

DEKLIM Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Max-Planck-Institut für Biogeochemie

Titel: Past Climate Sensitivity and Variability

Förderkennzeichen: 01 LD 0043

Gesamtlaufzeit: 01.09.2001 – 31.08.2004

S.P. Harrison^{1,2}, R. Schneider³, D. Barboni^{1,4}, G. Bönisch¹, K. Cohen^{1,5}, R. Downey², M. Jung¹, R.B. Kayastha¹, B. Mark¹, A. Song¹, A. Spessa¹, J. Wohlfahrt¹, Y. Lui¹, Y. Li¹

1: Max Planck Institut für Biogeochemie, Jena,

2: School of Geographical Science, University of Bristol, Bristol B S8 1SS, U.K.,

3: 7B5 Geowissenschaften, Universität Bremen, Bremen,

4: CEREGE, UMR6635, BP80, 13545 Aix-en-Provence, Cedex 4, France,

5: Department of Geography, University of Cambridge, Cambridge CB2 3EN, U.K.,

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt konzentrierte sich auf die Rekonstruktionen vergangener und somit von heute abweichender globaler klimatischer Bedingungen. Der Hintergrund zu dieser Fragestellung war eine Verbesserung der Einschätzung von langfristigen Klimaprognosen. Durch die Entwicklung von immer komplexeren Klimamodellen einerseits, und der Synthese umfassender Beobachtungsdaten andererseits, wurden Computersimulationen und Rekonstruktionen der jüngeren geologischen Vergangenheit miteinander vergleichbar. Vor allem die Untersuchungen der Wechselwirkungen und der Variabilität innerhalb des Systems Erde werden weitere Forschungen bezüglich klimarelevanter Parameter unterstützen.

Der Projektfokus lag auf dem zeitlichen Abschnitt des letzten glazialen Maximums (LGM; 21 ka), sowie auf dem folgenden Interglazial des frühen (11 ka) und mittleren (6 ka) Holozän. Während des LGM herrschte ein völlig anderes globales Klimasystem mit deutlich geringeren Konzentrationen an Treibhausgasen und hohen Anteilen an Aerosolen, deutlich tieferen Meeresspiegel, anderen Strömungen, anderen Vegetationsverteilungen und großen flächigen Eisschilden. Die Zeit des frühen Holozäns ist eine Übergangsphase aus diesen glazialen Bedingungen in ein neues interglaziales Klimasystem, welches im mittleren Holozän mit veränderter solarer Einstrahlungsintensität und Saisonalität das so genannte Klimaoptimum erreicht und sich stabilisiert.

Durch diese speziellen Unterschiede der Rahmenbedingungen zu heute lassen sich 1. die Klimasensitivität durch Veränderung orbitaler Parameter besonders für die Tropen und die höheren Breiten validieren, 2. die Klimavariabilität zwischen jährlichen und dekadischen Schwankungen wie ENSO, NAO und tropischen Monsun im Bezug auf das allgemeine mittlere Klima analysieren, und 3. die Stärke und Auswirkungen von Rückkopplungseffekten zwischen der Landoberfläche und dem Ozean-Atmosphärensystem sowohl auf das mittlere Klima als auch auf die Variabilität bestimmen.

2. Voraussetzungen

Die bereits im Aufbau und zum Teil schon bestehenden, vor allem globalen Datensätze aus dem Palaeovegetation Mapping Project (BIOME6000: Prentice and Webb, 1998), der LGM Tropical Terrestrial Data Synthesis (Farrera et al., 1999) und die Global Lake Status Data Base (GLSDB: Kohfeld and Harrison, 2000) mit Relevanz für die ausgewählten Zeitscheiben dieses Projektes waren ein bedeutendes Startkapital. Hinzu kamen die optimalen logistischen und personellen Möglichkeiten am Institut für Biogeochemie Jena, die mit Kerstin Sickel als Programmiererin, Silvana Schott als technisch-graphische Redakteurin, Natalia Ungelenk als Bibliotheksassistentin und Gerhard Boenisch als Datenbankmanager unter der Leitung von Sandy Harrison vor Ort gegeben waren. Durch Sandy Harrison bestand ein Netzwerk von zahlreich wichtigen Kontakten zu nationalen und internationalen Arbeitsgruppen. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Ralph Schneider aus Bremen (MARGO) sowie den PMIP und MOTIF Teilnehmern. Zum Schluss muss noch die Verbindungen mit dem MPI für Meteorologie in Hamburg und dem Deutschen

Klimarechenzentrum genannt werden, über die ein Zugriff auf außerordentliche Rechnerleistungen und -Zeiten gewährleistet war.

3. Planung und Ablauf

Die Schwerpunkte der Arbeiten lagen 1. bei der Zusammenstellung und dem Aufbau von Beobachtungsdaten und der Harmonisierung der verschiedenen Messreihen; 2. der Konzeption, dem Design und der Auswertung der Modellsimulationen, und 3. schließlich als Synthese von Daten und Simulationen die Evaluation der Ergebnisse und Vertiefung spezieller daraus entstandener Fragen.

Begonnen wurde mit dem Aufbau und der Zusammenstellung vorhandener Beobachtungsdatensätze.

Für den Aufbau der Vegetationsdaten wurden die bereits bestehenden Datensätze aus den Projekten BIOME6000 und LGM TROPICS übernommen und mit neu veröffentlichten Pollendaten ergänzt. Dabei wurde unter anderem auf die öffentlichen Datenbanken der European Pollen Data Base, North American Pollen Data Base, Latin American Pollen Data Base, African Pollen Data Base, Russian Pollen Data Base, Chinese Pollen Data Base und der SE Pacific Pollen Data Base zurückgegriffen.

Der Aufbau der Projektdatensätze gliederte sich in drei Zeitscheiben (LGM, frühes Holozän und mittleres Holozän). Zusätzlich wurde eine globale Standardisierung von Pflanzentaxa zu Pflanzen-Funktions-Typen (plant functional types), sowie Pflanzen-Funktions-Typen zu Biomschemata durchgeführt (Prentice et al., 1992). Diese Harmonisierung ermöglichte eine einheitliche Klassifizierung weltweiter Vegetationstypen und bot damit einen Vergleichmodus zu Modellsimulationen. Durch so genannte Vorwärtsmodellierung wird das Vegetationsmodell BIOME4 (Kaplan et al., 2003) asynchron mit den Ergebnissen der Paläoklimasimulation gekoppelt. Es werden potentielle natürliche Vegetationstypen (Biome) modelliert, die sich wiederum aufgrund der definierten PFTs mit den Pollenproxydaten vergleichen lassen.

Die Vegetationsrekonstruktionen erlaubten eine Abschätzung der räumlichen Veränderung der Biomegrenzen wie z.B. die boreale Baumgrenze, und ergaben somit Aussagen über klimatische Bedingungen wie Temperatur und Niederschlag (Farrera et al., 1999).

Die ozeanographischen Daten stützten sich auf Paläoindikatoren für Ozeantemperatur, Oberflächenstratifikation, Tiefseezirkulation und den Kohlenstoffkreislauf (z.B. Fischer und Wefer, 1999) bezüglich der drei Zeitscheiben. Schwerpunktmäßig wurden planktonische Foraminiferen, stabile Isotope, Zusammensetzungen von Spurenelementen und Alkenonesättigungsraten zur Bestimmung von Ozeanoberflächentemperatur (SST) und Salinität (SSS) ausgewertet. Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope sowie Cadmium/Kalziumraten gaben Aufschluss über Tiefenwasserzirkulationen und den Kohlenstoffkreislauf. Auch hier wurden die unterschiedlichen Proxydaten zunächst harmonisiert und standardisiert, womit zeitrelevante Aussagen mit Modellsimulationen kombiniert werden konnten.

Die in diesem Projekt völlig neue Zusammenstellung von Schneefallgrenzdaten (snowline) zielte speziell auf die Analysen über das LGM. Auf Grund unterschiedlicher Feldmethoden bei der Datenerhebung wurden diese im Vorfeld evaluiert um die Rekonstruktionen der Schneegrenzen mit potentiellen Fehlern zu bestimmen.

All diese Daten wurden in der integrierten Datenbank ACCESS zusammengefasst und mit Ende dieses Projekts veröffentlicht.

Komplementär zur Aufarbeitung der Datensätze begannen die paläoklimatischen Modellsimulationen. Neben der Kontrollsimulation unter präindustriellen Bedingungen für 0 ka wurden Paläoklimasimulationen für 6 ka, 11 ka und LGM durchgeführt. Diese Simulationen wurden zunächst mit dem FOAM OAGCM Modell (fast-ocean-atmosphere-model) mit Standardkonfiguration durchgeführt. Anschließend folgten eine Berechnung mit FOAM-LPJ, was einem OAGCM mit gekoppelter dynamischer Vegetation entspricht, und schließlich eine Variante mit integriertem Staubkreislauf, dem FOAM-LPJ-DUST-Modell. Letzt genannte Kombination wurde nur für Kontroll- und LGM-Simulationen durchgeführt. Diese speziellen Kombinationen von Simulationsläufen dienten der genaueren Abschätzung von Vegetationsrückkopplungen und Staubeffekten. Alle Simulationen wurden nach den jeweiligen solaren Einstrahlungsparametern nach Berger (1978) spezifiziert. Die atmosphärischen Gaskompositionen wurden entsprechend der Eisbohrkerndaten bestimmt (Barnola et al., 1987; Raynaud et al., 1993; Chappelaz et al., 1997; Petit et al., 1999; Raynaud et al., 2000). Aufgrund der besonderen Umstände der Land-Ozean-Geographie und der speziellen Verteilung der Eismassen für das LGM wurden diese Experimente erst zu einem späteren Zeitpunkt, nach entsprechender Implementierung und Sensitivitätsanalysen, durchgeführt. Jede Simulation lief über ein Minimum von 150 Jahren. Die präindustrielle

FOAM OAGCM-Simulation startete von einem vorausgegangenen Kontrolllauf und alle weiteren 6 ka- und 11 ka-Simulationen starteten wiederum vom Jahr 120 aus diesem präindustriellen Simulationslauf um Spin-up-Probleme zu minimieren.

Als Synthese der vorausgegangenen Arbeitsschritte folgten die Modellanalysen und Evaluationen. Die gesammelten Paläodaten wurden nun benutzt um die Qualität der Modellsimulationen zu überprüfen. Schwerpunktmäßig wurde die Klimasensitivität in den tropischen und boreal/polaren Regionen, Rückkopplungseffekte für das Holozän und LGM und Klimavariabilitätsschwankungen analysiert.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Klimasensitivität

Die Sensitivität des Klimas gegenüber dem geringeren CO₂ (Minimum ca. 185 ppmv) zur Zeit des letzten glaziale Maximums (LGM) ist eine fundamentale und weitgehend ungelöste Frage. Während CLIMAP (1981) für die Tropen für das LGM eine Abkühlung von 1.5°C annahm, deuteten die wenigen terrestrischen Untersuchungen in höheren Breiten, die bis Mitte der '80er Jahre vorlagen, auf einen deutlich höheren Temperaturabfall hin (Rind und Peteet, 1985). Spätere Arbeiten konnten die vielfältigen Einflüsse der solaren Einstrahlungsbedingungen während des LGM besser einschätzen und die atmosphärischen Konzentrationen der strahlungsreaktiven Gase konnten aus Eisbohrkernen ermittelt werden (Barnola et al., 1987; Raynaud et al., 1993; Chappellaz et al., 1997; Petit et al., 1999; Raynaud et al., 2000). Hinzu kamen große Fortschritte und Verbesserungen bei der Modellierung; speziell der Einfluss von Aerosolen (besonders mineralischer Staub) auf die Einstrahlungsbilanz (Tegen et al., 1996; Claquin et al. 1999; Sokolik und Toon, 1999) wurde besser verstanden.

Zahlreiche Durchbrüche in der Interpretation und der Synthese von marinen und terrestrischen Paläodaten sowie die Entwicklung neuer geotechnischer Techniken wie z.B. Messungen von Alkenonenratios zur Rekonstruktion von Ozeanoberflächentemperaturen (Rostek et al., 1993; Schneider et al., 1995; Bard et al., 1997; Rosell-Melé et al., 1998; Sonzogni et al., 1998; TEMPUS website: <http://nrg.ncl.uk:8080/CLIMATE/Tempus.html>) folgten. Anschließende Rekonstruktionen der Ozeanoberflächentemperatur ergaben eine Verminderung von ca. 3°C für den Bereich der Tropen verglichen mit heute und zum Teil signifikanten regionalen

Abweichungen (z.B. Guildson et al., 1994; Ohkouchi et al., 1994; Prah1 et al., 1995; Zhao et al., 1995; Chapman et al., 1996 Bard et al., 1997; Mix et al., 1999; Chapman et al., 2000). Multiproxyrekonstruktionen von Vegetationsgesellschaften, Isotopenmessungen und Edelgaspaläothermometrie ergaben eine verbesserte Datengrundlage für die Landoberfläche in den Tropen (Ferrara et al., 1999). Diese Rekonstruktionen zeigten regional verschiedene, jedoch übereinstimmende Muster der Temperaturveränderungen innerhalb der Tropen. In den flachen neotropischen Bereichen für das zentrale und nördliche Südamerika ergab sich eine Abkühlung von 5-6°C; um den Indischen Ozean (Süd- und Ostafrika, Indien und Indonesien) um etwa 2-3°C und weniger als 2°C in den Pazifischen Regionen (Papua Neuguinea und westpazifische Inseln).

Die Unklarheiten möglicher klimatischer Auswirkungen von sehr hohen Konzentrationen mineralischer Aerosole (Staub) in der Atmosphäre während des LGM sah man vor allem im Zusammenhang mit den großen kontinentalen Eisdecken und der Beeinflussung des Albedowertes von Landoberflächen (Petit et al., 1981; Hammer et al., 1985; Rea, 1994 Overpeck et al., 1996; Steffenson, 1997). Neuere Untersuchungen mit Vergleichen von Eisbohrkernen und Aufzeichnungen aus mariner Staubablagerungen (Mahowald et al., 1999; Kohfeld und Harrison, 2000) zeigten allerdings relativ erhöhte Staubaufkommen in den tropischen Bereichen im Vergleich zu hohen nördlichen Breiten. Berechnungen der Strahlungsbilanz, die atmosphärischen Staub, Oberflächenalbedo und die Staubmineralogie berücksichtigen, ergeben eine Verminderung der Energie von ca. 3 W/m für den Bereich der Tropen (Claquin et al., 2000).

Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems

Sensitivitätsexperimente haben gezeigt, dass der Einfluss von Rückkopplungen ausgehend von der Landoberfläche sowohl in den hohen nördlichen Breiten (Foley et al., 1994; TEMPO, 1996) als auch in den monsundominierten tropischen Bereichen (Street-Perrott et al., 1990; Kutzbach et al., 1996; Broström et al., 1998; Texier et al., 2000) während des mittleren Holozän potentiell sehr groß sein kann. Die unmittelbare Rolle der Landoberflächenrückkopplungen auf das Klima von Nordafrika im mittleren Holozän wurde intensiv durch Modellexperimente mit gekoppelten Atmosphäre-Vegetationsmodellen untersucht (Texier et al., 1997; Claussen und Gayler, 1997; Ganopolski et al., 1998a; Pollard et al., 1998; Braconnot et al., 1999; de Noblet et al., 2000; Doherty et al., 2000; Kutzbach et al., 2001). Rückkopplungen durch die Vegetation verstärken die Intensivität des Monsuns.

Und obwohl die Zunahme des absoluten Maximums gering ist, ist sie vergleichbar mit dem Einfluss, der auf die solare Einstrahlung zurückzuführen ist. Die Vegetationsrückkopplungen beeinflussen vielmehr die Gesamtniederschlagsmenge und führen zu einer zeitlichen Verlängerung der Niederschlagsereignisse. Dies ist speziell auf die Veränderungen der Albedo durch die Präsenz von Vegetation und dadurch verursachte Erwärmung über dem Kontinent zurückzuführen. Da somit der Kontrast zwischen Ozean und Land die küstennahe Advektion im Frühling und Frühsommer forciert kommt es zu einem 1-2 Monate früheren Beginn des Monsuns, als dies allein durch solare Einstrahlung zu erklären wäre. Ebenso wird der Monsun bis in den Herbst hinein verlängert. Dies reflektiert eine allgemein höhere Feuchte, da die Advektion im Herbst nur noch sehr schwach ausgeprägt ist. Generell scheinen Rückkopplungen im Zusammenhang mit Seen und Feuchtgebieten geringeren Einfluss zu haben als dies über großräumige Vegetationsveränderungen der Fall sein kann, da hierbei besonders der lokale Wasserkreislauf signifikant verstärkt wird (Coe und Bonan, 1997; Broström et al., 1998). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Interaktionen zwischen Atmosphäre und Ozean durch Veränderung von Meeresströmungen ebenfalls die Dauer des Monsuns im Holozän verlängert (Kutzbach und Liu, 1997; Hewitt und Mitchell, 1998; Liu et al., 1999; Otto-Bliesner, 1999; Braconnot et al., 2000; Liu et al., 2001). Gerade die intensive Arbeit der Modellierer an den Fragestellungen der 6 ka Zeitscheibe führten zu der Überzeugung, dass, um eine erfolgreiche Rekonstruktion von Paläoklimata zu erreichen, sowohl ozeanischen Zirkulationen als auch Vegetationsänderungen mit ihren Auswirkungen auf die Atmosphäre miteinbezogen werden müssen.

Es gab nur vergleichsweise wenige Untersuchungen hinsichtlich der Bedeutung von Rückkopplungen für das Klima während des LGM. Levis et al. (1999) konnte zeigen, dass Vegetationsrückkopplungen ausgehend von einer Reduktion des tropischen Regenwaldes zu einem Temperaturrückgang von mehreren °C innerhalb der Tropen führt. Der Niederschlag in den feuchten Tropen und in Ostasien verringerte sich deutlich, und dieses Ergebnis stimmte mit dem beschriebenen Rückgang von feuchtigkeitsgebundener Vegetation in den Tropen (Farrera et al., 1999) und der Verdrängung der Wälder durch Steppen- und Wüstenvegetation in China (Yu et al., 2000) überein. Die Simulation Levis stammt von einem Atmosphären-Vegetations-mixed-layer-Ocean-Modell.

5. Zusammenarbeit

Das Projekt kooperierte mit dem internationalen Palaeoclimate Intercomparison Project (PMIP) und dem europäischen Partnerprogramm Models and Observations to Test climate Feedbacks (MOTIF) welche die Güte und Leistungen von gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Vegetation-General-Zirkulationsmodellen (OAVGCMs) unter grundlegend veränderten klimatischen Bedingungen während der letzten Glazial-Interglazialphase mit Feldbeobachtungen und Paläodaten vergleichen und auswerten (Harrison et al., 2002). PMIP wird von dem World Climate Research Programme (WCRP) und dem International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) gefördert. MOTIF ist ein EU-Finanziertes Projekt (EVK2-2001-00263) innerhalb des 5. Rahmenforschungsprogramms (Energy, Environment and Sustainable Development). Die in diesem DEKLIM Projekt erarbeiteten Synthesen von marinen und terrestrischen Paläodaten dienen als Bewertungskriterium für die PMIP-Modellsimulationen und gehen somit auch in die nächste Auswertungsphase des kommenden Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Bericht ein.

Bei der Implementierung und Korrekturen der Eismaske in das verwendete FOAM-Modell half W.R Peltier vom Department of Physics in the University of Toronto, Canada.

II. Eingehender Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

Datensynthese

Die Pollendatensätze für die Zeitscheiben des mittleren Holozän und des LGM wurden unter Verwendung der Biomisationstechnik bis zum Ende des Projektes stetig ergänzt. Diese Technik basiert auf eigene Analysen von Pflanzenfunktionsmerkmalen (plant functional traits) zur Definition von Pflanzenfunktionstypen (PFT) (Barboni et al., 2004; Harrison et al., in press). Insbesondere die Biome6000 Daten wurden durch regionale Biomisationstudien für den Bereich außerhalb der Tropen (Bigelow et al., 2003), für Australien (Pickett et al., 2004), für China (Ni et al., in press), für Indien (Sutra et al., in prep.) und Südamerika (Marchant et al., in prep.) deutlich ausgeweitet. Ein weiterer wichtiger Pollendatensatz, CIMBIO, speziell für den zirkum-mediterranen Raum ist aufgebaut worden und die verschiedenen Chronologien sind nun harmonisiert (D. Barboni, M. Jung, G. Boenisch). Dieser Datensatz repräsentiert einen bisher spärlich abgedeckten Bereich innerhalb der globalen Biomkarte (Abb. 1). Etwa 300 radiokarbon-datierte Pollenprofile und 800 rezente Pollenproben beinhaltet CIMBIO, auf deren Grundlage sich die Klimarekonstruktion für das mittlere Holozän von Barboni et al. (in prep.) basiert. Diese Rekonstruktion zeigt, dass die Winter durchschnittlich kälter (-4°C) und feuchter ($\alpha = +13\%$) waren.

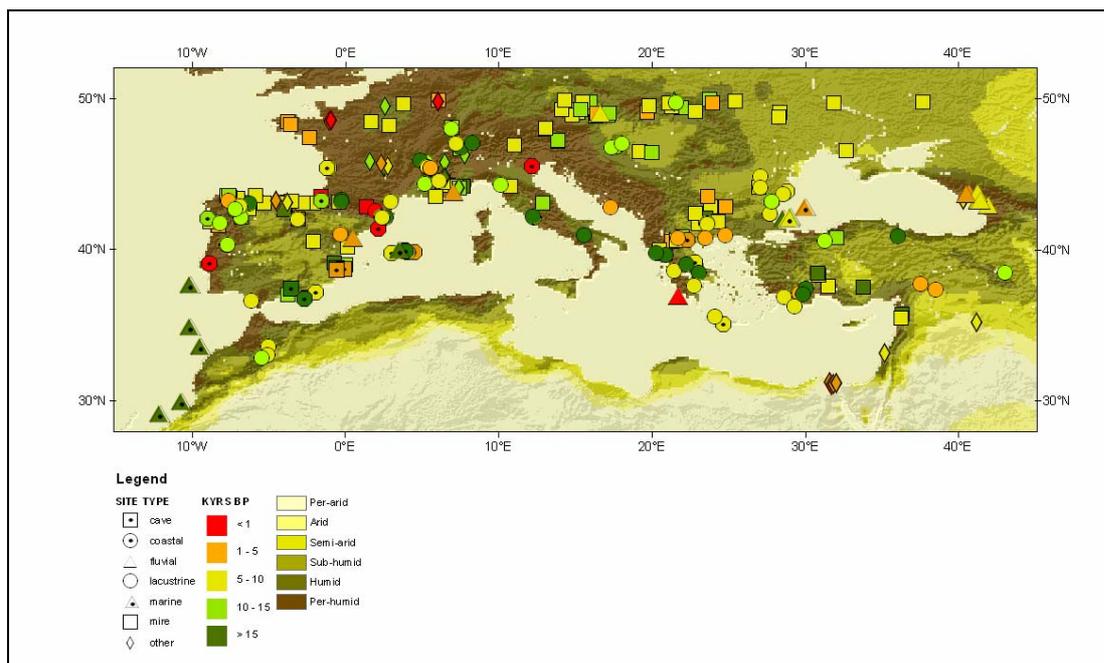


Abb. 1: Verteilung der datierten Pollendaten der CIMBIO Daten. Die Klassifizierung erfolgt nach Art und beprobter Zeitspanne der Pollenarchive und rekonstruierte mediterraner bioklimatischer Zonen (nach M. Jung).

Die Synthese der Schneefallgrenzdaten (snowline) in den Tropen für das LGM ist abgeschlossen und beinhaltet nun mehr als 400 Stellen. Analysen dieser Daten ergaben, dass die Reaktionsstärke der Schneefallgrenze auf Klimaänderungen besonders von der Größe des jeweiligen Einzugsgebietes abhängig ist (Abb. 2; Mark et al., 2005). Etwa 60% der interregionalen Variabilität der beobachteten Schneefallgrenzänderungen können dadurch erklärt werden. Hinzu kommen geophysikalische Aspekte der Gletschertäler, die die lokalen Muster für Einstrahlung und Niederschlagsmenge beeinflussen und sich somit ebenfalls auf die Änderungen der Schneefallgrenze auswirken. Dieser Umstand erschwert eine direkte Ableitung genereller klimatischer Parameter wie Temperaturrekonstruktion vertikale Temperaturgradienten, obwohl regional ermittelten Höhenlagen der Schneefallgrenzschichten mit Abschätzungen von Vegetationsdaten konsistent sind (Mark et al., 2005).

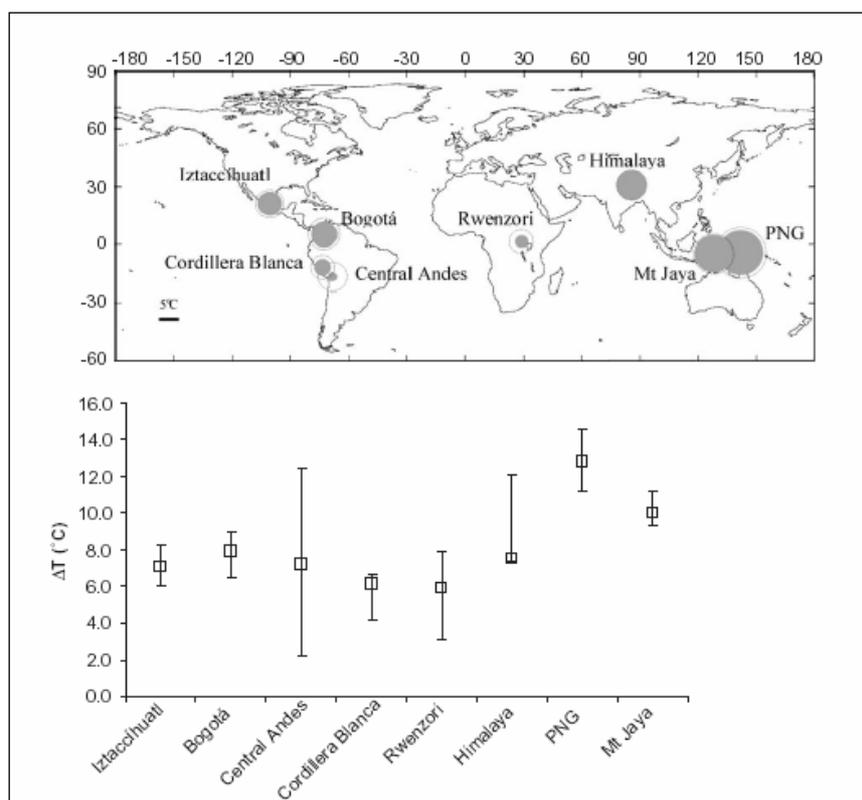


Abb. 2, Oben: Globale Karte tropischer Gletscherregionen mit durchschnittlicher und minimaler Temperaturveränderung (ΔT) zwischen LGM und heute. Jede Region ist mit einem doppelten Kreis dargestellt. Der innere ausgefüllte Kreis repräsentiert ΔT -Minimum und der gestrichelte äußere Kreis den ΔT -Durchschnitt. Unten: Der Bereich von ΔT -Min. bis ΔT -Max. für jede Region als vertikale Säule mit ΔT -Durchschnitt als Quadrat (Mark et al., 2005).

Um zu sicheren Ergebnissen zu gelangen wurden daher zunächst die Gletscherbewegungen im Zusammenhang mit Bedingungen des Einzugsgebietes und meteorologischer Beobachtungen untersucht. Diese Studie wurde an Gletschern des nepalesischen und buthanesischen Himalajas für den Zeitraum zwischen der kleinen Eiszeit („Little Ice Age“ = LIA; 1815 AC) und heute durchgeführt (Kayastha und Harrison, subm.). Zwar konnten die

bedeutenden Einflüsse der Tallage und Geomorphologie (Süd- / Südostgerichtete und schuttbedeckte Gletscher zeigen einen schnelleren Rückgang der Schnee-Regen-Grenze als Nord / Westgerichtete und schutfreie; Abb. 3) hinsichtlich der Reaktion auf klimatische Veränderungen bestätigt werden, ein deutlicher Zusammenhang zum Einzugsgebiet konnte jedoch nicht aufgezeigt werden (Kayastha und Harrison, subm.). Leider erwiesen sich die Gletscher des Himalajas dafür als ungeeignet. Da die Ausdehnung für die Zeit der LIA aus Moränenablagerungen rück geschlossen wird, die auf Grund der steilen Morphologie und der geologischen Bewegungen vielfach gestört und mit Hangschutt überdeckt waren, konnten keine genauen Datierung vorgenommen werden. Dies entspricht nicht vergleichbaren Situationen anderer tropischer Gletscher (Owen und Benn, 2005).

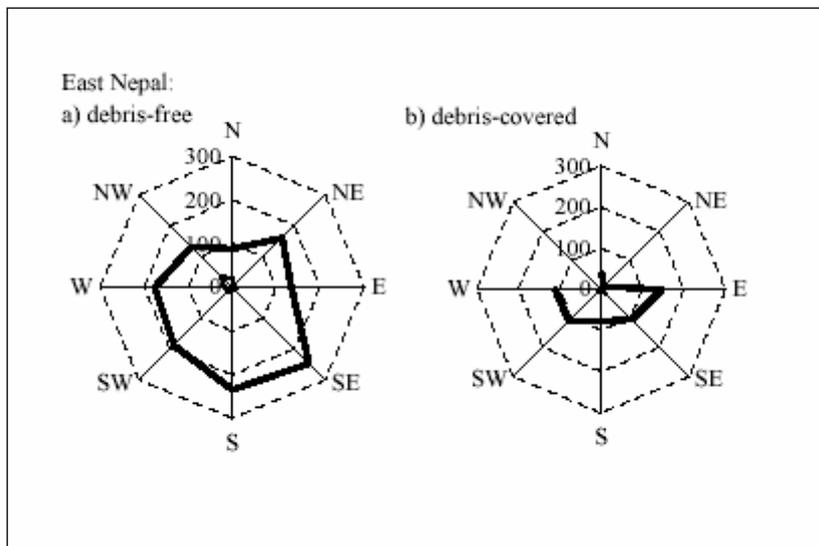


Abb. 3. Radargraphik für die Abweichungen der Schneefallgrenze (ΔELA m) unter dem Aspekt „schutfreie“ und „schuttbedeckte“ Gletscher in Ostnepal. Die Fette Linie zeigt Maximalwerte (Kayastha und Harrison, in press).

Eine weitere aufgebaute Datenbank beinhaltet Informationen über Flussläufe und deren Maximalschüttung (K. Cohen). Diese Angaben gehen unter anderem als Randbedingung in die LGM-Simulation ein. Weiterhin werden die Paläoschüttungsdokumentationen dazu benutzt, die kalkulierten Werte der Simulation zu evaluieren. Diese Datenbank konzentriert sich auf Flüsse Europas und deckt zunächst mit 66 Datenpunkten von 8 Flüssen den Nordwesten Europas ab. Paläohydrogeologie, Sedimentologie, Flussbett- und Talgeomorphologie und zeitliche Minimal-Maximal-Flußbettfüllung entlang des Ablaufs für das Quartär sind dokumentiert (Abb. 4; Cohen et al., in prep.).

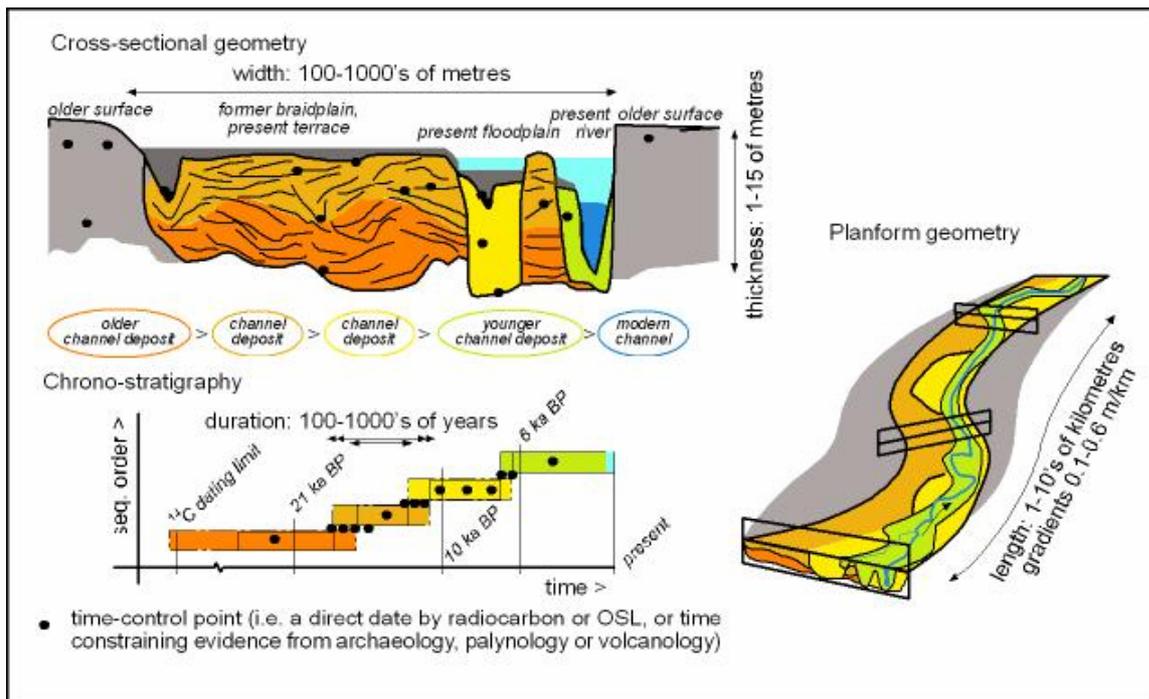


Abb. 4: Darstellung der typischen Felddatenerhebung mit relevanten Parametern zur späteren Modellierung (Cohen K., in prep.).

Die Ergebnisse des Unterprojektes zur Erhebung von Meeresoberflächentemperaturdaten (MARGO) von Ralph Schneider aus Bremen sind am Schluss dieses Berichtes gesondert aufgeführt.

Randbedingungen der Modellierung

Für die Simulation des LGM wurde die neuste Version des ICE5G Eisschilddatensatzes (neue Informationen über das Eurasische Eisschild) aus dem PMIP und QUEEN Projekten in die eigenen FOAM Simulationen verwendet. Aufgrund der neuen topographischen Daten aus ICE5G und unter Verwendung des Hochauflösenden Flusslaufmodells HYDRA entstanden neue Flussrichtungsdaten für das LGM-Experiment (Abb. 5). Die Entwicklung dieses Datensatzes und dessen Evaluation ist bei Harrison et al. (in press) beschrieben.

Modellsimulationen

Sensitivitätsanalysen

Die Analysen zur Sensitivität der Vegetation gegenüber veränderten atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen zeigen einen deutlich nicht-linearen Reaktionsverlauf. So ist in den Tropen der direkte physiologische Einfluss wechselnder CO_2 -Konzentration auf die Vegetationsverteilung genau so bedeutend (jedoch disparat) wie der Einfluss wechselnder

Klimabedingungen. Dadurch wird der Einfluss klimatischer Veränderungen in den Tropen entschärft. Anders in den Zonen außerhalb der Tropen. Dort ist der Einfluss der CO₂-Konzentration zwar geringer, verstärkt allerdings den Einfluss des Klimas. Diese Beziehung besteht für vergangene (Harrison und Prentice, 2004; Abb. 6) und zukünftige (Harrison et al., in press) Klimate.

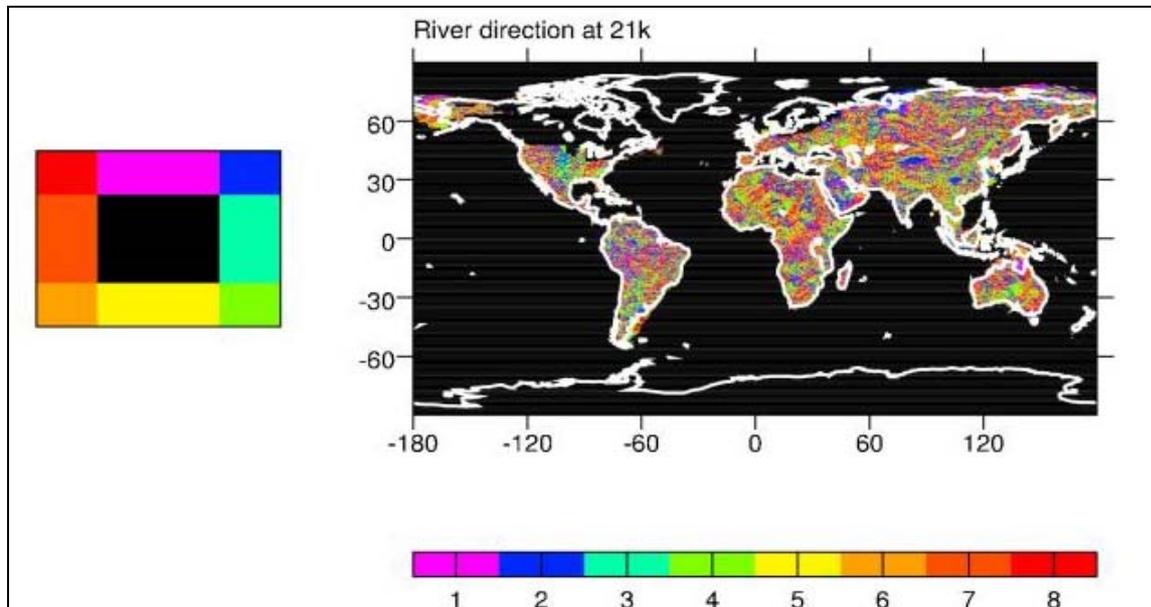


Abb. 5: Globale Karte der rekonstruierten Paläoflussrichtungen für das LGM mit dem hochauflösenden Flusslaufmodell HYDRA nach neuen topographischen Daten aus den ICE5G Eisschilddaten.

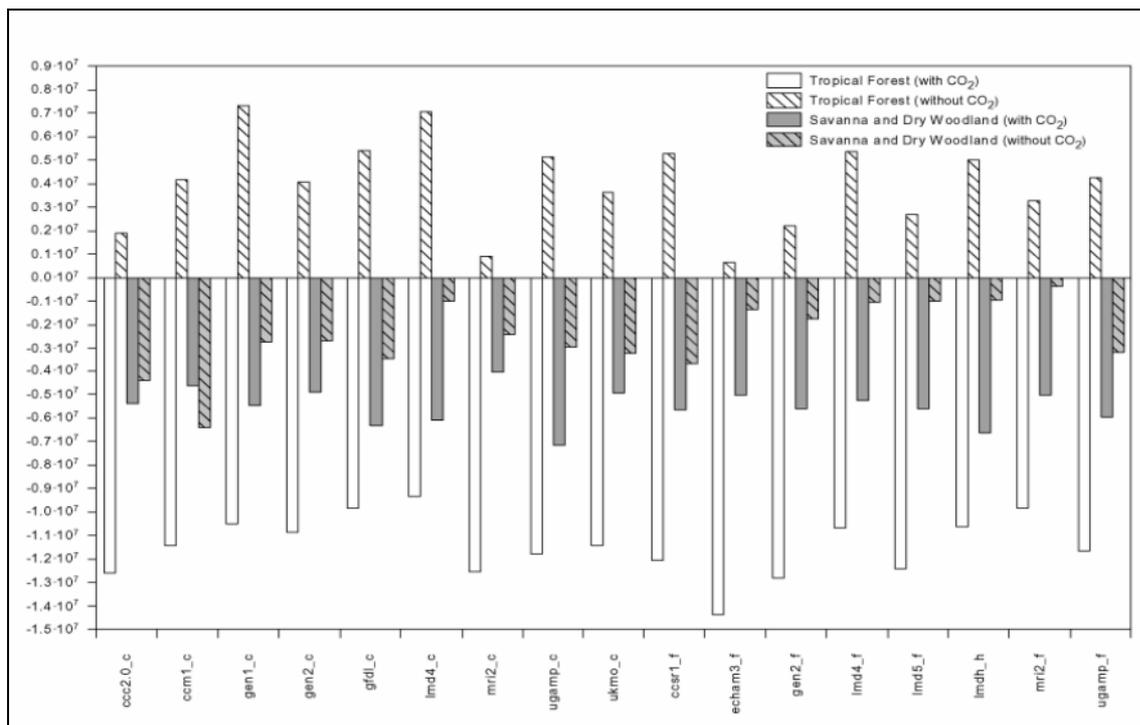


Abb. 6: Änderungen der Ausdehnung von tropischen Wäldern, Savannen und Trockenwäldern. Hervorgerufen durch simulierte Klimabedingungen von reduzierter glazialer CO₂ Konzentration.

Die Untersuchungen zur Sensitivität der Vegetation gegenüber kurzzeitiger Klimavariabilität ergaben, dass die Stärke der Änderungen in der jährlichen Klimaschwankung sowie die Dauer von über- und unterdurchschnittlichen Klimabedingungen einen ähnlichen Einfluss haben kann wie Veränderungen des gesamten Klimadurchschnitts (Ni et al., in press; Abb. 7). Die Entdeckung, dass veränderte Variabilität des Niederschlags signifikante Auswirkungen auf das Feuerregime und auf den Trockenstress der Vegetation ausüben und regulieren und damit bestimmen können, welches der beiden Mechanismen zum tragen kommt, hat Auswirkungen auf zahlreiche weiteren Diagnosen. So muss dieser Sachverhalt bei den Analysen der Vegetationsrückkopplungen mit berücksichtigt werden.

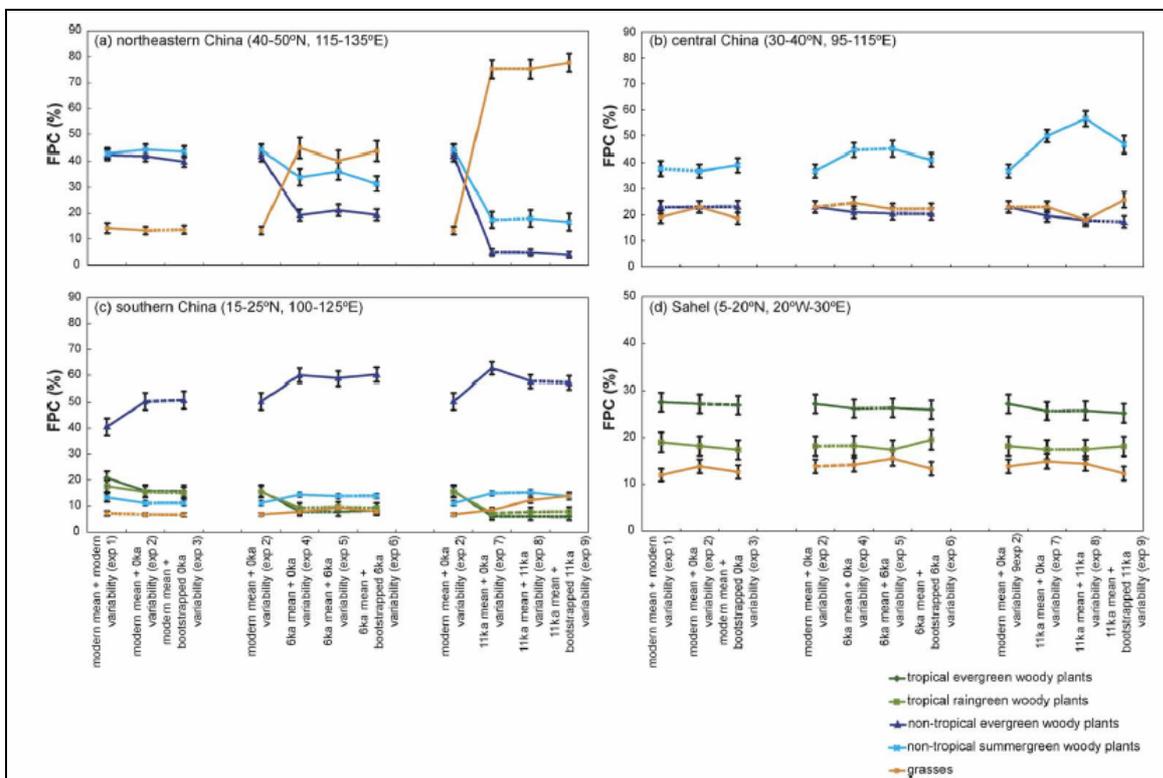


Abb. 7: Die Reaktion der Vegetation (foliage projective cover FPC) auf Veränderungen des Klimadurchschnitts und die Klimavariabilität der Jahreszeiten. Die Auswirkungen im Sahel (d) sind geringer als in den anderen Regionen und ist daher mit einer anderen Skalierung versehen (Ni et al., 2005 online).

Analysen der Ozeanrückkopplungen auf das Klima in hohen Breiten unter Verwendung der PMIP – Simulationen ließen vermuten, dass ein Zusammenhang besteht zwischen den unterschiedlichen Ergebnissen der Modelle und deren Gitterauflösungen. Um die Sensitivität der LGM–Simulationen gegenüber der Modellauflösung zu überprüfen, wurden Simulationen mit drei unterschiedlichen Auflösungen durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden mit dem

japanischen CCSR1 Modell mit den Gittergrößen T21, T42 und T106 durchgeführt. Die jeweiligen Ergebnisse wurden in offline Simulationen mit dem Vegetationsmodell BIOM4 modelliert um qualitative Aussagen über einen Vergleich mit Pollendaten treffen zu können. Diese Analysen zeigen, dass feinere Auflösungen im Bereich der Tropen kaum Verbesserungen erreichen und somit eine untergeordnete Rolle spielen. Anders im Bereich der hohen Breiten, wo durch feinere Auflösung eine größere Übereinstimmung der Vegetationsmuster erzielt wird und somit eine bessere Darstellung des Klimas erreicht wird (Downey et al., in prep.).

Rückkopplungsanalysen

Die Analysen der Ozeanrückkopplungen auf Veränderungen des Monsuns im mittleren Holozän mit dem FOAM Modell ergaben eine Verbindung zum afro - asiatischen und nordamerikanischen Monsun. Diese nördlichen Windsysteme werden durch Ozeanrückkopplungen verstärkt. In der südlichen Hemisphäre unterstützen diese Ozeanrückkopplungen die Abnahme des südamerikanischen und südafrikanischen Monsuns, die durch orbitale Parameter bedingt ist. Eine Abnahme des australischen Monsuns wird allerdings durch diametrale Ozeanrückkopplungen aufgehoben und in seiner Intensität im Vergleich zu heute sogar noch verstärkt (Liu et al., 2004; Abb. 8). Vergleiche mit Ergebnissen

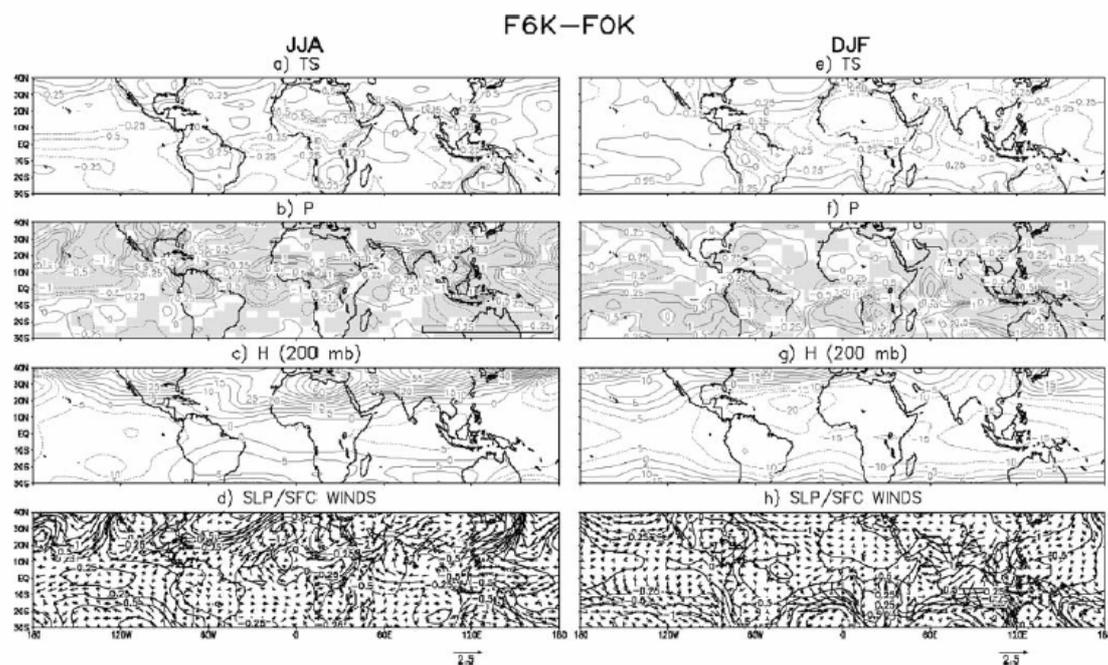


Abb. 8: Mit dem FOAM-Modell simulierte Klimaveränderungen zwischen dem mittleren Holozän (6ka) und heute (Liu et al., 2004). Die grauen Schattierungen in b) und f) zeigen deutliche Unterschiede des Niederschlags mit einer Signifikanz von 95% im Vergleich zur modellinternen Varianz.

anderer vollständig gekoppelter Ozean-Atmosphären-Modelle für das mittlere Holozän aus der zweiten Phase des PMIP Projektes ergaben eine Übereinstimmung der nördlichen und südlichen Monsunereignisse mit Ausnahme des Australischen (Braconnot et al., 2004). Die unterschiedlichen Reaktionen des australischen Monsuns bei gleichen Rahmenbedingungen werden noch weitergehend untersucht (Harrison et al., in prep.).

Der Vergleich von Ozean- und Vegetationsrückkopplungen in den hohen und mittleren nördlichen Breiten für das mittlere Holozän wurde anhand von Simulationen mit dem französischen IPSL gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modell und einer asynchronen Koppelung des BIOME Vegetationsmodells durchgeführt (Wohlfahrt et al., 2004). Dieser Vergleich zeigt die Verbesserungen bei der Rekonstruktion der nördlichen Drift der Tundra-Taiga-Grenze und eine zunehmend realistischere Darstellung der Verteilung temperierter Wälder in Nordamerika und Europa durch Ozean- und Vegetationsrückkopplungen. Allerdings verstärken diese auch eine kontinentale Austrocknung in Eurasien und China, die bei einer Kombination beider Effekte zu einer Simulation unrealistischer klimatischer Bedingungen in diesem Bereich führt (Abb. 9).

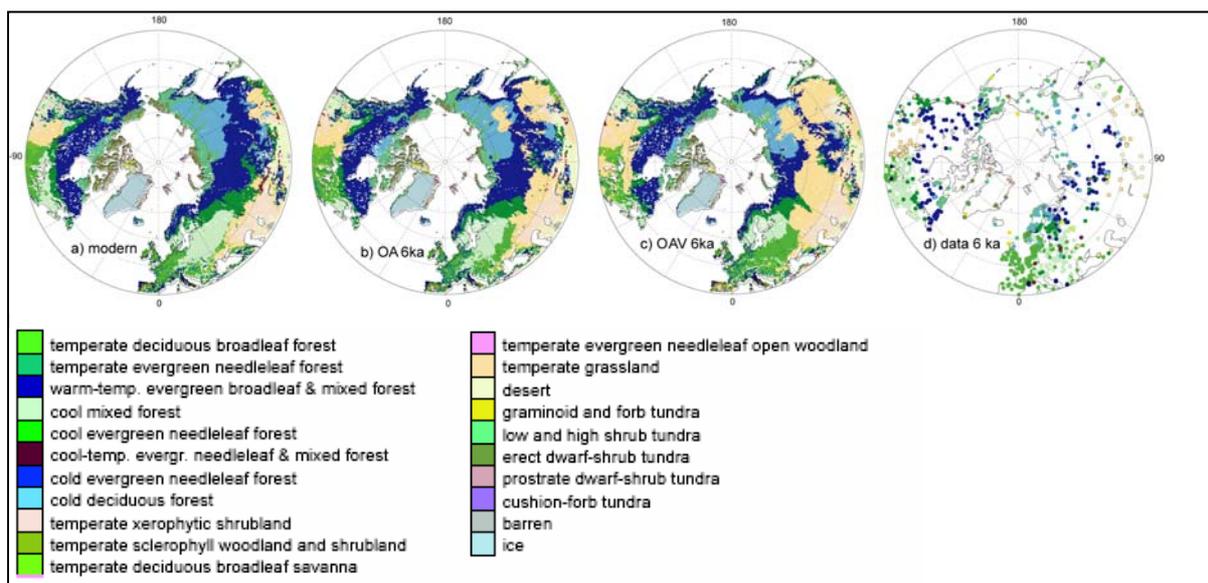


Abb. 9: Die simulierte Paläovegetationsverteilung im mittleren Holozän (6 ka) für die Nord-Hemisphäre nördlich 40°N. Diese BIOME4-Simulationen beziehen sich auf Analysen des IPSL-CM1 Klimamodells. OA = gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Simulation; OAV = gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Simulation mit asymmetrisch gekoppelter Vegetation; zum Vergleich die beobachteten Daten (Wohlfahrt et al.).

Diese Analyse der mittleren und hohen nördlichen Breiten wurde auf die Gruppe der OAGCM-Simulationen der zweiten PMIP Phase ausgeweitet. Bei diesen Untersuchungen stellte sich heraus, dass die vom IPSL Modell gezeigten Ozeanrückkopplungen ebenso in anderen gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen auftreten. Hierzu gehört auch die unrealistische Zunahme der kontinentalen Aridität in Eurasien (Wohlfahrt et al., *subm.*). Dieses Ergebnis wirft die dringende Frage nach den Ursachen innerhalb der modernsten Klimamodelle auf. Die Beschreibungen und Verknüpfungen der Landoberfläche und im Besonderen die Parametrisierung der Evapotranspiration bedürfen einer Verbesserung. Auf Grund dieser Analyse wird das Problem der kontinentalen Austrocknung ein Schwerpunkt innerhalb der zweiten Phase des PMIP Projektes sein.

Die Untersuchungen mit gekoppeltem dynamischen Meereis zeigt eine deutliche Abkühlung verglichen mit Simulationen mit thermodynamischen Meereis, sowohl für wärmere als auch

für kältere Klimate (Vavrus und Harrison, 2003; Abb. 10). Um realistisches Paläoklima reproduzieren zu können, muss Meereisdynamiken in globalen Klimamodellen eingefügt werden. Leider beinhaltet das aktuelle FOAM und FOAM-LPJ Modell nur thermodynamisches Meereis. Eine zukünftige Kollaboration mit Kollegen in Madison und Chicago (USA) bezüglich des Einbaus von dynamischem Meereis ist angedacht.

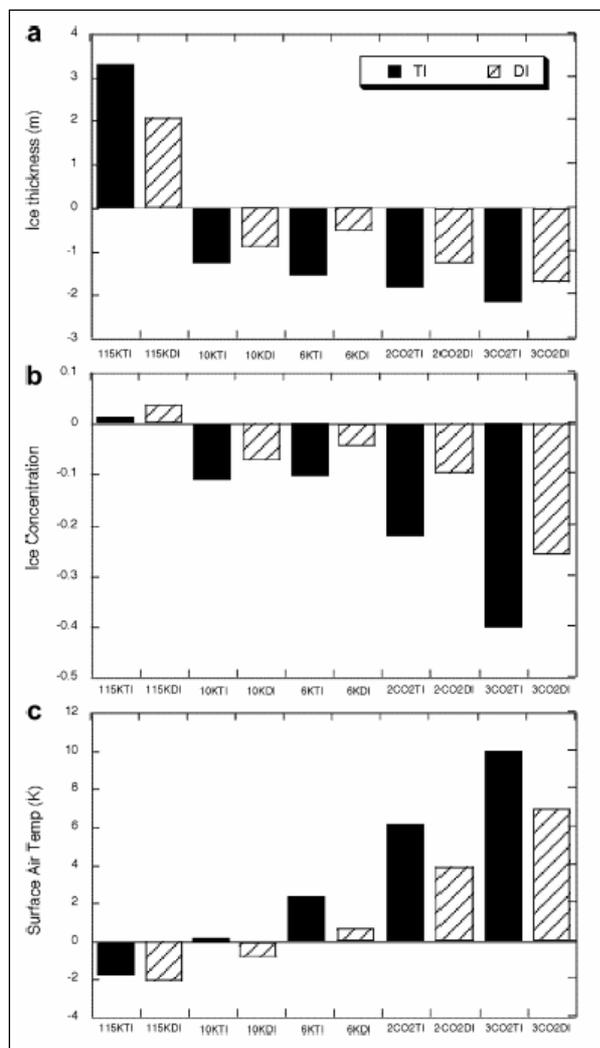


Abb. 10: Abweichungen der jahresdurchschnittlichen Wechsel in der Arctic von a) Meereisdicke, b) Meereisdichte und c) Oberflächentemperatur der Luft. Simulationsergebnisse mit thermodynamischen Eis sind schwarz und mit dynamischen Eismodell schraffiert dargestellt (Vavrus und Harrison, 2003).

Klimavariabilitätsanalysen

Mit Hilfe der FOAM und FOAM-LPJ Simulationen für das mittlere Holozän wurden jährliche und dekadische Variabilitäten sowie Fernwirkungsmuster (teleconnections) analysiert. Der präindustrielle Modelllauf für modernes Klima reproduziert eine angemessene ENSO (El Niño / Südliche Oszillation) Variabilität, wenn auch in abgeschwächter Form. In den Simulationen des mittleren Holozäns schwächt sich die ENSO Intensität weiter ab, die Fernwirkungsmuster bleiben jedoch bestehen (Song et al., in prep). Dies widerspricht Ergebnissen von anderen Modellen, die nach einer ebenfalls simulierten Abschwächung der ENSO Variabilität auch eine Änderung der Fernwirkungsmuster erkennen lassen. Da die aktuelle Versionen des FOAM (Abb. 11) und FOAM-LPJ Modells eine signifikante Kälteabweichung in den hohen nördlichen Breiten aufweisen, (Schmittner und Clement, 2002; Ni et al., in press) haben wir uns entschieden die Analysen zur Variabilität und Fernwirkungen auf südlichere Bereiche zu beschränken und die Variabilitätsexperimente für hohe Breiten erst mit einer korrigierten Version durchzuführen.

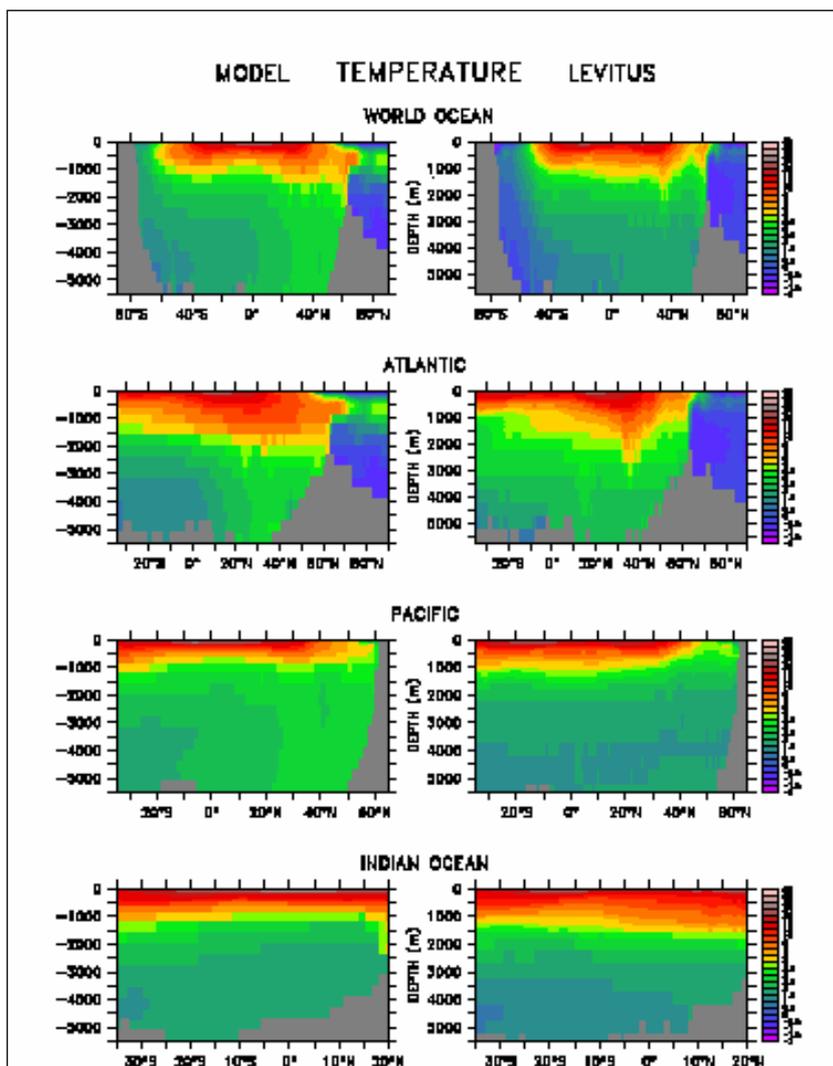


Abb. 11: Zonal gemittelte Ozeantemperaturen der FOAM1.5-Simulation (linke Spalte) und der Observations von Levitus und Boyer (1994) (rechte Spalte).

2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Für dieses Projekt war kein fortgeschriebener Verwertungsplan festgelegt.

3. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung

Soweit dies zutrifft sind Neuerungen und Fortschritte unter I.3. und II.1. erwähnt.

4. Publikationen

Publikationen aus diesem Projekt oder aus Zusammenarbeiten mit anderen Projekten:

(Mitglieder dieses Projekts sind **fett** gedruckt)

Barboni, D., Harrison, S.P., Bartlein, P.J., Jalut, G., New, M., Prentice, I.C., Sanchez-Goni, M.F., **Spessa, A.**, Davis, B. and Stevenson, A.C. (2004) Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: a pollen data analysis. *Journal of Vegetation Science* 15: 635-646.

Benn, D., L. Owen, H. Osmaston, G. Seltzer, S. Porter and **B. Mark**. (2005) Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. *Quaternary International* 138-139: 8-21.

Bigelow, N.H., Brubaker, L.B., Edwards, M.E., **Harrison, S.P.**, Prentice, I.C., Anderson, P.M., Andreev, A.A., Bartlein, P.J., Christensen, T.R., Cramer, W., Kaplan, J.O., Lozhkin, A.V., Matveyeva, N.V., Murray, D.F., McGuire, A.D., Razzhivin, V.Y., Ritchie, J.C., Smith, B., Walker, D.A., Gajewski, K., Wolf, V., Holmquist, B.H., Igarashi, Y., Kremenetskii, K., Paus, A., Pisaric, M.F.J. and Volkova, V.S. (2003) Climate change and Arctic ecosystems I. Vegetation changes north of 55°N between the last glacial maximum, mid-Holocene, and present. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 108 (D19), no. 8170, doi:10.1029/2002JD002558.

- Braconnot, P., **Harrison, S.P.**, Joussaume, S., Hewitt, C.D., Kitoh, A., Kutzbach, J., Liu, Z., Otto-Bleisner, B., Syktus, J and Weber, S.L. (2004) Evaluation of PMIP coupled ocean-atmosphere simulations of the mid-Holocene. In: Battarbee, R.W., Gasse, F., Stickley, C.E. (Eds), *Past Climate Variability through Europe and Africa*. Kluwer Academic Publishers.
- Harrison, S.P.** and Prentice, I.C. (2003) Climate and CO₂ controls on global vegetation distribution at the last glacial maximum: analysis based on palaeovegetation data, biome modelling and palaeoclimate simulations. *Global Change Biology* 9: 983-1004.
- Harrison, S.P.**, Kutzbach, J.E., Liu, Z., Bartlein, P.J., Otto-Bliesner, B., Muhs, D., Prentice, I.C. and Thompson, R.S. (2003). Mid-Holocene climates of the Americas: a dynamical response to changed seasonality. *Climate Dynamics* 20: 663-688.
- Kageyama, M., **S.P. Harrison**, A. Abe-Ouchi (2005) The depression of tropical snowlines at the last glacial maximum: What can we learn from climate model experiments? *Quaternary International* 138-139: 202-219.
- Kaplan, J.O., Bigelow, N.H., Prentice, I.C., **Harrison, S.P.**, Bartlein, P.J., Christensen, T.R., Cramer, W., Matveyeva, N.V., McGuire, A.D., Murray, D.F., Razzhivin, V.Y., Smith, B., Walker, D.A., Anderson, P.M., Andreev, A.A., Brubaker, L.B., Edwards, M.E., Lozhkin, A.V. (2003) Climate change and Arctic ecosystems 2. Modeling, palaeodata-model comparisons, and future projections. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 108 (D19), no. 8171, doi:10.1029/2002JD002559.
- Liu, Z., **Harrison, S.P.**, Kutzbach, J.E. and Otto-Bleisner, B. (2004) Global monsoons in the mid-Holocene and oceanic feedback. *Climatic Dynamics* 22: 157-182.
- Mark, B. S.P. Harrison, A. Spessa, M. New, D.J.A. Evans, K.F. Helmens** (2005) Tropical snowline changes at the last glacial maximum: a global assessment. *Quaternary International* 138-139: 168-201.
- Osmaston, H. and **Harrison, S.P.** (2005) The Late Quaternary glaciation of Africa: A regional synthesis. *Quaternary International* 138-139: 32-54.
- Pickett, E.J, **Harrison, S.P.**, Hope, G. Harle, K., Dodson, J.R., Kershaw, A.P., Prentice, I.C., Backhouse, J., Colhoun, E.A., D’Costa, D., Flenley, J., Grindrod, J., Haberle, S., Hassell, C., Kenyon, C., Macphail, M., Martin, H., Martin, A.H., McKenzie, M., Newsome, J.C., Penny, D., Powell, J., Raine, J.I., Southern, W., Stevenson, J., Sutra, J.P., Thomas, I., van der Kaars, S. and Ward, J. (2004) Pollen-based reconstructions of biome distributions for Australia, Southeast Asia and the Pacific (SEAPAC region) at 0, 6000 and 18,000 ¹⁴C yr B.P. *Journal of Biogeography* 31: 1381-1444.
- Schmittner, A.** and Clement, A. C., 2002, Sensitivity of the thermohaline circulation to tropical and high latitude freshwater forcing during the last glacial-interglacial cycle, *Paleoceanography*, 17, 10.1029/2000PA000591.
- Vavrus, S. and **Harrison, S.P.** (2003) The impact of sea ice dynamics on the Arctic climate system. *Climate Dynamics* 20: 741-757.
- Wohlfahrt, J., Harrison, S.P.** and Braconnot, P. (2004) Synergistic feedbacks between ocean and vegetation on mid- and high-latitude climates during the mid-Holocene. *Climate Dynamics* 22: 223-238.

In press:

- Harrison, S.P.**, Prentice, I.C., Sutra J-P., **Barboni, D.**, Kohfeld, K.E. and **Ni. J.** (in press) Towards a global scheme of plant functional types for ecosystem modelling, palaeoecology and climate impact research. *Journal of Vegetation Science*.
- Kayastha, R.B. and Harrison, S.P.**, (subm.) Changes of the equilibrium line altitude since the Little Ice Age in the Nepalese Himalayas. *Journal of Glaciology*.

- Ni, J., Harrison, S.P.**, Prentice, I.C., Kutzbach, J.E. and Sitch, S. (2005, in press) Impact of climate variability on present and Holocene vegetation: a model-based study. *Ecological Modelling*, available online 18 July 2005.
- Ni, J.**, Yu, G., **Harrison, S.P.** and Prentice, I.C., (subm.) Pollen-based reconstruction of vegetation during the mid-Holocene and last glacial maximum using a global scheme of plant functional types. Ms for *Journal of Vegetation Science*.
- Wohlfahrt, J., Harrison, S.P.**, Braconnot, P., Hewitt, C.D., Kutzbach, J.E., Kitoh, A., Mikolajewicz, U., Otto-Bleisner, B. and Weber, N. Evaluation of coupled ocean-atmosphere simulations of northern hemisphere extratropical climates in the mid-Holocene. Submitted to *Climate Dynamics*.

In prep.:

- Barboni, D.**, Prentice, I.C., **Harrison, S.P.** and New, M. Reconstructing past climates using plant functional traits: application to mid-Holocene pollen records from the circum-Mediterranean region. Ms for *Quaternary Research*.
- Cohen, K.M.**, Gibbard, P.L. and **Harrison, S.P.**, Continental scale fluvial activity in the last 50,000 years - GCM-evaluation using a prototype database.
- Downey, R., Harrison, S.P.** and Abe-Ouchi, A. The impact of model resolution on the simulation of high-latitude and tropical climates. Ms for *Journal of Climate*.
- Harrison, S.P.**, Coe, M.T., **Sickel, K.**, Bartlein, P.J., Gibbard, P., Mangerud, J., Peltier, R. and Seigert, M. River flowpaths at the Last Glacial Maximum. Ms for *Geophysical Research Letters*.
- Harrison, S.P.**, Prentice, I.C. and **Sickel, K.**, Direct impacts of atmospheric CO₂ concentration on global vegetation distribution. Ms for *Climate Dynamics*.
- Harrison, S.P.**, Braconnot, P., Hewitt, C.D., Kutzbach, J.E., Kitoh, A., Mikolajewicz, U., Otto-Bleisner, B. and Weber, S.L., Comparison and evaluation of coupled ocean-atmosphere simulations of the mid-Holocene. Ms. for *Climate Dynamics*.
- Marchant, R.A., Behling, H., **Harrison, S.P.**, Hooghiemstra, H., Markgraf, V., Björck, S., Bush, M., Cleef, A., Colinvaux, P.A., de Oliveira, P.E., Graf, K., Hansen, B.C.S., Heusser, C., Horn, S.P., Ledru, M-P., Leyden, B.W., Lozano-Garcia, M.S., Lorrenzo, S., Moar, N.T., Morenao, P.I., Salgado-Labouriau, M.L., Schäbitz, F. and Watts, W.A., Biome reconstructions from pollen data from latin America at 18,000, 6000 and 0 ¹⁴C yr B.P. Ms for *Journal of Biogeography*.
- Song, A., Harrison, S.P.**, Jacob, R., **Liu, Y.**, Simulating the Holocene ENSO Variability with Local and Remote Forcing. Ms for *Paleoceanography*.
- Sutra, J-P., **Harrison, S.P.**, **Barboni, D.**, Anupama, K., Barui, N.C., Bera, S.K., Bhattacharya, K., Bhattacharyya, A., Bonnefille, R., Chauhan, M.S., Farooqui, A., Gupta, A., Khandeal, A., Sharma, C., Suryaparkash, I. and Yonebayashi, C. , Application of a global PFT scheme to pollen-based reconstruction of modern and fossil biomes for the Indian Subcontinent. Ms for *Journal of Vegetation Science*.

Snowline special issue of *Quaternary International*:

S.P. Harrison ist Gasteditor einer Spezialausgabe des *Quaternary International* in dem regionale Beweise für Veränderungen der Schneefallgrenzen innerhalb der Tropen während des letzten glazialen Maximums (LGM) zusammen getragen werden. Die Veröffentlichungen dokumentieren die Daten die in die SNOWLINE Datenbank eingeflossen sind und deren Diagnosen zum Klimawandel.

- D.I. Benn, L.A. Owen, H.A. Osmaston, G.O. Seltzer, S.C. Porter and B. Mark* (2005) Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. *Quaternary International* 138-139: 8-21.
- L.A. Owen, D.I. Benn* (2005) Equilibrium-line altitudes of the Last Glacial Maximum for the Himalaya and Tibet: an assessment and evaluation of results. *Quaternary International* 138-139: 55-78.
- Y. Ono, Aoki, T., Hasegawa, H., Dali, L.* (2005) Mountain glaciation in Japan and Taiwan at global Last Glacial Maximum. *Quaternary International* 138-139: 79-92.
- M.L. Prentice, G.S. Hope, K. Maryunani and J.A. Peterson* (2005) An evaluation of snowline data across New Guinea during the last major glaciation, and area-based glacier snowlines in the Mt. Jaya region of Papua, Indonesia, during the Last Glacial Maximum. *Quaternary International* 138-139: 93-117.
- M.S. Lachniet, and L. Vasquez-Selem* (2005) Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quaternary International* 138-139: 129-144.
- J.A. Smith, G.O. Seltzer, D.T. Rodbell and A.G. Klein* (2005) Regional synthesis of last glacial maximum snowlines in the tropical Andes, South America. *Quaternary International* 138-139: 145-167.
- S.C. Porter* (2005) Pleistocene snowlines and glaciation of the Hawaiian Islands. *Quaternary International* 138-139: 118-128.
- H.A. Osmaston and S.P. Harrison* (2005) The Late Quaternary glaciation of Africa: a regional synthesis. *Quaternary International* 138-139: 32-54.
- B.G. Mark, S.P. Harrison, A. Spessa, M. New, D.J.A. Evans and K.F. Helmens* (2005) Tropical snowline changes at the last glacial maximum: a global assessment. *Quaternary International* 138-139: 168-201.
- M. Kageyama, S.P. Harrison and A. Abe-Ouchi* (2005) The depression of tropical snowlines at the last glacial maximum: What can we learn from climate model experiments? *Quaternary International* 138-139: 202-219.

Weitere im Text zitierte Literatur:

- Bard E, Rostek F, Sonzogni C (1997) Interhemispheric synchrony of the last deglaciation inferred from alkenone paleothermometry. *Nature* 385: 707-710.
- Barnola JM, Raynaud D, Korotevich YS, Lorius C (1987) Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO₂. *Nature* 329: 408-414.
- Braconnot P, Joussaume S, Marti O, Noblet N (1999) Synergistic feedbacks from ocean and vegetation on the African monsoon response to mid-holocene insolation. *Geophysical Research Letters* 26: 2481-2484
- Braconnot P, Marti O, Joussaume S, Leclainche Y (2000) Ocean feedback in response to 6 kyr BP insolation. *Journal of Climate* 13: 1537-1553.
- Broström A, Coe M, Harrison SP, Gallimore R, Kutzbach JE, Foley J, Prentice IC, Behling P (1998) Land surface feedbacks and paleomonsoons in northern Africa. *Geophysical Research Letters* 25: 3615- 3618.

- Chapman MR, Shackleton NJ, Zhao M, Eglinton G (1996) Faunal and alkenone reconstructions of subtropical North Atlantic surface hydrography and paleotemperature over the last 28 kyr. *Paleoceanography* 11: 343-357.
- Chapman MR, Shackleton NJ, Duplessy J-C (2000) Sea surface temperature variability during the last glacial-interglacial cycle: assessing the magnitude and pattern of climate change in the North Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 157: 1-25.
- Chappellaz J, Blunier T, Kints S, Dällenbach A, Barnola J-M, Schwander J, Raynaud D, Stauffer B (1997) Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Holocene. *Journal of Geophysical Research* 102.- 15987-915997.
- Claquin T, Schulz M, Balkanski Y (1999) Modelling the mineralogy of atmospheric dust sources. *Journal of Geophysical Research* 104: 22243-22256.
- Claquin T, Roelandt C, Kohfeld KE, Harrison SP, Prentice IC, Balkanski Y, Bergametti G, Hansson M, Mahowald N, Rodhe N, Schulz M (submitted) Radiative forcing of climate by ice-age dust. *Climate Dynamics*.
- Claussen M, Gayler V (1997) The greening of the Sahara during the mid-Holocene: results of an interactive atmosphere- biome model. *Global Ecology and Biogeography Letters* 6: 369-377.
- CLIMAP (198 1) Seasonal reconstructions of the Earth's surface at the last glacial maximum. Geological Society of America Map and Chart Series MC-36:
- Coe MT, Bonan GB (1997) Feedbacks between climate and surface water in northern Africa during the middle Holocene. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102: 11087-11 101.
- Doherty R, Kutzbach J, Foley J, Pollard D (2000) Fully coupled climate/dynamical vegetation model simulations over Northern Africa during the mid-Holocene. *Climate Dynamics* 16: 561-574.
- Farrera I, Harrison SP, Prentice IC, Ramstein G, Guiot J, Bartlein PJ, Bonnefille R, Bush M, Cramer W, von Grafenstein U, Holmgren K, Hooghiemstra H, I-lope G, Jolly D, Lauritzen SE, Ono Y, Pinot S, Stute M and Yu G (1999) Tropical climates at the last glacial maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. 1. Vegetation, lake-levels and geochemistry. *Climate Dynamics* 15: 823-856.
- Fischer G and Wefer G (1999) *Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 728pp.
- Foley JA, Kutzbach JE, Coe MT, Levis S (1994) Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch. *Nature* 371: 52-54.
- Ganopolski A, Kubatzki C, Claussen M, Brovkin V, Petoukhov V (1998a) The influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-Holocene. *Science* 280: 1916-1919.
- Guilderson TP, Fairbanks RG, Rubenstone JL (1994) Tropical temperature variations since 20,000 years ago: modulating interhemispheric climate change. *Science* 263: 663-665
- Hammer CU, Clausen HB, Langway CC Jr. (1985) The Byrd ice core: continuous acidity measurements and solid electrical conductivity measurements. *Annals of Glaciology* 7: 214.
- Harrison SP, Kohfeld KE, Roelandt C and Claquin T (2002) The role of dust climate changes today, at the last glacial maximum and in the future. *Earth Science Reviews*
- Harrison SP, Braconnot P, Joussaume S, Hewitt C, Stouffer RJ (2002) Comparison of palaeoclimate simulations enhances confidence in models. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 83:447-447
- Hewitt CD, Mitchell JFB (1998) A fully coupled GCM simulation of the climate of the mid-Holocene. *Geophysical Research Letters* 25: 361-364.

- Kaplan JO, Bigelow NH, Prentice IC, Harrison SP, Bartlein PJ, Christensen TR, Cramer W, Matveyeva NV, McGuire AD, Murray DF, Razzhivin VY, Smith B, Walker DA, Anderson PM, Andreev AA, Brubaker LB, Edwards ME, Lozhkin AV (2003) Climate change and arctic ecosystems II. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. *J. Geophys. Res.* 108:doi:10.1029/2002JD002559
- Kohfeld KE, Harrison SP (2000) How well can we simulate past climates? Evaluating earth system models using global palaeoenvironmental datasets. *Quaternary Science Reviews* 19: 321-346.
- Kutzbach JE, Liu Z (1997) Response of the African monsoon to orbital forcing and ocean feedbacks in the Middle Holocene. *Science* 278: 440-443.
- Kutzbach JE, Bonan G, Foley J, Harrison SP (1996) Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to forcing in the early to middle Holocene. *Nature* 384: 623-626.
- Kutzbach JE, Harrison SP, Coe MT (in press) Land-ocean-atmosphere interactions and monsoon climate change: a palaeo- perspective. In: Schulze ED, Heimann M, Harrison SP, Holland E, Lloyd J, Prentice IC, Schimel D (Eds) *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*, Academic Press.
- Levis S, Foley JA, Pollard D (1999) Potential high-latitude Vegetation feedbacks on CO₂-induced climate change. *Geophysical Research Letters* 26: 747-750.
- Liu Z, Jacob R, Kutzbach JE, Harrison SP, Anderson J (1999) Monsoon impact on El Niño in the early Holocene. *PAGES Newsletter* 7: 16-17.
- Liu Z, Kutzbach JE, Wu L (2000) Modeling climatic shift of El Niño variability in the Holocene. *Geophysical Research Letters*.
- Mahowald N, Kohfeld KE, Linsley M, Balkanski Y, Harrison SP, Prentice IC, Rodhe H and Schulz M (1999) Dust sources and deposition during the Last Glacial Maximum and current climate: a comparison of model results with palaeodata from ice cores and marine sediments. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 104: 15895-15916.
- Mix AC, Pisias NG, Hostetler SW (1999) Foraminiferal faunal estimates of paleotemperature: circumventing the no-analog problem yields cool ice age tropics. *Paleoceanography* 14: 350-359.
- de Noblet N, Claussen M, Prentice IC (2000) Mid-Holocene greening of the Sahara: first results of the GAIM 6000 yr BP experiment with two asynchronously coupled atmosphere/biome models. *Climate Dynamics* 16: 643-659.
- Ohkouchi N, Kawamura K, Nakamura T, Taira A (1994) Small changes in the sea-surface temperature during the last 20,000 years - molecular evidence from the western tropical Pacific. *Geophysical Research Letters* 21: 2207-2210.
- Otto-Bliesner B (1999) El Niño/La Niña and Sahel precipitation during the middle Holocene. *Geophysical Research Letters* 26: 87-90.
- Overpeck J, Rind D, Lacy A, Healy R (1996) Possible role of dust-induced regional warming in abrupt climate change during the last glacial period. *Nature* 384: 447-449.
- Petit J-R, Briat M, Royer A (1981) Ice age aerosol content from Fast Antarctic ice core samples and past wind strength. *Nature* 293: 391-394.
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov VM, Legrand M, Lipenkov VY, Lorius C, Pepin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 439- 436.
- Pollard D, Bergengren JC, Stillwell-Soller LM, Felzer B, Thompson SL (1998) Climate simulations for 10000 and 6000 years BP using the GENESIS global climate model. *Paleoclimates: Data and Modelling* 2: 183-218.

- Prahl FG, Pisias N, Sparrow MA, Sabin A (1995) Assessment of sea-surface temperature at 42-degrees N in the California Current over the last 30,000 years. *Paleoceanography* 10: 763-773.
- Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, Leemans R, Monserud RA, Solomon AM (1992) A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *19:117-134*
- Prentice IC, and Webb III T (1998) BIONE 6000: reconstructing global mid-Holocene Vegetation patterns from palaeoecological records. *Journal of Biogeography* 25: 997-1005.
- Raynaud D, Jouzel J, Barnola JM, Chappellaz J, Delmas R and Lorius C (1993) The ice core record of greenhouse gases. *Science* 259: 926-934.
- Raynaud D, Barnola JM, Chappellaz J, Blunier T, Indermuhle A, Stauffer B (2000) The ice record of greenhouse gases: a view in the context of future changes. *Quaternary Science Reviews* 19: 9-17.
- Rea DK (1994) The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind. *Reviews of Geophysics* 32: 159-195
- Rind D, Peteet D (1985) Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea-surface temperature estimates: are they consistent? *Quaternary Research* 24: 1-22.
- Rosell-Meld A, Bard E, Emeis KC, Farrimond P, Grimalt J, Müller PJ and Schneider RR (1998) TEMPUS project takes a new look at sea surface temperatures. *Eos* 79: 393-394.
- Rostek F, Ruhland G, Bassinot FC, Müller PJ, Labeyrie LD, Lancelot Y, Bard E (1993) Reconstructing sea surface temperature and salinity using δO_{18} and alkenone records. *Nature* 364: 319-321.
- Schneider RR, Mueller PJ, Ruhland G (1995) Late Quaternary surface circulation in the east-equatorial South Atlantic: Evidence from alkenone sea surface temperatures. *Paleoceanography* 10: 197-219.
- Sokolik I and Toon OB (1999) Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 104: 9423-9444.
- Sonzogni C, Bard E, Roster F (1998) Tropical sea-surface temperatures during the last glacial period: a view based on alkenones in Indian Ocean sediments. *Quaternary Science Reviews* 17: 1185-1201.
- Steffensen JP (1997) The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 102: 26755-26763.
- Street-Perrott FA, Mitchell JFB, Marchand DSB, Brunner JS (1990) Milankovitch and albedo forcing of the tropical monsoons: a comparison of geological evidence and numerical simulations for 9000 yBP. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* 81: 407-427.
- Tegen I, Lacis A, Fung I (1996) The influence of mineral aerosol from disturbed soils on the global radiation budget. *Nature* 380: 419-422.
- TEMPO-members, Kutzbach JE, Bartlein PJ, Foley JA, Harrison SP, Hostetler SW, Liu Z, Prentice IC, Webb III T (1996) Potential role of vegetation feedback in the climate sensitivity of high-latitude regions: a case study at 6000 years before present. *Glob Biogeochem Cycle* 10:727-736
- Texier D, de Noblet N, Harrison SP, Haxeltine A, Jolly D, Joussaume S, Laarif F, Prentice IC and Tarasov PE (1997) Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedbacks in climate change. Coupled model simulation for 6000 years BP and comparison with palaeodata for northern Eurasia and northern Africa. *Climate Dynamics* 13: 865- 882.

- Texier D, de Noblet N, Braconnot P (2000) Sensitivity of the African and Asian monsoons to mid-Holocene insolation and data-inferred surface changes. *Journal of Climate* 13: 164-181.
- Yu, G., Chen Xudong, Ni Jian, Cheddadi, R., Guiot, J., Han Huiyou, Harrison, S.P., Huang Ci-xuan, Jolly, D., Manhong, K., Kong Zhaochen, Li Shengfeng, Li Wen-yi, Ping.mei Liew, Liu Gunagxu, Liu Jinling, Kam-biu Liu, Prentice, I.C., Ren Guoyu, Song Changqing, Sugita, S., Sun Xiangjun, Tang Lingyu, Van Campo, E., Xia Yumei, Xu Qinghai, Yan Shun, Yang Xiangdong, Zheng Zhuo, (2000). Palaeovegetation of China: a pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography* 27: 635-664.
- Zhao M, Beveridge N, Shackleton N, Sarnthein M, Eglinton G (1995) Molecular stratigraphy of cores off northwest Africa: sea surface temperature history over the last 80ka. *Paleoceanography* 10: 661-675.