		r / f	
<i>Candona neglecta</i>	f		f	f	r		r / f	
<i>Candona weltneri</i>							r / f	
<i>Cypria ophtalmica</i>	f			f				
<i>Cypridopsis cf. vidua</i>				f		f		
<i>Cytherissa lacustris</i>	f		f	f	r / f			
<i>Eucypris afghanistanensis</i>	f	r / f		f	r / f		r	
<i>Eucypris mareotica</i>							f	f
<i>Eucypris sp.</i>							f	
<i>Fabaeformiscandona caudata</i>							r / f	
<i>Fabaeformiscandona cf. danielopoli</i>						f		
<i>Fabaeformiscandona sp.</i>	f					f		
<i>Fabaeformiscandona sp. (fabaeformis?)</i>							r	
<i>Pseudocandona cf. sarsi</i>							f	
<i>Pseudocandona sp.</i>				f				
<i>Ilyocypris bradyi</i>							r / f	
<i>Ilyocypris sp.</i>			f		r / f			
<i>Limnocythere inopinata</i>							r / f	r / f
<i>Limnocythere sp.</i>						f		
<i>Prolimnocythere?</i>								f
juvenil unbestimmt				f				

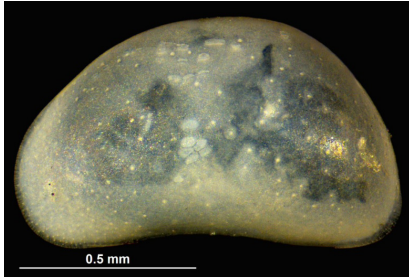
Tab. A2: Rezente Ostrakodenfauna in Kurzkernen / Oberflächensedimenten aus dem Son Kol (SONK) und Chatyr Kol (CHAK).

Probe	Wassertiefe (m)	Kern-Tiefe (cm)	<i>Candona neglecta</i>	<i>Candona candida</i>	<i>Candona weltneri</i>	<i>Limnocythere inopinata</i>	<i>Ilyocypris bradyi</i>	<i>Fabaeformiscandona caudata</i>	<i>Eucypris afghanistanensis</i>	<i>Fabaeformiscandona</i> sp. (<i>fabaeformis</i> ?)
SONK_12_SC2		0-1	×	×	×	×	×	×		
SONK_12_SC1		0-1	×	×	×	×	×	×		
SONK_11_F1	12,3	0-1	×	×	×	×				
SONK_11_F2	12,3	0-1	×	×	×	×	×			
SONK_11_E1	11,6	0-1	×	×	×	×	×	×		
SONK_12_RS1		0-2	×	×	×	×	×	×	×	×
SONK_11_C1	3,8	0-1	×	×	×	×	×			
SONK_11_C2	2,9	0-1	×	×	×	×			×	
SONK_11_C3	6,9	0-1	×	×	×	×				
SONK_11_C4	5,3	0-1	×	×	×	×				
CHAK_12_S1	16	0,5				×				
CHAK_12_S1	16	1,0				×				
CHAK_12_S4	15,3	0,5				×				
CHAK_12_S4	15,3	1,0				×				

Tab. A3: Autökologie rezenter Ostrakoden in Sedimenten aus Seen in Kirgistan.

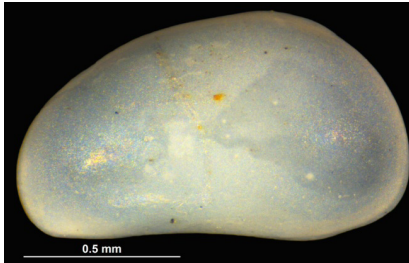
Alle Angaben soweit nicht anders vermerkt:

- Meisch, C. (2000): **Freshwater Ostracoda of Western and Central Europe**. Spektrum, Heidelberg
- 1 Hartmann, G. & Hiller, D. (1977): **Beitrag zur Kenntnis der Ostracodenfauna des Harzes und seines nördlichen Vorlandes (unter besonderer Berücksichtigung des Männchens von *Candona candida*)**. *125 Jahre Naturwissenschaftlicher Verein Goslar*, 99–116.
 - 2 Hiller, D. (1971): **Untersuchungen zur Biologie und zur Ökologie limnischer Ostracoden aus der Umgebung von Hamburg**. Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, 175 Seiten.
 - 3 Li, X., Liu, W., Zhang, L. & Sun, Z. (2010): **Distribution of recent ostracod species in the Lake Qinghai area in northwestern China and its ecological significance**. *Ecological Indicators* 10, 880–890.
 - 4 Mischke, S., Bößneck, U., Diekmann, B., Herzsuh, U., Jin, H., Kramer, A., Wünnemann, B. & Zhang, C. (2010): **Quantitative relationship between water-depth and sub-fossil ostracod assemblages in Lake Donggi Cona, Qinhai Province, China**. *Journal of Paleolimnology* 43, 589–608.
 - 5 Zhang, W., Mischke, S., Zhang, C., Gao, D. & Fan, R. (2013): **Ostracod distribution and habitat relationships in the Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau**. *Quaternary International* 313–314, 38–46.
 - 6 Kotlia, B. S., Hinz-Schallreuter, I., Schallreuter, R. & Schwarz, J. (1998): **Evolution of Lamayuru palaeolake in the Trans Himalaya: Palaeoecological implications**. *Eiszeitler und Gegenwart* 48, 177–191.
 - 7 Fuhrmann, R. (2012): **Atlas quartärer und rezenter Ostrakoden Mitteldeutschlands**. Naturkundliches Museum Mauritianum, Altenburg.
 - 8 Yin, Y. & Martens, K. (1997): **On a new species of *Fabaeformiscandona* KRISTIC, 1972 (Crustacea, Ostracoda) from China, with a preliminary checklist of recent Chinese non-marine ostracods**. *Hydrobiologia* 357, 117–128.
 - 9 Nüchterlein, H. (1969): **Süßwassostracoden aus Franken. Ein Beitrag zur Systematik und Ökologie der Ostracoden**. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 54, 223–287.

***Candona candida* (O.F. Müller, 1776)**

linke Klappe, Weibchen, Länge 1,08 mm

- besiedelt ein breites Spektrum aquatischer Lebensräume
- litorale (besonders in Seen) bis profundale Zone
- Seen, (Fisch-)Teiche, Gräben, Sümpfe, torfige Gewässer mit sauren Bedingungen, Bäche, Flüsse, Quellen, Brunnen, unterirdischer Lebensräume, leicht salzige Binnen- und Küstengewässer mit Salzgehalten <6 g/l
- bevorzugt Frischwasser bis leicht oligohalines Wasser⁵, sowie permanente Gewässer, kommt aber auch in temporären vor
- Dauerform bei Temp. <18°C¹
- rheoeuryplastisch
- euryplastisch den pH-Wert betreffend
- titanoeuryplastisch²
- oligothermophil¹
- oligohalophil

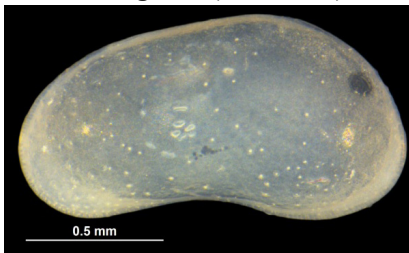
***Candona weltneri* (Hartwig, 1899)**

linke Klappe, Männchen, Länge 1,24 mm



linke Klappe, Weibchen, Länge 1,17 mm

- Seen, Teiche, Sümpfe, (torfige)Tümpel
- permanente bis kleine temporäre Wasserkörper
- bevorzugt litorale Zone aber auch im Profundal
- kaltstenotherm²
- oligorheophil²
- titanoeuryplastisch²
- oligohalophil²

***Candona neglecta* (Sars, 1887)**

linke Klappe, Männchen, Länge 1,4 mm

- weit verbreitet in Quellen, Teichen, Bächen mit Quellenbindung
- in Seen in der flachen litoralen Zone bis hin zu großen Tiefen
- auch in kleinen Wasserkörpern (Teiche, Tümpel, Bäche), Grundwasser (Interstitial und Brunnen)
- auch in temporären Gewässern (alle Stadien resistent gegen Austrocknung)
- bevorzugt relativ kaltes Wasser, toleriert vorübergehende Temperaturen über 20°C
- toleriert hypoxische Bedingungen im Sommer (O₂-gehalt <3 mg/l)
- leicht salzige Inlands- und Küstengewässer (Salzgehalt 0,5-16 g/l), leichtes Brackwasser
- oligothermophil
- mesorheophil
- titanoeuryplastisch¹
- euryplastisch den pH-Wert betreffend²
- mesohalophil, eventuell polyhalophil

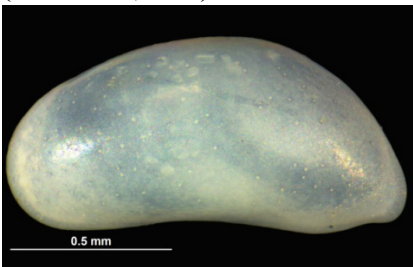
***Fabaeformiscandona* sp.(?*fabaeformis*)
(Fischer, 1851)**



linke Klappe, Länge 1,17 mm

- bevorzugt schlammige und temporäre kleine Wasserkörper
- in Seen in der sommerlich austrocknenden flachen Zone, manchmal im tiefen Bereich der litoralen Zone
- maximal nachgewiesene Tiefe: 3m
- auch in Entwässerungsgräben, (Fisch-)Teichen, temporären Wasserlöchern im Freiland, Bächen
- toleriert einen leichten Anstieg im Salzgehalt
- mesothermophil²
- oligorheophil²
- titanoeuryplastisch²
- mesohalophil²
- euryplastisch den pH betreffend²

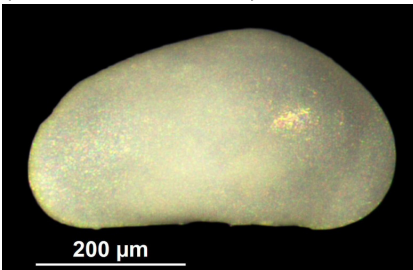
***Fabaeformiscandona caudata*
(Kaufmann, 1900)**



linke Klappe, Länge 1,21 mm

- charakteristisch für sublitorale und profundale Zone bis zu großen Tiefen von Seen
- selten in der litoralen Zone
- auch (Fisch-)Teiche, Bäche, Interstitial
- oligothermophil
- rheotolerant⁹
- oligohalophil⁹

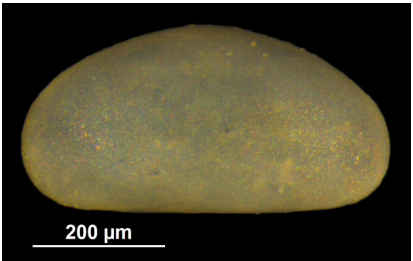
***Fabaeformiscandona* cf *danielopoli*
(Yin & Martens, 1997)**



linke Klappe, juvenil, Länge 0,48 mm

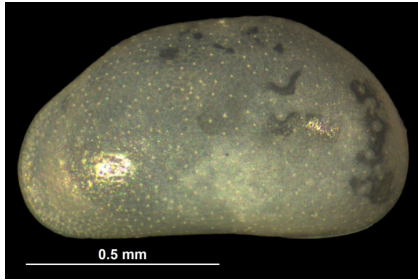
- wahrscheinlich rheophil⁸

***Fabaeformiscandona* sp. (Krstic, 1972)**



linke Klappe, juvenil, Länge 0,56 mm

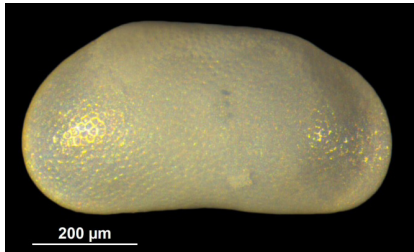
Pseudocandona cf. sarsi
(Hartwig, 1899)



linke Klappe, Länge 1,0 mm

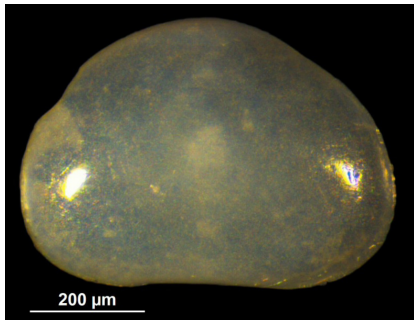
- bevorzugt kleine Wasserkörper, vor allem solche, die im Sommer austrocknen
- Quellen, Brunnen, interstitielles Grundwasser von Strömen
- reine Frischwasserart
- mesothermophil⁹
- rheotolerant⁹
- stygophil

***Pseudocandona* sp. (Kaufmann, 1900)**



rechte Klappe, juvenil, Länge 0,7 mm

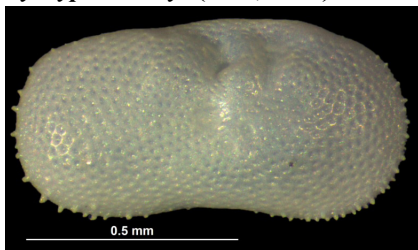
***Cypria ophthalmica* (Jurine, 1820)**



linke Klappe, Länge 0,65 mm

- sehr tolerant gegenüber breitem Spektrum ökologischer Faktoren
- bewohnt fast alle kontinentalen aquatischen Lebensräume, auch stark organisch verschmutzt
- permanente, temporäre, stehende und fließende Gewässer
- gefunden in kleinen und großen Wasserläufen, Quellen, interstitielles Grundwasser, Brunnen, Höhlen
- in Seen vom Litoral bis in große Tiefen der profundalen Zone
- auch in leicht salzigen Küsten- und Inlandgewässer
- max. Salinität 5,8 g/l, max. Cl⁻ Konzentration 13,4 mg/l
- Temperaturoptimum zwischen 2,2–8,4°C
- thermophil
- rheophil
- polytitanophil
- euryplastisch den pH Wert betreffend²
- polyhalophil

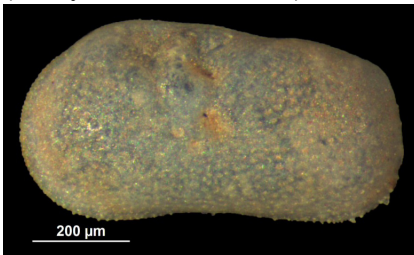
***Ilyocypris bradyi* (Sars, 1890)**



rechte Klappe, Länge 0,92 mm

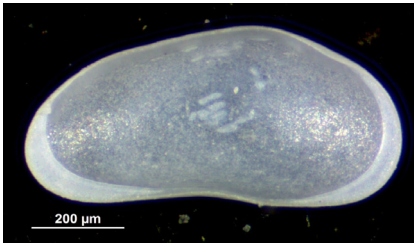
- bevorzugt Quellen, langsame Quellabflüsse und Teiche, die von Quellen gespeist werden, sowie andere langsam fließende Wasserhabitate
- auch in Teichen, eutrophierten Kiesgruben, Flüssen, Sümpfen und Seen (üblicher Weise aus nahen Quellen eingetragen)
- leicht salzige Inlandgewässer bis brackige Küstengewässer
- lebt auf schlammigem und sandigem Substrat
- oligothermophil⁹
- rheoeuryplastisch⁹
- polythermophil
- mesorheophil
- meso- bis polytitanophil

***Ilyocypris* sp.
(Brady & Normann, 1889)**



linke Klappe, juvenil, Länge 0,78 mm

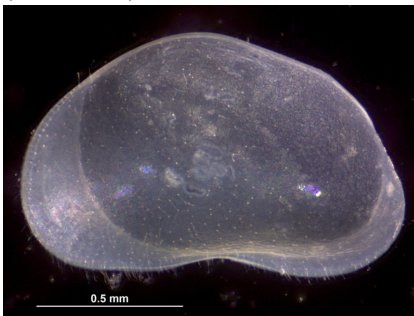
***Eucypris afghanistanensis*
(Hartmann, 1964)**



linke Klappe, Innenansicht, Länge 1,0 mm

- Vorkommen in kalten Quellen und Flüssen⁶, in Kunlun Mountains ausschließlich in Seen nachgewiesen⁵
- bevorzugt Frischwasser bis leicht oligohalines Wasser⁵
- Tiefenoptimum bei 11,9 m, zeigte hohes Vorkommen in flachen Bereichen bis 25 m Tiefe (Lake Donggi Cona)⁴
- Präferenz für niedrige Leitfähigkeiten (0,6-0,9 mS cm⁻¹) (Kunlun Mountains)⁵
- kaltstenothermal⁶

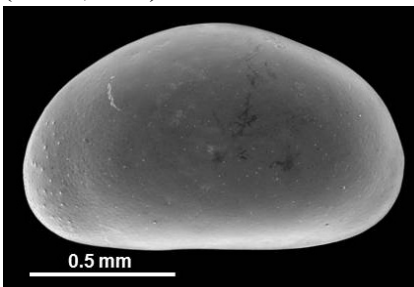
***Eucypris mareotica* (Fischer, 1855),
jüngeres Synonym *Eucypris inflata*
(Sars, 1903)**



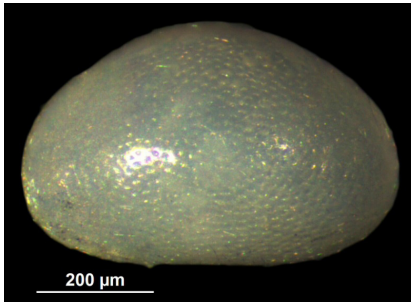
linke Klappe, Länge 1,27 mm

- tolerant gegenüber Salzgehalt, Temperatur und ionischer Zusammensetzung³
- üblicher Bewohner saliner Gewässer von Nord-Afrika und Zentralasien³
- stark assoziiert mit Natriumchlorid haltigem Wasser¹
- typische Spezies für brackiges und salines Wasser⁵
- toleriert Salzgehalte von 12,9 g/l bis 80,9 g/l (auch bis 325 g/l gefunden)³
- maximales Vorkommen bei Salzgehalten zwischen 7,9 g/l und 27,88 g/l³
- eurythermisch (toleriert Temperaturen zwischen 2°C und 30°C)³
- polyhalophil⁷
- kann möglicherweise nicht in Frischwasser oder fließendem Wasser leben³

***Eucypris* sp.
(Vavra, 1891)**



linke Klappe, REM-Aufnahme

***Cypridopsis cf vidua* (O.F. Müller, 1776)**

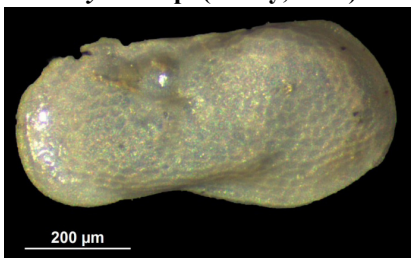
linke Klappe, Länge 0,64 mm

- breites Spektrum aquatischer Habitate
- bevorzugt große und kleine permanente Wasserkörper mit reicher Vegetation, wie (Fisch-)Teiche, litorale Zone von Seen und langsame Flüsse
- auch in temporären Teichen, Quellen, Brunnen, Interstitial
- bevorzugt schattige Bereiche mit viel Vegetation
- leichter Anstieg im Salzgehalt wird toleriert (max. 8 g/l)
- geringe Toleranz für sauerstoffarmes Wasser
- polythermophil
- mesothermophil
- titanoeuryplastisch²
- phytophil
- oligohalophil

***Limnocythere inopinata* (Baird, 1843)**

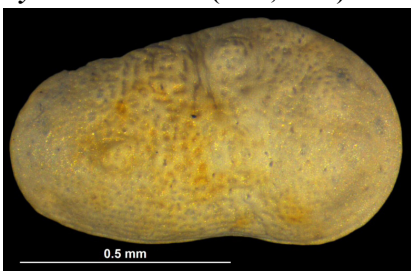
rechte Klappe, Weibchen, Länge 0,51 mm

- weite ökologischer Spanne
- kleine und große Wasserkörper
- (Fisch-)Teiche, Sümpfe, Gräben, Seen, langsame Bäche, Flüsse, Reisfelder
- schlammige und sandige Substrate
- leicht salzige Inland- und Küstengewässer
- litorale Zone bis 6 m, selten profundale Zone
- toleriert hohe alkalische Bedingungen (Chlorid Konzentrationen bis zu 2160 mg/l), aber nicht natrophil sondern euryhalin
- hohe Individuen Dichte in ruhigen Wasserbereichen, mit verstärkter Sedimentation und hohem Detritusgehalt; Abnahme der Dichte auf festem Schlamm und/oder Sand, sowie unruhigem Wasser
- toleriert hohe Chlorid-Werte³
- gefunden in mit Na^+ - HCO_3^- - CO_3^{2-} aber wenig Ca^{2+} angereicherterem Wasser³
- zwischen 3 und 9 % Salzgehalt höchste Individuendichte³
- polythermophil¹
- titanoeuryplastisch (häufiges Auftreten in Ca-armen Gewässern)¹
- rheoeuryplastisch
- mesohalophil

***Limnocythere* sp. (Brady, 1867)**

linke Klappe, Männchen, Länge 0,72 mm

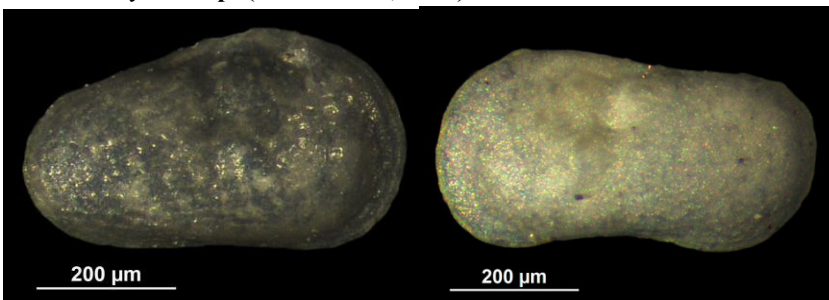
***Cyterissa lacustris* (Sars, 1863)**



- weit verbreitet in sublitoraler und profundalen Zone von kalten tiefen Seen
- gefunden in Tiefen von 3 m bis 200 m (Bodensee)
- eurythermal, mit Vorliebe für kaltes Wasser
- verschwindet schnell mit einsetzender Eutrophierung

rechte Klappe, Weibchen, Länge 0,93 mm

?*Prolimnocythere* sp. (Karmishina, 1970)



rechte Klappe, Weibchen, Länge 0,54 mm; linke Klappe, Männchen, Länge 0,59 mm

unbestimmte juvenile Klappen

