



**DEKLIM**

*Abschlußbericht*

**Stabile Isotope in hochauflösenden Sedimenten von  
Kraterseen als Ausdruck der Klimavariabilität  
(PROSIMUL II)**

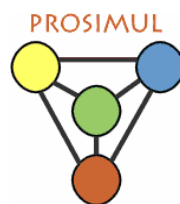
Berichterstatter  
**Andreas Lücke, Holger Wissel**

*Förderkennzeichen:  
01 LD 0001*

mit

**Netzwerkprojekt Abschlußbericht**

**Klimavariabilität des Spätquartärs in jährlicher bis  
hundertjähriger Auflösung: Vergleich von Proxy-Daten  
aus synchronisierten terrestrischen Archiven und  
numerischen Simulationen (PROSIMUL)**



Berichterstatter  
**Sabine Hanisch, Andreas Lücke, Antje Schwalb**

mit Beiträgen von  
**Michael Friedrich, Julie Jones, Sebastian Wagner, Martin Widmann**

*Förderkennzeichen:  
01 LD 0001, 01 LD 0002, 01 LD 0003, 01 LD 0301*

---

## **Berichtsteil I:**

### **Kurze Darstellung des Vorhabens**

## 1. Aufgabenstellung des Vorhabens

Im Projekt „Stabile Isotope in hochauflösenden Sedimenten von Kraterseen als Ausdruck der Klimavariabilität (PROSIMUL II)“ wurden lakustrine Sedimente aus Europa und Asien mittels geochemischer und isotopengeochemischer Methoden untersucht. Dabei wurden die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet:

- Eichuntersuchungen zur weiteren Aufklärung der grundlegenden Beziehung zwischen Isotopenverhältnissen und Klimavariablen im Seeökosystem.
- Aufstellung von Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopen Chronologien anhand von Kraterseesedimenten aus dem späten Quartär mit einer Auflösung von 20-30 Jahren, um die langfristigen Entwicklung dieser Ökosysteme unter unterschiedlichen Klima- bzw. Umweltbedingungen zu beschreiben.
- Entwicklung von hochauflösenden Proxyzeitreihen (jährliche Auflösung oder Beprobung des Kernes mit gleichem Zeitabstand) für ausgewählte Zeitfenster, um daran Fragen der Periodizität, des Verlaufes und des Ausmaßes von Klimaveränderungen zu untersuchen.
- Regionaler Vergleich lakustriner Sedimentarchive aus Eifelmaarseen basierend auf Isotopenzeitreihen mit dem Focus auf der Umwandlung klimatischer Signale im Ökosystem und ihrer Archivierung im Sediment während des späten Quartärs.
- Erweiterung unserer Kenntnisse über die Wirkung unterschiedlicher Steuerfaktoren (externes und internes Forcing, Rückkopplungsmechanismen und interne Dynamik) auf die jeweiligen Umweltbedingungen bzw. auf die Randbedingungen des Seeökosystems und Herausarbeitung der klimarelevanten Faktoren.
- Untersuchung der Klimavariabilitäten des Spätglazials und des Holozäns in unterschiedlicher Zeitauflösung (jährlich, dekadisch und hundertjährlich).
- Klärung der Mechanismen rascher Klimaveränderungen in Europa (Einfluss des Nordatlantik, Veränderung der Einstrahlung).
- Entwicklung von Transferfunktionen mit dem Ziel, den klimarelevanten Informationsanteil einzelner Isotopenparameter zu identifizieren, um die Übersetzung von Isotopenzeitreihen in Klimazeitserien vornehmen zu können.
- Bearbeitung von Fragen der Synchronizität von Klimaveränderungen sowie Telekonnektionen zwischen Europa und Asien.
- Etablierung eines Multiproxy-Netzwerkes von Klimaparametern, um quantitative Informationen über die Entwicklung des Klimas in Europa während des Spätquartärs bereitstellen zu können.

Das Netzwerkprojekt „Klimavariabilität des Spätquartärs in jährlicher bis hundertjähriger Auflösung: Vergleich von Proxy-Daten aus synchronisierten terrestrischen Archiven und numerischen Simulationen (PROSIMUL)“ hatte darüber hinaus die folgenden gemeinsamen Fragestellungen. Diese Aufgabenstellungen wurden gemeinsam von PROSIMUL I, II und III sowie MIDHOL bearbeitet.

- Synchronisierung von Proxy-Daten aus dendrologischen, lakustrinen und Eiskern-Archiven des Spätglazials.
- Untersuchung der natürlichen Klimavariabilität im Spätglazial und im Holozän sowie der Muster und Prozesse der Klima- und Umweltvariabilität mit jährlicher bis hundertjähriger Auflösung.

- Bestimmen der Geschwindigkeit und Amplitude von Klimaänderungen und von Perioden mit extremen Klimabedingungen sowie Nachweis von Episoden rascher Klimaänderungen und ökologischer Wechsel.
- Unterscheidung von externen Steuerfaktoren und internen Rückkopplungsmechanismen, die das Klima-System kontrollieren, sowie Bestimmung der Sensitivität des Klimasystems gegenüber Variationen der Steuerfaktoren.
- Entwickeln von Transferfunktionen zur Rekonstruktion von Niederschlag und Temperatur durch Quantifizieren des Transfers von Klimainformation in die Proxies.
- Extraktion quantitativer Klima-Proxies aus synchronisierten Archiven und Entwurf eines konsistenten Bildes der Klimaentwicklung in Europa.
- Überprüfen von Telekonnektionen in der Klimageschichte zwischen Europa und den amerikanischen Kontinenten und Asien sowie zwischen der nördlichen und südlichen Hemisphäre.
- Vergleich der heutigen Klimavariabilität mit der natürlichen, jährlichen bis hundertjährigen Klimavariabilität in der Vergangenheit für eine bessere Abschätzung zukünftiger Entwicklungen im Klima-System.
- Detektion von mit ECHO-G Läufen und anderen verfügbaren GCMs numerisch simulierten Klimavariabilitäten für bestimmte Zeitfenster.
- Evaluation der natürlichen Klimavariabilität mit Hilfe von ECHO-G Simulationen und Proxy-Daten, Vergleich verschiedener Modellergebnisse und Validierung von GCMs.
- Reproduktion der großräumigen Klima-Variabilität durch Modellläufe als Funktion primärer (orbitaler) und sekundärer (z.B. Vegetationsbedeckung) Steuerung.

## **2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

Aufgrund der Begutachtung der Anträge wurde die geplante Modellierungskomponente (PROSIMUL IV) nicht für die Förderung vorgeschlagen. Daher mussten alle Arbeiten in Zusammenhang mit der Modellierung zunächst zurückgestellt werden. Durch gemeinsame Bemühungen von PROSIMUL und durch die Unterstützung durch den Projektträger und das Ministerium konnte in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit das Modellierungsprojekt MIDHOL gefördert werden. Durch eine intensive Zusammenarbeit war damit die Möglichkeit eröffnet, Arbeiten zum Vergleich von Proxydaten und Simulationsergebnissen durchzuführen. Von dieser Möglichkeit ist erfolgreich Gebrauch gemacht worden und es werden sich weitere gemeinsame Arbeiten ergeben. Das ursprünglich für die gesamte Projektlaufzeit von fünf Jahren ausgelegte dendrochronologische Projekt PROSIMUL I (M. Friedrich) konnte nur für die ersten drei Jahre gefördert werden. Aufgrund dieser Tatsache mussten sich die Arbeiten zum Vergleich lakustriner und dendrologischer Proxydaten auf den Zeitraum des Spätglazial konzentrieren. Diese Arbeiten konnten im Rahmen der Projektlaufzeit von PROSIMUL I erfolgreich durchgeführt werden. Für die weiteren Arbeiten zum Holozän standen lediglich die dendrologischen Daten aus PROSIMUL I für PROSIMUL II und III zur Verfügung. Auf das spezielle Fachwissen von Herrn Friedrich konnte aufgrund der Fördersituation leider weniger intensiv zurückgegriffen werden. Trotzdem konnten auch die Fragestellungen zum Holozän von PROSIMUL II und III erfolgreich bearbeitet werden.

## **3. Planung und Ablauf**

Die Planung des Vorhabens PROSIMUL II und des Netzwerkprojektes PROSIMUL sah vor, dass zunächst die einzelnen Teilprojekte PROSIMUL I, II und III Proxydaten erarbeiten und Hypothesen formulierten. Darüber hinaus sollten gemeinsame Arbeiten zur Entwicklung von

Archiven von Proxydaten durchgeführt werden. Aufbauend auf diese Datenbasis wurden nachfolgend gemeinsame proxy-gestützte Hypothesen zur Klimaentwicklung formuliert und evaluiert. Diese Hypothesen wurden schließlich mit Hilfe von transienten Simulationsläufen eines globalen gekoppelten Klimamodells getestet. Dadurch sollten einerseits nicht valide Hypothesen ausgeschlossen werden, andererseits aber auch das Verhalten des Modells überprüft werden. Diese Arbeiten wurden entsprechend durchgeführt. Im Rahmen von Arbeitsgruppentreffen und Workshops kam es zu einem regelmäßigen Austausch von Teilprojektergebnissen, wurde die gemeinsame Interpretation und Hypothesenbildung vorgenommen und gemeinsame Manuskripte diskutiert.

#### Workshops und Meetings:

- 05/06 PROSIMUL-MIDHOL Workshop: Bodenseesedimente als Archive von Hochwasserereignissen, TU Braunschweig
- 05/06 DEKLIM Abschluss Symposium; Leipzig
- 02/06 SALSA-PROSIMUL-MIDHOL Workshop, ZMAW, Hamburg
- 03/05 PROSIMUL-MIDHOL Workshop: Vorbereitung des Beitrages zum Abschluss Symposium in Leipzig; Mainz
- 02/05 SALSA-PROSIMUL-MIDHOL Workshop: „Southern Westerlies“ und Veränderung des hydrologischen Regimes Patagoniens; TU Braunschweig
- 10/04 MIDHOL-PROSIMUL-SALSA Workshop; AWI Bremerhaven
- 03/04 MIDHOL-PROSIMUL-SALSA Workshop: Extreme Seespiegelschwankungen in Patagonien als Ausdruck von Änderungen in der globalen Zirkulation, TU Braunschweig
- 10/03 DEKLIM-Statusseminar; Bad Münstereifel
- 09/03 DEKLIM-Paläo-Bereichstreffen; Mainz
- 03/03 PROSIMUL-Arbeitstreffen: Telekonnektionen; TU Braunschweig
- 08/02 Internationaler ad-hoc Workshop (organisiert zusammen mit B. Kromer, Akademie der Wissenschaften, Uni Heidelberg): “Solar signatures in terrestrial archives”; Universität Heidelberg
- 04/02 PROSIMUL-Arbeitstreffen: Chronologie Spätglazial, Synchronisation Baumringe/Isotope, Interpretation von Proxies (Biomarker, Isotope), Umweltgeschichte im Einzugsgebiet des Bodensees, Spätholozän; Universität Heidelberg
- 02/02 DEKLIM-Kickoff Treffen: Austausch über bisherige Arbeiten, Ausblick und Planung der zukünftigen Zusammenarbeit; Bad Honnef

#### 4. Wissenschaftlicher Stand

Neuere Arbeiten im Hinblick auf die klimatischen Zustände des Spätglazials und des Holozäns wurden laufend berücksichtigt und einbezogen. Diese zeigten eine Reihe wissenschaftlicher Defizite auf. Das Holozän, früher beschrieben als eine Periode relativ stabiler Klimabedingungen scheint im Gegensatz zu diesen Annahmen durch eine deutlich höhere Variabilität und durch einige herausragende „klimatische Ereignisse“ gekennzeichnet gewesen zu sein. Zugleich mit diesen Vorstellungen die für die nördlichen höheren und mittleren Breiten und deren Ozeane gelten, haben sich auch neue Erkenntnisse über die Rolle der tropischen Ozeane im Hinblick auf einen möglichen Klimawechsel ergeben. Dies ist umso überraschender, als die Tropen bisher selbst während Zeiten starker Umbrüche in höheren Breiten als eine Region stabiler Klimaverhältnisse angesehen wurden. Sollten diese Erkenntnisse daher bestätigt werden, würde dies erheblichen Einfluss auf unsere Sichtweise der globalen Mechanismen nehmen. Ebenso hat sich im Hinblick auf die Frage nach einem global synchronen Verlauf von Klimaänderungen eine intensive Diskussion entwickelt, deren Beantwortung im Hinblick auf die möglichen Steuermechanismen von entscheidender Bedeutung ist. Zudem werden einige klimatische Steuerfaktoren neuerdings vor dem Hintergrund aktueller Erkenntnisse kontrovers diskutiert. Bisher haben wir keine ausreichenden Erkenntnisse über die Ausmaße dieser internen Rückkopplungen, die ihrerseits wiederum möglicherweise durch eine Veränderung von Ökosystemen beeinflusst werden. Die

neuere verwendete Fachliteratur ist in den gemeinsamen PROSIMUL Berichten und den entsprechenden Veröffentlichungen aufgelistet.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeiten konnten auf die in den aufnehmenden Institutionen vorhandenen Laboreinrichtungen aufbauen. Diese wurden entsprechend den Notwendigkeiten im Lauf der Projektlaufzeit erweitert oder fortentwickelt. Teilweise konnte an bereits laufende Untersuchungen angeknüpft werden. Es wurden keine speziellen Konstruktionen oder Schutzrechte für die Durchführung der Vorhaben genutzt. Als Informationsquellen wurden die zur Verfügung stehenden Bibliotheken bzw. on-line Bibliotheken sowie nationale und internationale Datenbanken genutzt (PANGAEA, World Data Center for Paleoclimatology).

## **5. Zusammenarbeit**

Auf nationaler Ebene ist das Projekt PROSIMUL II und das Netzwerkprojekt PROSIMUL angebunden an das DFG Schwerpunktprogramm „Wandel der Geo-Biosphäre im Laufe der letzten 15.000 Jahre. Kontinentale Sedimente als Ausdruck sich verändernder Umweltbedingungen“ sowie an das HGF Projekt „Natürliche Klimavariationen in historischen Zeiten bis 10.000 Jahre vor heute“. International hat das Projekt zum IGBP-PAGES Transekt PEP III (Europa-Afrika) und zum CLIVAR-PAGES Programm beigetragen. Eine enge Kooperation sowohl mit dem European Lake Drilling Programme (ELDP), dem Asian Lake Drilling Programme (ALDP) als auch mit der PAGES ISOMAP Initiative wurde angestrebt. Insgesamt wurden Zusammenarbeiten mit führenden nationalen und internationalen Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Klimatologie und Paläoklimatologie fortgeführt bzw. aufgebaut.

**Berichtsteil II:**  
**Eingehende Darstellung der Ergebnisse**  
**PROSIMUL II**  
**und**  
**Netzwerkprojekt PROSIMUL**

## DEKLIM ABSCHLUSSBERICHT

### Stabile Isotope in hochauflösenden Sedimenten von Kraterseen als Ausdruck der Klimavariabilität (PROSIMUL II)

**Zuwendungsempfänger:**  
Forschungszentrum Jülich GmbH

**Förderkennzeichen:**  
01LD0001

**Vorhabensbezeichnung:**  
Stabile Isotope in hochauflösenden Sedimenten von Kraterseen als Ausdruck der  
Klimavariabilität (PROSIMUL II)

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.07.2001 bis 30.06.2006



**Berichtszeitraum:**  
01.07.2001 bis 30.06.2006

**Ausführende Stelle:**

PI: Dr. Andreas Lücke  
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre V: Sedimentäre Systeme (ICG V)  
Forschungszentrum Jülich  
52425 Jülich

#### Wichtigste Ergebnisse des Vorhabens (Zusammenfassung in Stichworten)

- Stabile Isotope der organischen sedimentären Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) sind als Proxies für die lakustrine Primärproduktion einzusetzen.
- Kalibration des  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Paläothermometers im Freilandexperiment für die quantitative Temperaturrekonstruktion wurde erfolgreich durchgeführt.
- Differenzierte Reaktion unterschiedlicher sedimentärer Archive auf identisches klimatisches Forcing konnte gezeigt und interpretiert werden.
- Ausgeprägte Variationen der Klimabedingungen im Holozän mit transienten Veränderungen z.B. des Wärmetransports auf die Kontinente zwischen 6.000 und 5.000 YBP sowie zyklischen Komponenten, z.B. Perioden von 340 und 1.600 Jahren, die auf solaren Einfluss schließen lassen, wurden aufgezeigt.
- Klimatische Veränderungen im Bodenseeraum nach 6.000 YBP führten zum Auftreten hydrologischer Extremereignisse und deuten regional differenzierten Klimawandel im Holozän an.
- Klimaänderungen im Spätglazial führten zu einer ausgeprägten Veränderungen im saisonalen Temperaturjahresgang während der Jüngeren Dryas in Europa mit relativ warmen Sommern und deutlicher Abkühlung im Winter.

#### 1. Darstellung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Die Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse von PROSIMUL II wird entsprechend den im Projekt bearbeiteten Standorten sowie den entsprechenden technischen Entwicklungen vorgenommen. Die Zusammenschau der Ergebnisse und die Darstellung der übergeordneten wissenschaftlichen Aspekte in Bezug auf das Gesamtprojekt erfolgt im Wesentlichen im Bericht zur Netzwerk-Nachwuchsgruppe.



## ***1.1 Aktuelle Prozessstudien am Holzmaar (Eifel, Deutschland)***

### ***1.1.1 Stabile Isotope organischen Materials als Paläoklimaindikatoren***

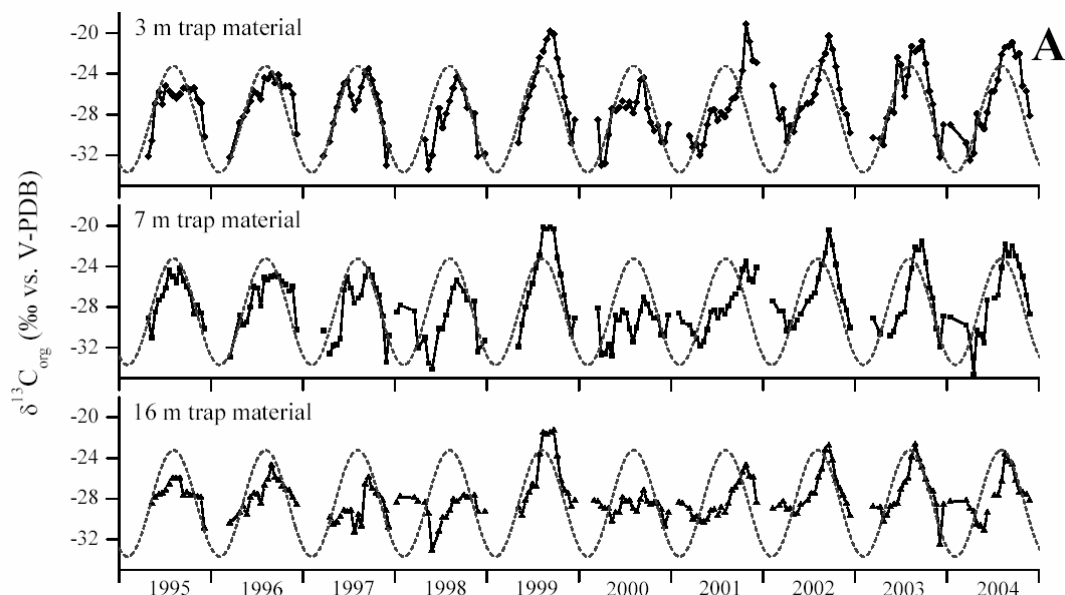
*Fragestellung* – Die Isotopenzusammensetzungen des organischen Kohlenstoffs ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) und des Gesamtstickstoffs ( $\delta^{15}\text{N}$ ) lakustriner Sedimente werden für die Rekonstruktion der lakustrinen Primärproduktion durch Algen verwendet. Es sollte anhand von Untersuchungen im heutigen See geklärt werden, inwieweit diese Parameter neben einer qualitativen Abschätzung auch eine quantitative Rekonstruktion der lakustrinen Primärproduktion kleiner Seen und, darüber hinaus, eine Aussage über die Temperaturbedingungen während der limnischen Vegetationsperiode erlauben.

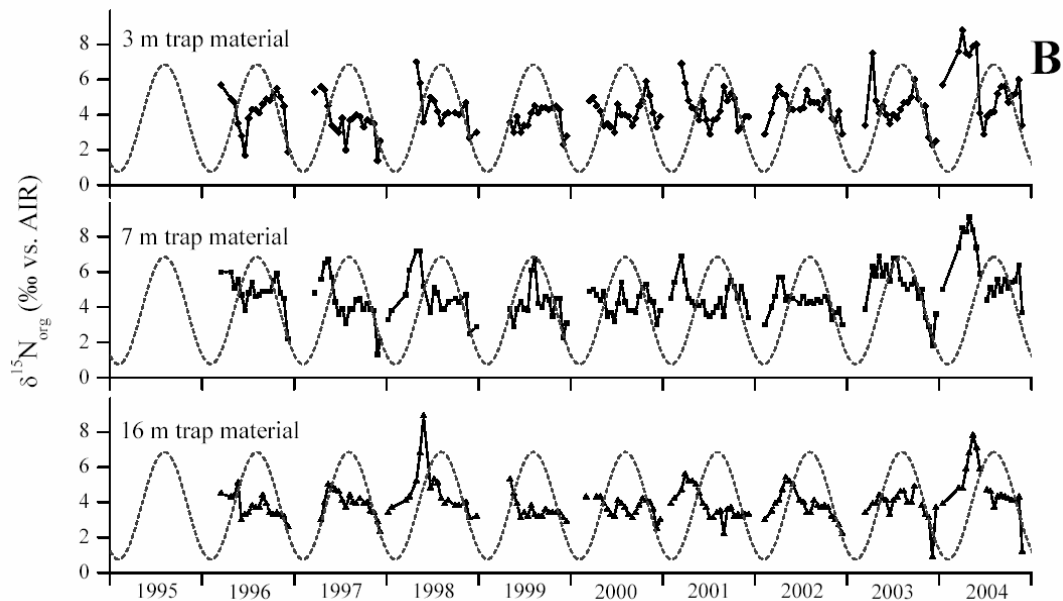
*Arbeiten und Resultate* – Im Zuge dieser Aufgabenstellung wurde eine bereits seit 1995 laufende Sedimentfallenuntersuchung am Holzmaar in den Jahren 2001 – 2004 fortgeführt. Dabei wurden Sedimentfallen in unterschiedlichen Tiefen sowohl in der Produktionszone (Epilimnion: 3m, 7m) als auch in der Ablagerungszone (Hypolimnion: 16m) im 20m tiefen Holzmaar ausgebracht. Die Beprobung der Sedimentfallen erfolgte 14-tägig und wurde begleitet von einem intensiven limnologischen und hydrochemischen Messprogramm (Wassertemperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, gelöste Nährstoffe, gelöste Hauptelemente). Die jeweiligen Sedimentmengen pro Falle wurden zur Ermittlung der Fluxraten quantifiziert. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Elementgehalte sowie der Isotopenzusammensetzung des organischen Kohlenstoffs und des Gesamtstickstoffs.

Ausgewählte Ergebnisse aus den Sedimentfallen im Epilimnion (3m, 7m) sowie der Sedimentfalle im Hypolimnion (16 m) sind in Abbildung 1 dargestellt. Die markanteste Variation in der Mehrzahl der Parameter wird Erwartungsgemäß durch den klimatischen Jahresgang geprägt. Dies wird insbesondere im Kohlenstoffgehalt des partikulären Materials (TOC) als und an der Isotopenzusammensetzung des organischen Kohlenstoffs ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) deutlich. Ein vergleichbares Bild ergibt sich für die Sedimentfalle im Hypolimnion (16m). Hier fallen zusätzlich ausgeprägte Schwankungen der Sedimentakkumulationsraten auf. In allen Fallen zeigen die C/N Verhältnisse, die als Zeiger für wechselnde Quellen organischen Materials zu interpretieren sind, eine auffallend geringe Variationsbreite und unterliegen keinem jahreszeitlichen Muster.

*Interpretation* – Eine der primären Fragen für die Interpretation von  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Zeitreihen aus sedimentären Archiven ist die Herkunft des sedimentären organischen Materials, da sich beispielsweise terrestrische und lakustrine Quellen isotopisch unterscheiden. Diese Frage kann aufgrund der C/N Werte des Fallenmaterials für das Holzmaar zweifelsfrei beantwortet werden. Die bis auf wenige Ausnahmen geringe Variationsbreite der C/N Werte schließt einen wesentlichen Wechsel in den Quellen aus. Auch das Fehlen eines Jahresganges, in Zeiten geringer lakustriner Produktion würde man einen relativ höheren Anteil terrestrischen Eintrags mit hohen C/N Werten ( $>15$ ) erwarten, ist in dieser Hinsicht zu interpretieren. Über die Beobachtungsperiode errechnet sich für die ermittelten C/N Verhältnisse der 16 m Falle ein für algenbürtiges organischen Material typischer Mittelwert von 8 ( $n=171$ ). Damit konnte gezeigt werden, dass selbst in einem kleinen See (Durchmesser Holzmaar 350 m) der Eintrag terrestrischen organischen Materials als sehr gering anzusehen ist. Somit können die Isotopensignale des organischen Materials der holozänen und spätglazialen Sedimente der Eifelmaare als eindeutig autochthon (lakustrin) erzeugtes Umweltsignal interpretiert werden. Der saisonale Jahresgang der Primärproduktion im Holzmaar spiegelt sich sowohl in der Konzentration des organischen Kohlenstoffs im Fallenmaterial als auch deutlich ausgeprägt in den  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten wieder (Abb. 1). **Darin verdeutlicht sich der generelle positive Zusammenhang zwischen der Primärproduktion und den**

**Kohlenstoffisotopenverhältnissen des absinkenden Materials, der für die Paläointerpretation herangezogen werden wird.** Demgegenüber zeigen die Fluxraten ein uneinheitliches Bild, wobei insbesondere die 16 m Falle stark durch Resuspension von bereits sedimentiertem (altem) Material gestört wird. Im saisonalen Verlauf der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte zeigt sich ab dem Jahr 1999 ein deutlich verändertes typisches Muster. Die Mittelwerte der Produktionsphase (Mai-Oktober) sind generell erhöht und die maximalen Werte im Jahrgang sind mit bis zu  $-20.1\text{‰}$  gegenüber der Periode 1995-1998 stark angereichert. Primär kann das auf eine verbesserte Verfügbarkeit des Nährstoffs Phosphor zurückgeführt werden, da die Phosphatkonzentrationen im Frühjahr in den Jahren 1999 bis 2004 im Mittel um 80 % über den entsprechenden Konzentrationen der Vorjahre liegt. Ein direkter Einfluss der Wassertemperaturen auf die Kohlenstoffisotopie des organischen Materials konnte nicht nachgewiesen werden, da sich die Schwankungsbreite der Temperatur im Beobachtungszeitraum als zu gering erwiesen hat. Aufgrund zunehmend verringerter Wintertemperaturen deutet sich jedoch ein Zusammenhang zwischen der Länge der lakustrinen Vegetationsperiode, der Dauer der sommerlichen Stagnation und den entsprechenden  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten an. Demgegenüber zeigen die Stickstoffisotopenwerte ( $\delta^{15}\text{N}$ ) in allen Fällen (3 m, 7 m, 16 m) ein deutlich uneinheitlicheres Bild und spiegeln aktuell nicht die Veränderungen in der lakustrinen Primärproduktion wieder. Offenbar ist, unter dem heutigen menschlichen Einfluss, die Verfügbarkeit des Nährstoffs Stickstoff im Holzmaar mit epilimnischen Nitratkonzentration von im Mittel  $18,3\text{ mg/l}$  (1994-2004) ausgesprochen günstig. Damit kommt es im Verlaufe des Biomasseaufbaus der Algen während der Wachstumsperiode nicht zu einer Veränderung der Isotopenfraktionierung aufgrund der zunehmenden Ausschöpfung des anorganischen Stickstoffpools.





**Abb. 1:** Die saisonalen Isotopenvariationen im partikulären organischen Material im Wasserkörper des Holzmaares in der Periode 1995 bis 2004 ermittelt über eine Sedimentfallenstudie (14-tägige Auflösung). (a) Kohlenstoffisotopenvariationen ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) im Epilimnion in 3 m und 7 m Tiefe und im Hypolimnion in 16 m Tiefe. Gestrichelte Linie gibt den idealisierten Jahrgang der Wassertemperatur an. (b) Stickstoffisotopenvariationen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) im Epilimnion in 3 m und 7 m Tiefe und im Hypolimnion in 16 m Tiefe. Gestrichelte Linie gibt den idealisierten Jahrgang der Wassertemperatur an.

Moschen, R., Lücke, A., Schleser, G.H., Parplies, J.: Seasonal and interannual variations of the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of sinking particulate organic matter in Lake Holzmaar, Germany: Reliable recorders of autochthonous primary productivity and environmental conditions? *Limnology and Oceanography* (submitted).

Messyasz, B., Lücke, A., Moschen, R., Schleser, G.H., Seasonal changes in the vertical distribution of phytoplankton communities in the volcanic crater Lake Holzmaar, Germany. *Archiv für Hydrobiologie* (in review).

### 1.1.2 Temperaturabhängigkeit von $\delta^{18}\text{O}$ Werten biogenen Opals

*Fragestellung* – Aus den vorliegenden Kalibrationsstudien für das Opal-Paläothermometer, das für die Temperaturrekonstruktion aus Seesedimenten zunehmend an Bedeutung gewinnt, ergibt sich eine Schwankungsbreite für den Temperaturgradienten zwischen  $-0.2\text{‰}/1^\circ\text{C}$  und  $-0.5\text{‰}/1^\circ\text{C}$ . Da auf dieser Basis keine quantitative Rekonstruktion möglich ist, sollte erstmals eine Kalibrationsstudie direkt in einem Süßwassersee durchgeführt werden.

*Arbeiten und Resultate* – Im Jahr 2001 wurden zusätzliche Sedimentfallen in unterschiedlichen Tiefen im Holzmaar ausgebracht (s.o.), um ausreichend Material für die notwendige Opalisotopenanalyse zu gewinnen. Zusätzlich erfolgten 14-tägige Messungen der Wassertemperatur und parallel wurden in einem Tiefenprofil alle 2 m Wasserproben gewonnen, um den Sauerstoffisotopenquellwert des Wassers exakt zu bestimmen. Die Extraktion des Opals (Diatomeenschalen) aus dem Gesamtsediment der Fallen aus den drei Tiefen erfolgte mit der in Jülich neu entwickelten SPLITT-Methode, die es erlaubt eine sehr reine und quantitative Separation von Diatomeenschalen durchzuführen. Zusätzlich werden bei diesem Verfahren die Schalen der Diatomeen in drei Größenklassen sortiert, was auch eine Beurteilung von artabhängigen Fraktionierungseffekten ermöglicht. Der anschließende Aufschluss des Opals erfolgte mit dem neu entwickelten iHTR Verfahren, das die präzise



Daraus ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Sauerstoffisotopenfraktionierung und Wassertemperatur eine streng lineare Beziehung, die in allen drei untersuchten Größenklassen gleichermaßen vorhanden ist. Ebenso sind die jeweiligen Temperaturkoeffizienten innerhalb der Fehlergrenzen als identisch anzusehen. Aufgrund dieser Ergebnisse konnte erstmals gezeigt werden, dass die Isotopenfraktionierung bei der Bildung biogenen Opals nicht von biologischen Faktoren wie beispielsweise Konkurrenz abhängig ist, sondern ein rein isotopenphysikalischer Prozess zugrunde liegt. **Insgesamt ergibt sich für die aus dieser Studie ermittelte Isotopenfraktionierung eine Temperaturabhängigkeit von  $-0.2 \text{ ‰/°C}$  im natürlichen Temperaturbereich von  $4\text{°C}$ - $22\text{°C}$ .** Dieser Temperaturkoeffizient stimmt mit dem von Brandriss et al. (1998) im Labor ermittelten Koeffizienten überein. Hieraus wird deutlich, dass bisherige angewandte Arbeiten den Temperaturkoeffizienten deutlich überschätzt und damit eine zu geringe Änderung der Temperatur angenommen haben. Durch die hier vorliegende Arbeit konnte erstmals gezeigt werden, dass der Temperaturkoeffizient für die Sauerstoffisotopenfraktionierung beim Aufbau biogenen Opals tatsächlich bei  $-0.2 \text{ ‰/°C}$  liegt.

Moschen, R., Lücke, A., Schleser, G.H. (2005). Sensitivity of biogenic silica oxygen isotopes to changes in surface water temperature and palaeoclimatology. *Geophysical Research Letters* 32, L07708, doi:10.1029/2004GL022167.

Moschen, R., Lücke, A., Parplies, J., Radtke, U., Schleser, G.H. (2006). Transfer of oxygen isotope signals during settling and sedimentation of diatom valves in a temperate freshwater lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4367-4379.

### **1.1.2. Untersuchungen an holozänen und spätglazialen Sedimentarchiven**

#### **1.1. Sedimentarchiv Holzmaar (Eifel, Deutschland)**

*Fragestellung* – Die zentrale Aufgabenstellung in diesem Arbeitspaket galt dem Ausmaß und dem zeitlichen Verlauf von Klimaänderungen im Holozän in Europa sowie der Klimavariabilität auf verschiedenen Zeitskalen.

*Arbeiten und Resultate* – Im Zuge der Aufgabenstellung waren zeitlich hochauflösende und kontinuierliche Zeitreihen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenzusammensetzung an den warvendatierten Sedimenten des Holzmaars zu erstellen. Hierzu wurde die bereits vorliegende  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Datenreihe (Kern HZM2) durch die zusätzliche Analyse einiger hundert Proben vervollständigt. Insbesondere für den Anschluss an die Gegenwart konnten dazu neue Kurzkerne aus dem Holzmaar (Kern HZM41/42) herangezogen werden. Die Analyse der ca. 1100 Proben umfassenden Serie bezüglich der Stickstoffisotopenzusammensetzung erforderte zunächst eine Verbesserung des analytischen Systems. Um den notwendigen Probendurchsatz zu erreichen wurde ein spezieller Probengeber installiert, der die für Stickstoff notwendigen großen Einwaagen fassen konnte. Zudem war es notwendig das Signal zu Rausch Verhältnis zu verringern, um die analytische Präzision der Messungen zu erhöhen. Um dies zu erreichen wurde eine sogenannte Argonhaube konstruiert und installiert, die über eine zusätzliche Spülung des Probengebers mit Argon das Eindringen von Luftstickstoff in das analytische System verhindert. Damit steht ein zuverlässiges System zur routinemäßigen Analytik der Isotopenzusammensetzung organischen Materials zur Verfügung, welches es erlaubt die für die Zeitreihenanalytik benötigten kontinuierlichen Zeitreihen mit entsprechenden hohen Probenzahlen zu erzeugen.

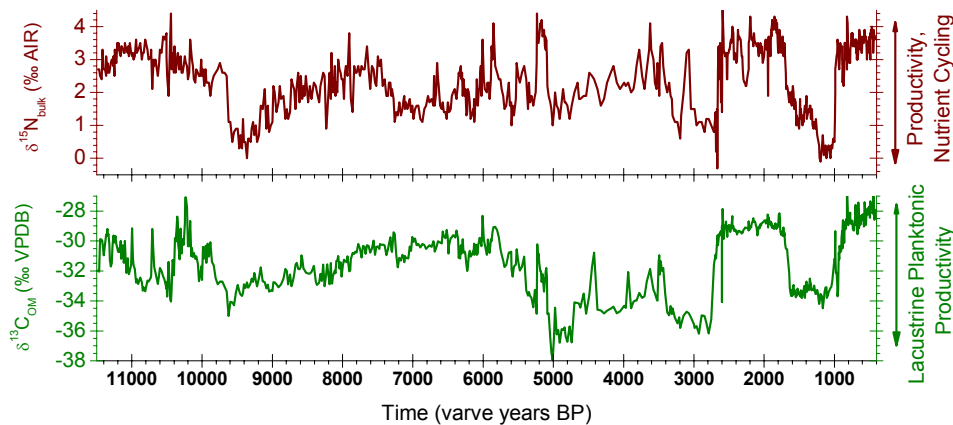
Ergänzend dazu wurden Untersuchungen der Sauerstoffisotopie an den Holzmaarsedimenten durchgeführt. Da in den Sedimenten keine karbonatischen Materialien erhalten sind, mussten andere Substanzen und neuartige Verfahren herangezogen werden. Hierbei handelt es sich einerseits um die sedimentäre Zellulose (s.u.) und andererseits um den von Diatomeen

gebildeten Opal. Aufgrund des hohen präparativen Aufwandes für die Extraktion bzw. Separation dieser Substanzen aus dem Gesamtsediment musste hier eine Einschränkung der Probenzahl erfolgen. Die Arbeiten in diesem Bereich konzentrierten sich daher auf den Abschnitt des mittleren Holozäns von ca. 6.500 – 4.500 YBP (cal. Jahre vor heute (1950)). Die Ergebnisse zeigen in annähernd allen untersuchten Parametern markante Variationen. Im Verlaufe des Holozän treten sehr starke Konzentrationsschwankungen der Elemente Kohlenstoff- und Stickstoff im Sediment auf, die jedoch primär durch Änderungen der Sedimentationsraten hervorgerufen sind. Demgegenüber sind die Variationen der C/N Verhältnisse mit einer Spannbreite im Wesentlichen zwischen 7 und 13 als relativ konstant anzusehen. Dem stehen ausgeprägte Variationen der stabilen Isotopenverhältnisse dieser Elemente gegenüber, wobei die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte sich im Bereich von -36 ‰ bis -28 ‰ bewegen und  $\delta^{15}\text{N}$  zwischen 0 ‰ und +4 ‰ variiert.

*Interpretation* – Aufgrund den Erkenntnissen aus der Rezentstudie sowie den mit auf weiten Strecken deutlich unter -28 ‰ liegenden Kohlenstoffisotopensignaturen der sedimentären organischen Substanz, kann davon ausgegangen werden, dass die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte des Holzmaares im Wesentlichen durch die lakustrine Primärproduktion geprägt worden sind. Dabei ist von einer positiven Korrelation auszugehen, sodass höhere Isotopenwerte auch höhere Primärproduktion indizieren. Der mögliche Signalanteil von eingetragendem terrestrischem organischem Material kann einerseits als relativ stabil angesehen werden und tritt andererseits gegenüber dem autochthon gebildeten organischen Material relativ zurück. Da jedoch auch die C/N Verhältnisse von Algen entsprechend der Nährstoffverfügbarkeit variabel sind, erlauben die C/N Werte keine quantitative Abtrennung des allochthonen Signalanteils der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte. Für die Variationen des  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Signals, und damit für die Algen-Primärproduktion, auf Skalen von Dekaden und größer sind neben der Verfügbarkeit von anorganischen Nährstoffen primär die jeweiligen klimatischen Randbedingungen aus Einstrahlung, Temperatur und Saisonalität verantwortlich. Diese Faktoren sind auch für die Mobilität und den Transport von partikulär gebundenen oder gelösten Nährstoffen aus dem Einzugsgebiet in den See verantwortlich, wobei zusätzlich die Niederschlagsmenge und die Niederschlagsverteilung zu berücksichtigen sind. Die durch das  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Signal angezeigten wesentlichen klimatischen Systemveränderungen treten um 9.600, 5.000, 2.700 und 1.600 YBP auf (Abb. 3). Damit zeigt sich, dass die von anderen Autoren beispielsweise für die nördliche Sahara beschriebenen klimatischen Veränderungen auch für Mitteleuropa von Bedeutung waren. Insgesamt ist also auch für Mitteleuropa keineswegs von einem klimatisch stabilen Holozän auszugehen, vielmehr treten innerhalb der Randbedingungen einer Warmzeit deutliche klimatische Veränderungen auf. In Bezug auf die ab 2.700 YBP detektierten Umstellungsphasen im Holzmaar ist festzuhalten, dass nicht eindeutig zwischen natürlichen Faktoren (Klima) und menschlichem Einfluss unterschieden werden kann.

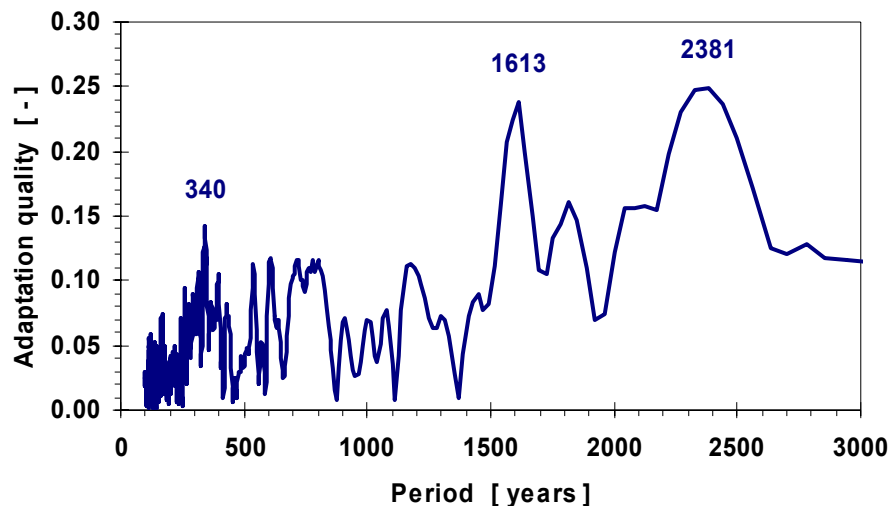
Diese Interpretation wird gestützt von den Variationen der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte in den Sedimenten des Holzmaares. Auch diese sind grundsätzlich als Proxyparameter für die lakustrine Primärproduktion anzusehen. Im deutlich anders geprägten Varianzverhalten der  $\delta^{15}\text{N}$  gegenüber den  $\delta^{13}\text{C}$  Werten spiegeln sich Unterschiede sowohl im Metabolismus bzw. dem Bedarf der Primärproduzenten für den jeweiligen Nährstoff wieder. Für den Stickstoffhaushalt im See bzw. dessen Verfügbarkeit im Epilimnion sind jedoch auch andere, seeinterne Prozesse wie Remineralisierung oder Mischungsverhalten von herausragender Bedeutung. In der  $\delta^{15}\text{N}$  Zeitreihe bestätigen sich die aus der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  abgeleiteten klimatischen Veränderungen, die hier jedoch ergänzt werden durch eine markante Umstellung des Systems um 7.400 YBP. Insbesondere für den ausgeprägten Abfall der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte zwischen 6.000 und 5.000 YBP, aber auch für die Phasen um 9.600 und 2.700 YBP, kann ein Zusammenhang zum Overturning Verhalten des Atlantiks vor den britischen Inseln (Oppo et al., 2003) aber auch zu den Bond et al. (2001) beschriebenen IRD Events im Atlantik

nachgewiesen werden. Das heißt, hierbei handelt es sich um ein natürliches großräumiges wahrscheinlich nordhemisphärisches Klimaphänomen dessen Auswirkungen eben auch auf dem europäischen Kontinent nachhaltig spürbar wurden. **Die vorhandenen Evidenzen deuten auf eine Verminderung des Wärmetransportes auf den Kontinent und damit auf eine Abkühlung in Europa hin, die sich relativ langsam im Verlaufe von einem Jahrtausend, zwischen 6.000 und 5.000 YBP, manifestierte.** Weitere Evidenzen, beispielsweise Sedimentationsraten, deuten darauf hin, dass damit auch eine Verringerung oder eine Veränderung der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge in Europa einherging.



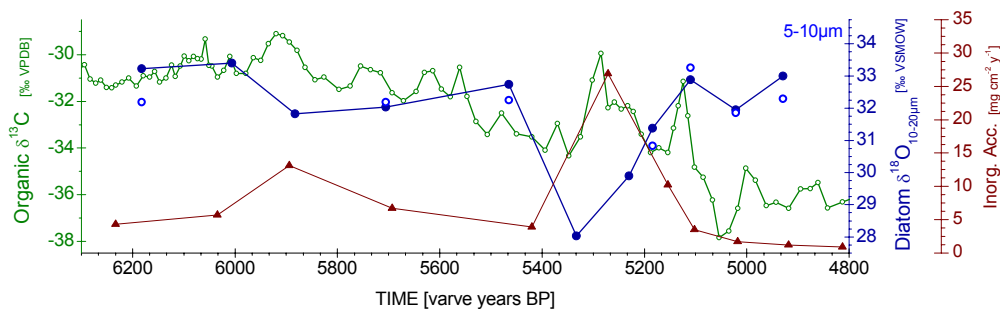
**Abb. 3:** Variationen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenverhältnisse ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ) im Holzmaar im Verlaufe des Holozän. Markante Veränderungen in der Isotopie sind bei 9.600, 5.500, 2.700 und 1.600 YBP zu erkennen und treten synchron mit Veränderungen der Ozeanzirkulation im Atlantik auf.

Zeitreihenanalytische Untersuchungen ermöglichen die Bestimmung der Wiederkehrzeiten derartiger klimatischer Umstellungen und erlauben damit den Blick auf die wahrscheinlichen Ursachen für die Veränderungen im Holozän. Durch die entsprechenden Analysen für die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Zeitreihe im Zeitfenster 11.000-1.000 YBP konnten Perioden von 890, 1.790 und 2.780 Jahren identifiziert werden. Diese sind aufgrund der die Analyse stark beeinflussenden „Isotopensprünge“ jedoch nur relativ unscharf abgebildet. Auch deutet sich beispielsweise bereits in der Originalreihe sichtbar ein Phasensprung von einer Periode von etwa 1.400 Jahren im frühen Holozän auf eine Periode von etwa 1.800 Jahren im späten Holozän an. Demgegenüber ergaben sich bei der Analyse der  $\delta^{15}\text{N}$  Zeitreihe wesentlich signifikantere Perioden. Hier konnten für den gleichen Zeitraum Zyklen von 340, 1.613 und 2.380 Jahren identifiziert werden (Abb. 4). Zyklen mit einer Dauer von 1.600 und 2.400 Jahren konnten bereits von anderen Autoren nachgewiesen werden und wurden dort als Nachweis des solaren Einflusses auf das Klima interpretiert (Bond et al., 2001; Charvatova, 2000). Gleiches gilt für eine Zyklusdauer von 360 bzw. 1.800 Jahren, für die von Keeling et al. (2000) eine luni-solare Kopplung mit dem Tidenhub und damit mit der Oberflächenzirkulation der Ozeane postuliert wird. Damit konnten klare Hinweise auf die Bedeutung des solaren Forcings für das Klimasystem im Holozän erarbeitet werden. Als nach wie vor offen muss jedoch die Frage nach der Quantifizierung sowie nach der Art und Weise der Ankopplung, etwa rein physikalisch oder biologisch gekoppelt über UV, angesehen werden.



**Abb. 4:** Nicht-lineare Spektralanalyse der holozänen  $\delta^{15}\text{N}$  Zeitreihe aus dem Holzmaar im Zeitfenster von 11.000 bis 1.000 YBP. Signifikante Spektrallinien treten bei 340, 1.613 und 2.381 YBP auf. Das 90 % Signifikanzniveau liegt bei  $r=0,129$ .

Ergänzend zu diesen kontinuierlich durchgeführten Untersuchungen ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) wurden an ausgewählten diskontinuierlichen Probensätzen aus dem mittleren Holozän Sauerstoffisotopenuntersuchungen durchgeführt, um der Hypothesen von Veränderungen im Wasserkreislauf im Zuge der Klimaverschlechterung zwischen 6.000 – 5.000 YBP nachzugehen. Die Sauerstoffisotopenwerte des biogenen Diatomeenopals ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$ ) in der Größenfraktion 10-20 $\mu\text{m}$  zeigen ein ausgeprägtes Minimum bei 5.300 YBP (Abb. 5).



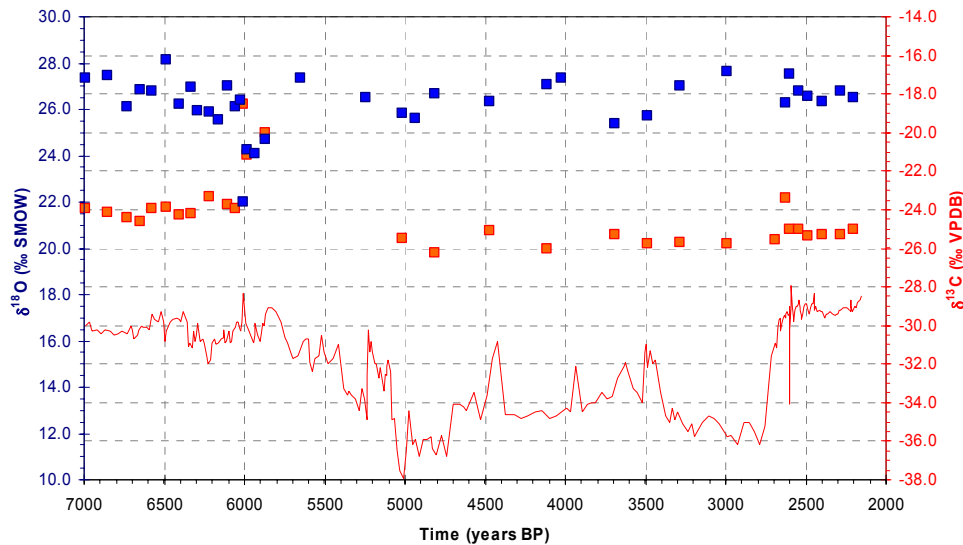
**Abb. 5:** Die Entwicklung der Sauerstoffisotope biogenen Opals ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$ ; Fraktionen 10-20 $\mu\text{m}$  (geschlossene Kreise) und 5-10 $\mu\text{m}$  (offene Kreise)) aus dem Holzmaar im mittleren Holozän. Die Akkumulationsraten des anorganischen Materials (Inorg. Acc.) zeigen im Isotopenminimum ein ausgeprägtes Maximum. In diesem Maximum der Akkumulationsraten manifestiert sich eine Veränderung im Abflussverhalten des Oberflächenabflusses (höhere Transportkapazität) in dieser Phase. Zum Vergleich sind die entsprechenden  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte des Holzmaares dargestellt.

Demgegenüber treten die sonstigen Variationen zurück und bewegen sich zumeist innerhalb der analytischen Unsicherheit von 0.5 ‰ (1STD). Auffallend ist, dass die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Werte sehr gut mit der anorganischen Sedimentakkumulationsrate korrelieren ( $r=-0.78$ ), wobei das Isotopenminimum mit dem Akkumulationsratenmaximum zusammenfällt. Eine Kontamination der extrahierten Opalfraction mit Mineralpartikeln, die einen solchen Zusammenhang erklären würde, kann ausgeschlossen werden. Ebenso ausgeschlossen werden kann eine Interpretation als Wassertemperatursignal, da dies bei Anwendung des



entsprechenden Temperaturkoeffizienten von  $-0,2 \text{ ‰/°C}$  zu unrealistisch hohen Temperaturänderungen führen würde. Es ist daher von Quellwertveränderungen in der Isotopenzusammensetzung des Seewassers als Ursache für die beobachtete Isotopenschwankung auszugehen. Als Ursache hierfür ist eine Kombination unterschiedlicher Faktoren als am Wahrscheinlichsten anzunehmen. Höhere Niederschläge, insbesondere im Winter, würden erstens zu einer erhöhten Abflussbildung und damit zu einer verringerten Wassererneuerungszeit im Holzmaar führen. Zudem würde sich der Isotopenquellwert des zufließenden Niederschlages aufgrund geringerer Kondensationstemperaturen oder aber einer veränderten Herkunftsregion der Feuchtigkeitsbringenden Luftmassen ändern. Gemeinsam mit einem deutlich erhöhten Abfluss könnte dies zu einer Abreicherung des schweren  $^{18}\text{O}$  Isotops und entsprechend abgereicherten Isotopenverhältnissen im Wasser des Holzmaares führen.

Parallel zum Opal wurden auch die Sauerstoffisotopenverhältnisse der sedimentären Zellulose ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$ ) unter Nutzung einer optimierten Extraktionsmethode (s. Kapitel 1.7) bestimmt. Da die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Werte keiner temperaturbedingten Isotopenfraktionierung unterliegen, können sie direkte Informationen über die Veränderungen des Isotopenquellwertes im Wasser liefern, die nicht über entsprechende Untersuchungen am Diatomeenopal gewonnen werden können. Derartige Untersuchungen an der sedimentären Zellulose sind daher im Hinblick auf die Detektion hydrologischer Veränderungen und deren Separation von reinen Temperaturveränderungen unabdingbar. Die ermittelten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Werte bewegen sich, mit einer Ausnahme, innerhalb einer Spannbreite von  $2 \text{ ‰}$  um einen Wert von  $-27,0 \text{ ‰}$ . Die im Vergleich dazu relativ negativen Werte, die um 6.300 YBP auftreten, können eindeutig auf den Eintrag von Wasserpflanzenmaterial zurückgeführt werden. Damit zeigen die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Signaturen entgegen der Arbeitshypothese, die von einer deutlichen Veränderung des Quellwertes im mittleren Holozän ( $\sim 5.500$  YBP) ausgegangen war, keine signifikante Veränderung (Abb. 6). Die unterschiedliche Reaktion der beiden Sauerstoffisotopenreihen um 5.300 YBP kann mit den vorliegenden Evidenzen nicht geklärt werden. **Es ist aber festzuhalten, dass für den Zeitraum 6.000 bis 5.000 YBP keine nachhaltige Veränderung der Sauerstoffisotopensignatur des Seewassers nachzuweisen ist. Damit kann für diesen Zeitraum nicht von einer deutlichen Veränderung im Wasserkreislauf ausgegangen werden.** Auffallend ist jedoch, dass in der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Zell}}$  Zeitreihe annähernd parallel zur Veränderung der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte um 5.500 YBP ein Shift um ca.  $2 \text{ ‰}$  hin zu negativeren Werten auftritt. Dies bestätigt die Ergebnisse der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Analysen und deutet ebenfalls auf eine Klimaverschlechterung in diesem Zeitraum hin (ein direkter Zusammenhang mit Vegetationsveränderungen kann aufgrund der Bewegungsrichtung zu negativeren Werten hin ausgeschlossen werden). Im Gegensatz dazu verhalten sich die Datenreihen von  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Zell}}$  und  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  für den Zeitraum um 2.700 YBP unterschiedlich, sodass hier mit dem Einsetzen der Einflussnahme eines zusätzlichen Faktors, wahrscheinlich dem Menschen, auszugehen ist.



**Abb. 6:** Variationen der Kohlenstoffisotopenverhältnisse von organischem Material (Linie) und sedimentärer Zellulose ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{Zell}}$ ) sowie die Sauerstoffisotopenzusammensetzung der sedimentären Zellulose ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$ ) für das mittlere Holozän. Im Gegensatz zu den  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten ist der Verlauf der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Zell}}$  Werte ausgesprochen ruhig. Die positive Exkursion bei 6.000 YBP ist durch den episodischen Eintrag aquatischer Makrophyten zu erklären, während der Isotopenshift zwischen 6.100 und 5.000 YBP wahrscheinlich klimatischen Ursprungs ist. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Werte zeigen eine geringe Schwankungsbreite ohne deutlichen Übergang. Die negative Exkursion bei 6.000 YBP ist analog zum  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  als Makrophyteneintrag zu interpretieren. Die Extraktionsausbeuten der Zellulose waren teilweise, insbesondere zwischen 6.000 und 3.500 YBP, zu gering für die Isotopenanalyse.

Lücke, A., Schleser, G.H., Zolitschka, B., Negendank, J.F.W. (2003). A continuous Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany. *Quaternary Science Reviews* 22, 569-580.

Fuhrmann, A., Fischer, T., Lücke, A., Brauer, A., Zolitschka, B., Horsfield, B., Negendank, J.F.W., Schleser, G.H., Wilkes H. (2004). Late Quaternary environmental and climatic changes in central Europe as inferred from the composition of organic matter in annually laminated maar lake sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5 (11), Q11015, doi: 10.1029/2004GC000763.

Kienel, U., Lücke, A., Dulski, P., Schwab, M.J., Vos, H., Nowaczyk, N.R., Lake-system response to variable climate and human activities since AD 1607: Sub-annually resolved element chemistry and geochemistry of organic matter from varved sediments (Lake Holzmaar, Germany). *Quaternary Science Reviews (in revision)*.

Parplies, J. (2004). Untersuchungen der stabilen Sauerstoffisotope an mittelholozänen Diatomeenschalen aus Sedimenten des Holzmaars, Westeifel. Universität zu Köln, unveröffentlichte Diplomarbeit, 75 S.

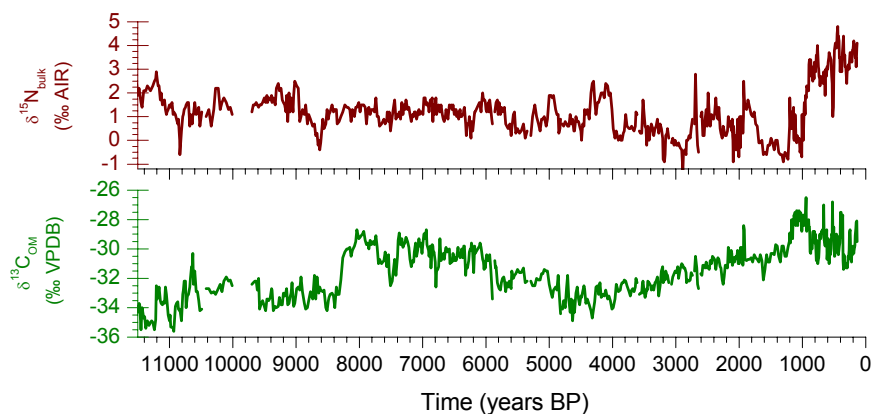
## 1.2. Sedimentarchiv Meerfelder Maar (Eifel, Deutschland)

**Fragestellung** – Im Rahmen dieser Arbeiten sollte untersucht werden, inwieweit Ergebnisse aus benachbarten Seen (Meerfelder Maar – Holzmaar) vergleichbar sind und sich damit auf die regionale Skala übertragen lassen. Darüber hinaus sollten speziell die spätglazialen Klimaänderungen im Fokus stehen.

**Arbeiten und Resultate** – Das holozäne und spätglaziale Sedimentprofil des Meerfelder Maars umfasst ca. 1100 Proben, die im Rahmen des Projektes vollständig analysiert wurden. Durchgeführt wurden Konzentrationsbestimmungen der Elemente Kohlenstoff und Stickstoff sowie die entsprechende Bestimmung der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  Werte. Daneben konnten sowohl C/N Verhältnisse als auch Sedimentakkumulationsraten ermittelt werden. Die Variationen der

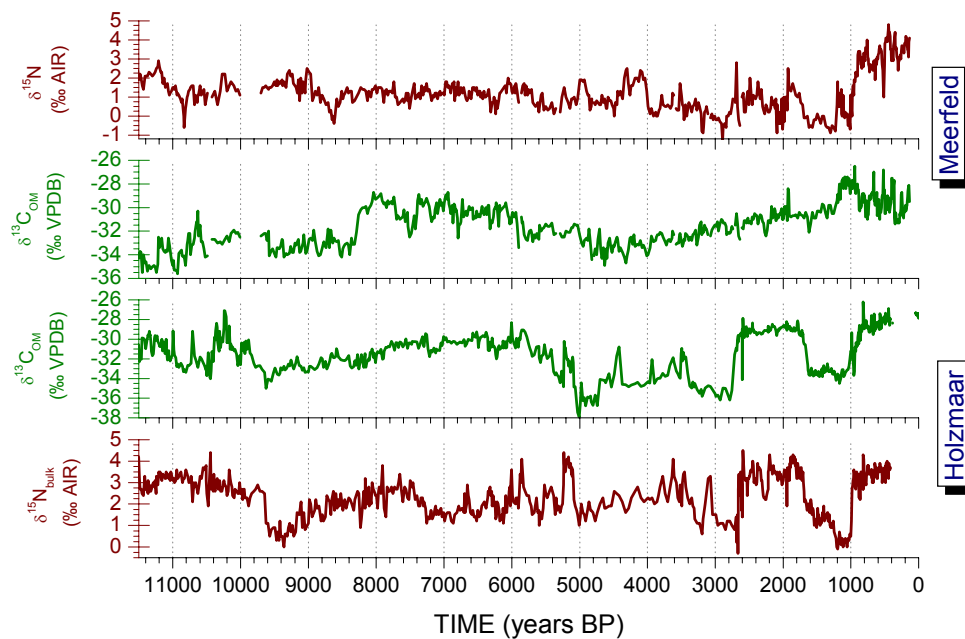
$\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte bewegen sich in einem Rahmen von -36 ‰ bis -27 ‰ während die entsprechenden Variationen von  $\delta^{15}\text{N}$  zwischen -1 ‰ und +5 ‰ liegen.

*Interpretation* – Die für das Meerfelder Maar ermittelten Absolutwerte und die Gesamtschwankungsbreite der Isotopenparameter  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  stimmen mit den entsprechenden Werten aus dem Holzmaarprofil überein. Auffällig ist der unterschiedliche Verlauf der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  Werte im Meerfelder Maar im Verlaufe des Holozän (Abb. 7).



**Abb. 7:** Variationen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenverhältnisse ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ) im Meerfelder Maar im Verlaufe des Holozän. Markante Veränderungen in der Isotopie sind bei 8.200, 4.900 und 1.200 YBP zu erkennen. Auffällig ist zudem die erhöhte Varianz der  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  Werte nach 5.800 YBP.

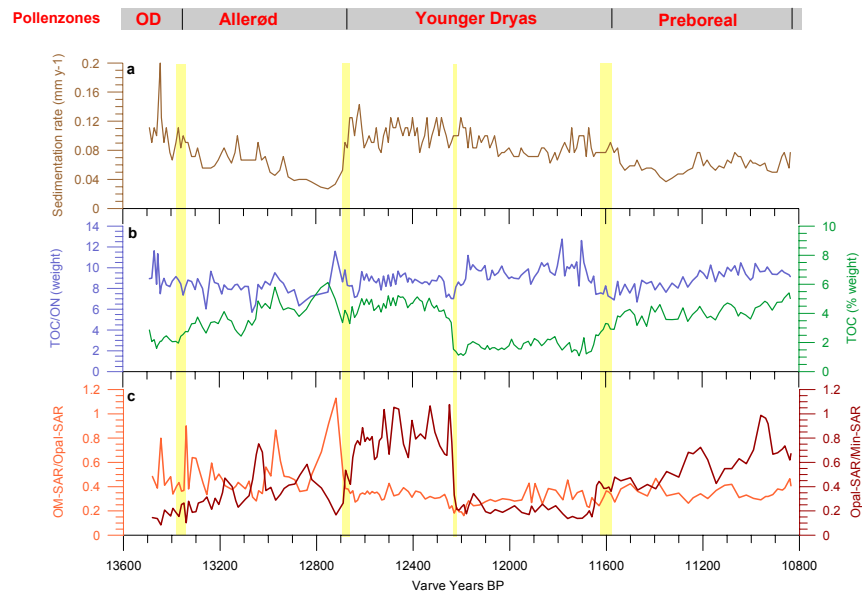
Entgegen den Befunden im Holzmaar, wo sich beide Isotope bezüglich der wesentlichen Veränderungen gleich verhalten, stellen sich die starken Veränderungen im Meerfelder Maar (8.200, 5.000 und 1.000 YBP) in den Isotopen unterschiedlich dar oder sind teilweise nicht erkennbar. Zumindest teilweise hierdurch bedingt fällt ein direkter Vergleich auf Basis der gemessenen Proxyparameter zwischen den Seen Holzmaar und Meerfelder Maar ausgesprochen schwer (Abb 8). Nichts desto trotz zeigt auch die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Zeitreihe des Meerfelder Maares, vergleichbar zum Holzmaar, ein ausgeprägtes Isotopenminimum um 4.700 YBP dessen Entwicklung bei 6.200 YBP einsetzt. Im Meerfelder Maar setzt die Bewegung aus diesem Minimum bei etwa 4.000 YBP mit einem deutlich erkennbaren positiven Trend ein. Dieser ist, wenn überhaupt, im Holzmaar nur andeutungsweise zu erkennen bzw. stark überdeckt durch die spätestens ab 2.700 YBP einsetzende sprunghafte Entwicklung der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte. Darüber hinaus fällt auf, dass die Varianz der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte des Meerfelder Maares insbesondere nach 5.000 YBP zunimmt und die Interpretation des vorangegangenen Millenniums als Umstellungsphase unterstützt. **Im Vergleich der beiden Seen zeigt sich damit, dass das Meerfelder Maar im Holozän wesentlich weniger sensitiv auf Umweltveränderungen reagiert als das Holzmaar.** Die beschriebenen Unterschiede zwischen den beiden Seen zeigen sich auch in den wesentlichen Frequenzbändern der Isotopenparameter. Für die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte des Meerfelder Maares ergaben sich Periodenlängen von 330, 890 und 1.100 Jahren, für die  $\delta^{15}\text{N}$  Serie ergaben sich Perioden von 280, 870 und 2.080 Jahren Länge. Lediglich die Perioden von 330 und 890 Jahren finden sich im Holzmaar ( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) wieder.



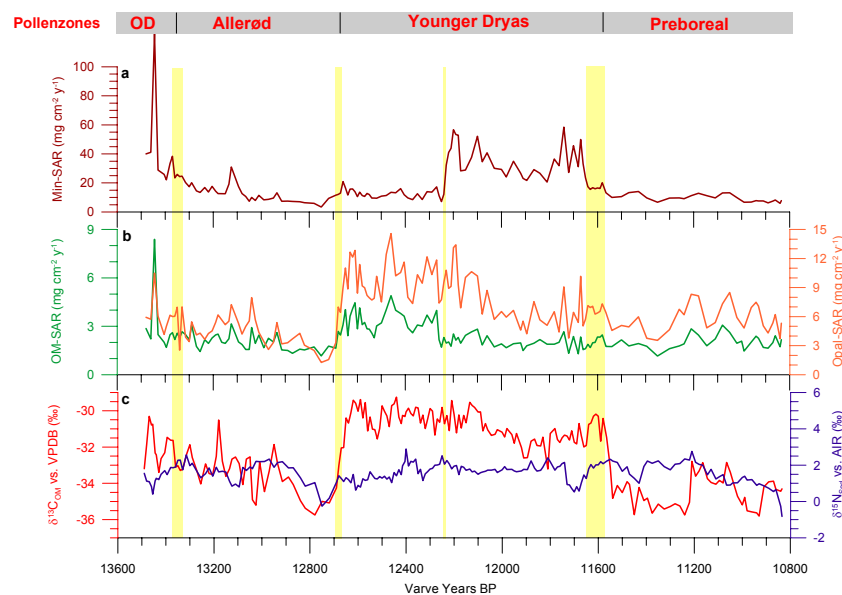
**Abb. 8:** Unterschiede in der Variabilität der Isotopenproxyparameter ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ) zwischen Meerfelder Maar und Holzmaar während des Holozän. Die unterschiedliche Reaktion auf identische Klimaantriebe ist durch die topographische Lage bedingt.

Dies ist nur durch die unterschiedliche Situation der beiden Seen in im Relief der Landschaftsoberfläche zu erklären. Hier führt offensichtlich die Lage des Holzmaares direkt auf der Eifelhochfläche zu einer wesentlich direkteren Ankopplung an die äußeren klimatischen Einflussfaktoren als das für das Meerfelder mit seiner Lage im geschützten Markkessel der Fall ist. Eine ähnliche Beobachtung trifft auch für den Zeitabschnitt des Spätglazials zu, für das sich allerdings das Meerfelder Maar als wesentlich sensitiveres Archiv im Vergleich zum Holzmaar herausgestellt hat. **Insgesamt lässt sich daraus folgern, dass der Nachweis eines Zusammenhangs für einen See oder für einen bestimmten Klimazustand (Isotopie – Produktion) nicht als alleiniger Beweis für die Existenz bzw. die notwendige Sichtbarkeit derselben Beziehung in einem anderen See oder in einem anderen Klimazustand herangezogen werden kann.** Zumindest ist von einer Variabilität in der Stärke und in der Art des Zusammenhangs mit der Zeit auszugehen. Dieser Befund sollte in der Anwendung statistischer Kalibrationsansätze für die quantitative Rekonstruktion mittels Proxyparametern aber auch für die Datenassimilation in globale Zirkulationsmodelle Berücksichtigung finden.

Zur Charakterisierung der klimatischen Veränderungen im Spätglazial, insbesondere der Jüngerer Dryas, wird hier lediglich das Meerfelder Maar herangezogen, da das Holzmaar aufgrund einer Schichtlücke sowie seiner geringen Sensitivität in diesem Zeitabschnitt hierfür als weniger geeignet einzustufen ist. Der in Zusammenarbeit mit Dr. Achim Brauer erstellte Multiparameter-Datensatz für das Spätglazial im Meerfelder Maar zeigt aufgrund seiner sehr hohen zeitlichen Auflösung die Veränderungen im Zuge der Jüngerer Dryas ausgesprochen deutlich (Abb. 9). Der Zeitraum der Jüngerer Dryas ist eindeutig durch seine gegenüber dem Allerød sowie dem Präboreal stark angereicherte  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte gekennzeichnet (Abb. 10).



**Abb. 9:** Spätglazial und frühes Holozän im Meerfelder Maar. (a) Sedimentationsrate, (b) Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) und das Kohlenstoff zu Stickstoffverhältnis (TOC/ON), (c) Verhältnis von organischem Material zu biogenem Opal (OM-SAR/Opal-SAR) und Verhältnis von biogenem Opal zu mineralogischer Substanz (Opal-SAR/Min-SAR). Gelbe Balken stellen Übergangszonen in der Mikrofazies dar.



**Abb. 10:** Spezifische Sedimentakkumulationsraten im Meerfelder Maar für das Spätglazial und das frühe Holozän differenziert nach (a) mineralogischem Material (Min-SAR) sowie (b) organischer Substanz (OM-SAR) und biogenem Opal (Opal-SAR). Im Vergleich dazu Veränderungen der Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenzusammensetzung ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Sed}}$ ) des organischen Materials. Gelbe Balken stellen Übergangszonen in der Mikrofazies dar.

Insbesondere zu Beginn und Ende der Jüngeren Dryas (12.680 – 11.560 YBP) treten sehr starke Isotopenveränderungen von mehreren Promille auf. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch in den Akkumulationsraten des organischen Kohlenstoffs und des biogenen Opals. Beide Parameter zeigen zumindest für den Großteil der Jüngeren Dryas Akkumulationsraten die im Maximum bis zu 10fach erhöhte Werte gegenüber der Periode vorher und nachher aufweisen. Zusammen genommen ergeben sich aus den biologischen und isotopischen Parametern deutliche Anhaltspunkte für relativ warme Sommer mit hoher Algenproduktivität, obwohl die Jüngere Dryas generell als Kaltphase angesehen wird. Dies deutet auf eine starke

Veränderung des saisonalen Temperatargegensatzes während der Jüngeren Dryas hin. Damit wäre die Jüngere Dryas nicht als eine Phase genereller Abkühlung einzustufen, sondern wäre durch nach wie vor warme Sommer aber eine starke winterliche Abkühlung gekennzeichnet. Die jeweiligen Veränderungen zwischen dem Allerød bzw. dem Präboreal und der Jüngeren Dryas sind durch eine ausgeprägte und rasche Reaktion geprägt. Der Übergang vom Allerød zur Jüngeren Dryas vollzieht sich in nur 20 Jahren, während sich der Übergang zum Präboreal in 60 Jahren vollzieht. Derartig schnelle klimatische Veränderungen, z.B. der Saisonalität, sind auch für menschliche Gesellschaften von außerordentlicher Bedeutung. Zeitreihenanalytische Untersuchungen zur weiteren Differenzierung zwischen unterschiedlichen Steuermechanismen erwiesen sich aufgrund der in den Daten auftretenden sprunghaften Veränderungen als wenig erfolgreich. Sie konnten nicht als Grundlage für belastbare Interpretationen herangezogen werden.

Erste Analyseergebnisse über  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Untersuchungen aus dem Meerfelder Maar geben Hinweise auf signifikante Variationen der Sauerstoffisotopie des biogenen Opals im Spätglazial. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass ein wahrscheinlicher Alterungsprozess nicht zu einer Zerstörung des primären Isotopensignals führt. Eine Unterstützung für diese noch nicht ausreichend abgesicherte Hypothese ergibt sich durch Ergebnisse von  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Untersuchungen am Soppensee, die im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt wurden. Auch hier konnte ein positiver Isotopenshift um mehr als 2 ‰ am Übergang Jüngere Dryas zum Präboreal nachgewiesen werden.

Lücke, A., Brauer, A. (2004). *Biogeochemical and micro-facial fingerprints of ecosystem response to rapid Late Glacial climatic changes in varved sediments of Lake Meerfelder Maar (Germany)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 211, 139-155.

Moschen, R., Lücke, A., Parplies, J., Radtke, U., Schleser, G.H. (2006). *Transfer of oxygen isotope signals during settling and sedimentation of diatom valves in a temperate freshwater lake*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4367-4379.

Klaassen, G. (2005). *The Late-Glacial – Holocene transition in Switzerland inferred from the oxygen isotope signal in diatom silica*. *Utrecht University, Master Thesis, pp30*.

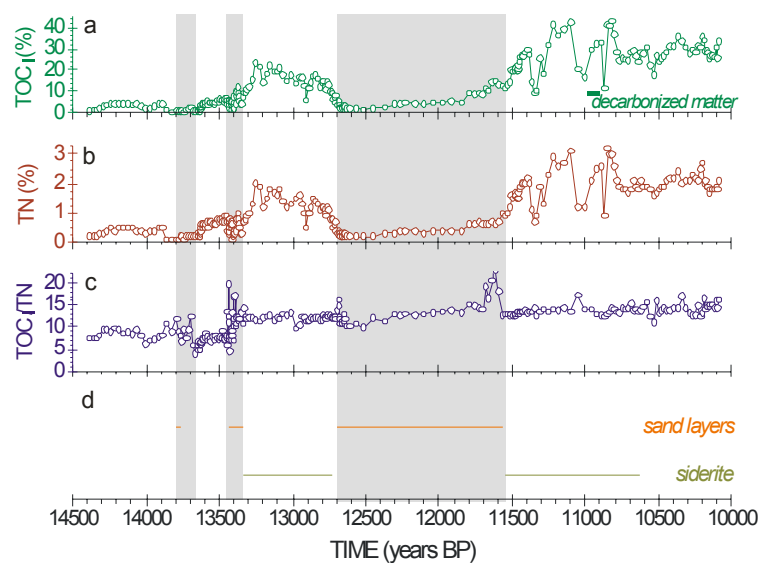
### 1.3. Sedimentarchiv Hämelsee (Niedersachsen, Deutschland)

*Fragestellung* – Die zentrale Aufgabenstellung dieses Arbeitspaketes lag in der Frage in wie weit der Befund aus dem Meerfelder Maar spätglaziale Klimaänderungen in einer größeren Region (Europa) repräsentiert.

*Arbeiten und Resultate* – Im Zuge dieser Arbeiten wurde ein warvendatiertes Sedimentprofil untersucht, das sich aus drei verschiedenen Sedimentkernen zusammensetzt. Hierin wird das Spätglazial durch ca. 280 Proben abgebildet. In einem dem Meerfelder Maar vergleichbaren Ansatz wurden Konzentrationsbestimmungen der Elemente Kohlenstoff und Stickstoff sowie die entsprechende Bestimmung der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  Werte vorgenommen (Abb. 11). Daneben konnten C/N Verhältnisse als Proxy Parameter herangezogen werden.

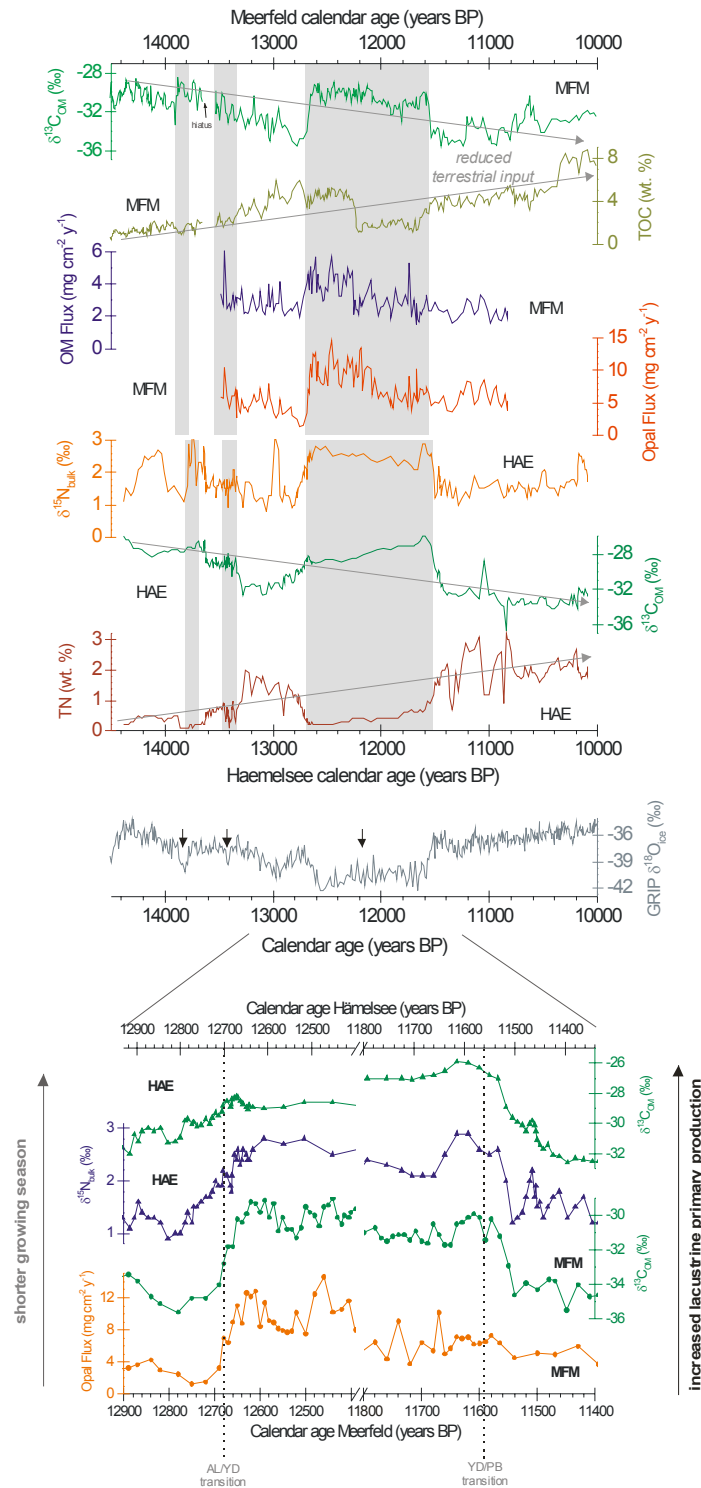
*Interpretation* – Die Variationen der für den Hämelsee untersuchten Parameter im Zeitraum vom Ausgang des Glazials bis zum Präboreal (14.500 bis 10.000 YBP) sind direkt vergleichbar mit den Befunden im Meerfelder Maar (Abb. 12). Sie bestätigen die Gültigkeit der Befunde aus dem Meerfelder Maar (Eifel) auch für das norddeutsche Tiefland. Auch die Jüngere Dryas im Hämelsee ist durch stark angereicherte Isotopenwerte des organischen Kohlenstoffs ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) und des Stickstoffs ( $\delta^{15}\text{N}$ ) gekennzeichnet. Auffällig ist insbesondere

die ausgeprägte Reaktion der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte mit Veränderungen von bis zu 2 ‰ zu Beginn und Ende der Jüngerer Dryas. Diese starke Reaktion der Stickstoffisotope, die im Meerfelder Maar nicht auftritt, ist als verringerte Isotopenfraktionierung im Zuge einer stark erhöhten Primärproduktion zu interpretieren. In einem stickstoffliierten System, als das der Hämelsee anzusehen ist, tritt bei einer verstärkten Ausschöpfung des anorganischen gelösten Stickstoffpools im Seewasser im Zuge einer verstärkten Primärproduktion von Algen eine verringerte Diskriminierung gegenüber dem  $^{15}\text{N}$  Isotop auf. Dies führt im Ergebnis zu deutlich angereicherten  $\delta^{15}\text{N}$  Werten, wie sie im Hämelsee in der Jüngerer Dryas im Vergleich zum Allerød und dem Präboreal zu beobachten sind. Damit wird deutlich, dass auch für den Hämelsee starke Indizien für eine hohe Primärproduktion und damit relativ warme Sommer während der Jüngerer Dryas vorhanden sind. Die Übergänge zu Beginn und Ende der Jüngerer Dryas finden sehr schnell innerhalb weniger Dekaden statt und verlaufen Synchron zu den entsprechenden Übergängen im Meerfelder Maar. **Damit konnte der Nachweis geführt, dass sich diese schnellen Veränderungen der Saisonalität im Spätglazial auf ganz Europa erstreckten und dass die Jüngerer Dryas durch einen wesentlich verstärkten Temperaturgegensatz zwischen warmen Sommern und sehr kalten Wintern gekennzeichnet ist.** Aufgrund der schnellen und synchronen Veränderungen lässt sich ein größerer Beitrag atmosphärischer Prozesse zu diesen Klimaänderungen als bisher angenommen postulieren. Eine mögliche Hypothese wäre die saisonale Verlagerung der außertropischen nordhemisphärischen Westwindzone, die unmittelbar eine prägnante Verminderung des atmosphärischen Wärmetransports auf den mitteleuropäischen Kontinent zur Folge hätte. Dieser Frage wird in nachfolgenden Arbeiten weiter nachzugehen sein.



**Abb. 11:** Spätglazial und frühes Holozän im Hämelsee. (a) Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC), (b) Stickstoffgehalt und (c) das Kohlenstoff zu Stickstoffverhältnis (TOC/ON) der Sedimente. (d) Vorkommen ausgeprägter Sandlagen und Sideritlagen im Sediment. Graue Balken markieren die Älteste Dryas, die Ältere Dryas und die Jüngerer Dryas (12.680 - 11.560 YBP)





**Abb. 12:** Vergleich von Proxyparametern für lakustrine Primärproduktion aus dem Meerfelder Maar und dem Hämelsee für das Spätglazial. Oben: Produktionsänderungen zwischen 14.500 und 10.000 YBP dargestellt auf unabhängigen Zeitskalen. Graue Balken zeigen die Kaltphasen an. Meerfelder Maar Panels zeigen Kohlenstoffisotopenzusammensetzung des organischen Materials ( $\delta^{13}C_{OM}$ ), Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC), Akkumulationsrate des organischen Materials (OM Flux), Akkumulationsrate des biogenen Opals (Opal Flux). Hämelsee Panels zeigen Stickstoffisotopenzusammensetzung der Sedimente ( $\delta^{15}N_{Bulk}$ ), Kohlenstoffisotopie des organischen Materials ( $\delta^{13}C_{OM}$ ) und Stickstoffgehalt (TN). GRIP Daten nach Dansgaard (1993). Unten: Close up für den Zeitraum 12.900 – 11.400 YBP auf synchronisierten Zeitskalen. Panels zeigen Hämelsee  $\delta^{13}C_{OM}$  und  $\delta^{15}N_{Bulk}$  sowie Meerfelder Maar  $\delta^{13}C_{OM}$  und Opalakkumulationsratenn (Opal Flux).



Lücke, A., Brauer, A., Kleinmann, A., Merkt, J. Schleser, G.H.: Warm summers and strongly enhanced seasonality during the Younger Dryas in Europe. (submitted).

## 1.4. Sedimentarchiv Bodensee (Deutschland)

### 1.4.1. Kurzkernuntersuchungen

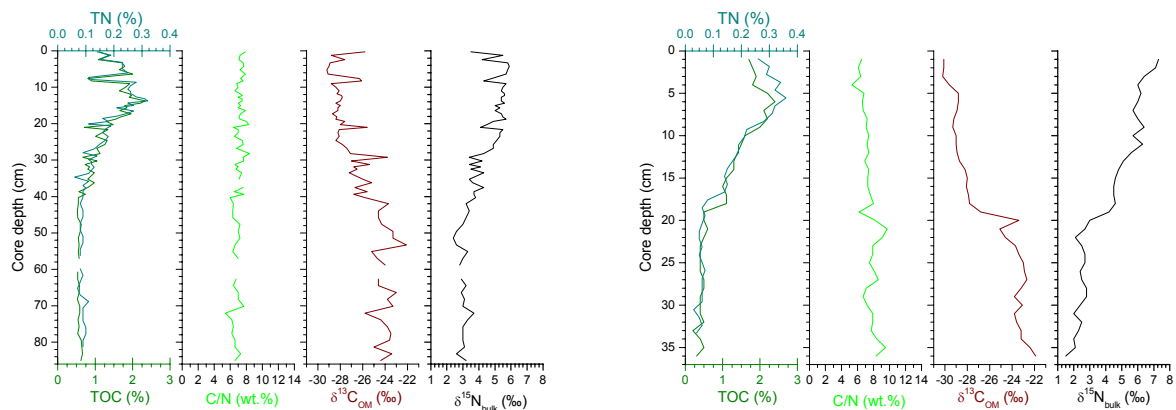
*Fragestellung* – Im Rahmen eines aktuogeologischen Ansatzes für die letzten Jahrhunderte sollten die Auswirkungen der Gewässereutrophierung auf die lakustrine Bioproduktivität und deren Fingerprint im Sediment untersucht werden. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwieweit sich hydrologische Extremereignisse in den Bodenseesedimenten durch die Anwendung isotopengeochemischer Parameter charakterisieren lassen.

*Arbeiten und Resultate* – Für diese Untersuchungen konnten die Kerne Bo02\_79 (85 cm) und Bo03\_88 (54 cm) genutzt werden. Insgesamt handelte es sich um einen Satz von 110 Proben, die isotopengeochemisch untersucht wurden. Dabei wurden der Stickstoffgehalt sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenverhältnisse des Sedimentes bestimmt. Die Stickstoffgehalte lagen zwischen 0,5 und 0,35 % während die ermittelten C/N Verhältnisse zwischen Werten von 6 bis 10 variieren. Die Bandbreite der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte lag bei -29,5 ‰ bis -22,0 ‰, die der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte entsprechend bei 1,5 ‰ bis 7,5 ‰.

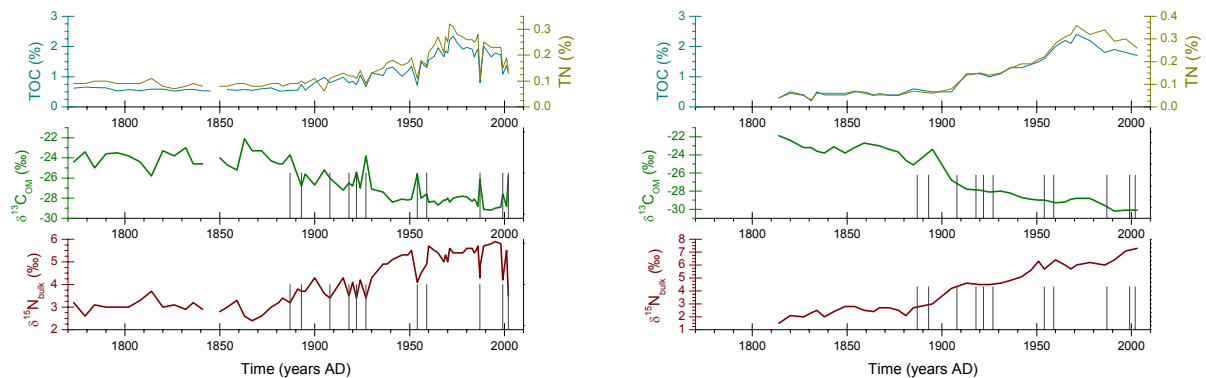
*Interpretation* – In den Elementgehalten als auch in der Isotopenzusammensetzung der untersuchten Sedimentkerne lassen sich zwei unterschiedliche Prozesse erkennen. Ab ca. AD 1870 steigen die Elementkonzentrationen des organischen Kohlenstoffs und des Stickstoffs deutlich an (Abb. 13, 14). Zeitgleich tritt ein abfallender Trend der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte auf, der begleitet wird von einem entsprechenden Anstieg der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte. Dieses prägnante Muster ist in beiden untersuchten Kernen, Bo02\_79 und Bo03\_88, sehr gut zu erkennen. In diesem Verhalten spiegelt sich die Eutrophierungsgeschichte des Bodensees wieder, die nach diesen Daten um AD 1880 einsetzte und seit AD 1940 durch den massiven Einfluss des Menschen (IGKB Phosphordaten) verstärkt wurde. Ab AD 1990 scheint ein Maximum der Produktivität erreicht zu sein bzw. ein weiterer Nährstoff wachstumslimitierend zu wirken. Dabei ist keine 1:1 Kopplung zwischen den Phosphorgehalten im Bodensee und der Bioproduktivität festzustellen (mündliche Mitteilung M. Wessels, IGKP), was sich auch im zeitweiligen Wiederanstieg der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte während des Phosphormaximums um AD 1970 zeigt. **D.h. die Eutrophierung des Bodensees und damit die höhere Primärproduktion wird durch den langfristigen Trend in der Isotopenzusammensetzung des organischen Kohlenstoffs und des Stickstoff prägnant abgebildet.**

Auf diesen langfristigen Trend aufgesetzt sind im Kern Bo02\_79 einzelne Ereignisse insbesondere nach AD 1880 deutlich zu erkennen, die isotopengeochemisch durch Minima der Elementgehalte, sowie durch Maxima der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte und Minima der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte gekennzeichnet sind. Aufgrund historischer Aufzeichnungen und der Lithologie der Sedimente wird deutlich, dass es sich hierbei um die Signatur einzelner Hochwässer im Sediment handelt. **Daraus folgt, dass sich hydrologische Extremereignissen im Bodensee aufgrund ihres typischen isotopengeochemischen Musters, zumindest für das letzte Jahrhundert, sehr gut fassen lassen.** Die Signatur aus relativ erhöhten  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten in Kombination mit relativ erniedrigten  $\delta^{15}\text{N}$  Werten deutet dabei auf den verstärkten Eintrag von aquatischen Makrophytenresten im Zuge dieser Hochwasserereignisse hin. Auffallend ist dabei, dass es aufgrund des langfristigen Trends in der Isotopie zu einer Umkehrung im Vorzeichen der Isotopenanomalien für den Zeitraum vor AD 1890 kommt ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ :

positiv/negativ;  $\delta^{15}\text{N}$ : negativ/positiv). Dadurch wird eine Detektion im Zeitraum vor AD 1890 erschwert, da auch die Unterschiedsbeträge in der Isotopie der Sedimente bzw. der Makrophyten nachhaltig verringert sind. Trotzdem lassen sich historisch nicht dokumentierte hydrologische Extremereignisse für AD 1815 und AD 1860 postulieren. Es bleibt zu klären wie die eindeutig charakterisierten hydrologischen Extremereignisse im Bodenseeraum während der letzten 250 Jahre klimatisch zu interpretieren sind (Niederschlagsmenge, Schneeschmelze) und ob sie mit Säkularvariationen mehrjähriger Zirkulationsmuster (NAO) zu korrelieren sind.



**Abb. 13:** Tiefenprofile der Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC), Stickstoff (TN), Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenzusammensetzung ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) der Bodenseesedimentkerne Bo02\_79 (links) und Bo 03\_88 (rechts).



**Abb. 14:** Zeitliche Entwicklung der Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC) und des Stickstoffs (TN), sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffisotopenzusammensetzung ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) der Bodenseesedimentkerne Bo02\_79 (links) und Bo 03\_88 (rechts). Der langfristige Trend in beiden Kernen stellt die Eutrophierungsgeschichte des Bodensees dar, während die Extremwerte insbesondere nach AD 1900 hydrologische Extremereignisse kennzeichnen, die nur im Kern Bo02\_79 aufgelöst sind.

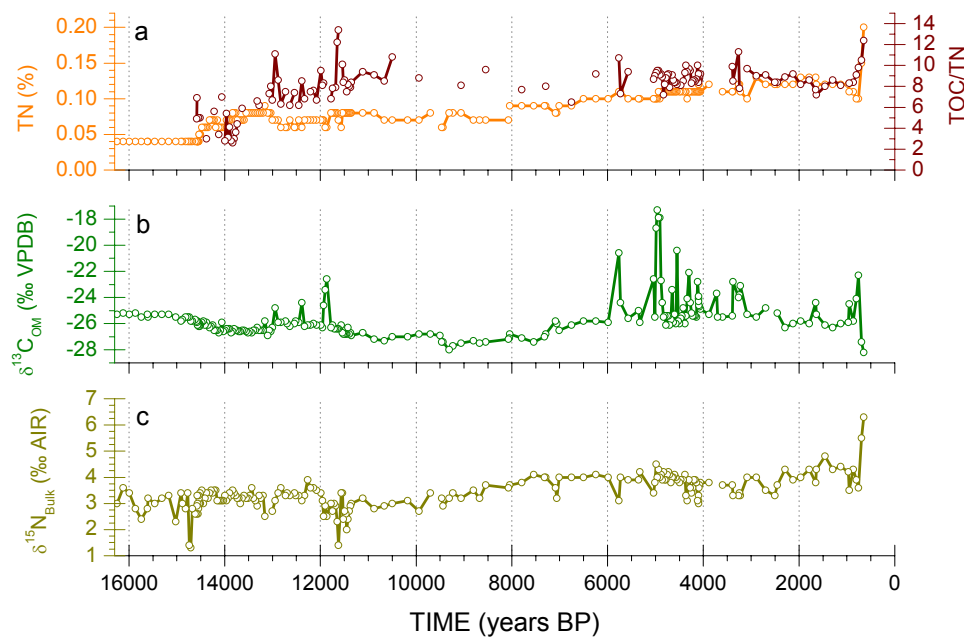
*Lücke, A., Hanisch, S., Wessels, M., Schwalb, A., Stable isotope signatures of cultural eutrophication and hydrologic extremes in Lake Constance during the last two centuries (in preparation).*

### 1.4.2. Holozäne und spätglaziale Sedimente

*Fragestellung* – Die zentrale Aufgabenstellung für dieses Arbeitspaket war die Untersuchung der Klimavariabilität im Spätquartär und im Holozän im Voralpenraum sowie die Detektion möglicher Veränderungen im hydrologischen Kreislauf insbesondere im Holozän im Bodenseeraum.

*Arbeiten und Resultate* – Für diese Arbeiten wurde ein Sedimentprofil aus dem Bodensee bestehend aus 220 Proben (1cm Intervalle) untersucht. Bestimmt wurde neben dem Stickstoffgehalt, die Isotopenzusammensetzung des organischen Kohlenstoffs und des Stickstoffs. Die Extraktion von sedimentärer Zellulose war aufgrund der geringen Gehalte an organischem Material nicht erfolgreich. Ebenso konnten keine für eine Sauerstoffisotopenanalyse ausreichenden Mengen an biogenem Opal gewonnen werden. Die untersuchten Parameter wiesen dabei eine Schwankungsbreite auf, die vergleichbar zu den bereits in der Kurzkernstudie beobachteten Varianzen sind.

*Interpretation* – Die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte zeigen eine augenfällige langfristige Entwicklung seit dem Ende des Weichselglazials (Abb. 15). Dabei erreichen die Werte mit -27.5 ‰ um 9.500 YBP eine Minimumphase die ca. 1.500 Jahre andauert. Da die entsprechenden C/N Verhältnisse keine parallele Entwicklung aufweisen ist in erster Näherung davon auszugehen, dass sich hierin langfristige Veränderungen der Produktivität im Bodensee zeigen. Inwiefern für dieses langfristige  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Signal möglicherweise Quellwertveränderungen des anorganischen gelösten Kohlenstoffs oder aber mikrobieller Abbau bzw. mikrobielle Biomasse von Bedeutung sind kann auf der Basis der vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden. Zusätzlich zu dem beschriebenen Trend sind in der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Zeitreihe zwei Phasen mit einer Häufung von Extremwerten augenfällig. Hierbei erlauben die C/N Werte eine eindeutige Differenzierung zwischen der von 13.100 bis 11.550 YBP, dem Zeitraum der Jüngeren Dryas, und der von 6.000 bis 3.100 YBP, dem Zeitraum der mittelholozänen Klimaänderung, andauernden Extremwertphase. Während der spätglazialen Phase sind die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Maxima mit Maxima der C/N Werte kombiniert, was als klarer Hinweis auf den Eintrag von bodenbürtigem organischen Material, also terrestrischem Pflanzenmaterial, zu werten ist. Dieses Muster tritt in der mittelholozänen Phase nicht auf, vielmehr sind dort die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Maxima mit entsprechenden Minima der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte gekoppelt. Eine solche Signatur kann nur durch einen starken Beitrag von organischem Material aquatischer Makrophyten ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ : ~-18 ‰,  $\delta^{15}\text{N}$ : 2-4 ‰), submerse Uferpflanzen oder Wasserpflanzen, zum organischen Inhalt der Sedimente erklärt werden. Dies ist vergleichbar mit den Erkenntnissen aus der Kurzkernstudie, wobei hier zu beachten ist, dass sich aufgrund der geringeren TOC Gehalte in den holozänen Sedimente die jeweiligen  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Maxima deutlicher abzeichnen. **Demnach kann für den Zeitraum von 6.100 bis 3.100 YBP eine starke Häufung von Eintragsereignissen in den Bodensee bzw. zur Kernlokation festgestellt werden, die nur durch das entsprechende Auftreten von hydrologischen Extremereignissen, Abflussereignissen, zu erklären sind.** D.h. zeitgleich mit der für den Mittelgebirgsraum rekonstruierten Klimaveränderung, wahrscheinlich einer Abkühlung, treten im Voralpenraum bzw. Nordalpenraum verstärkt Hochwässer auf, die nach 3.000 YBP wieder ausbleiben.



**Abb. 15:** Zeitliche Entwicklung von Proxyparametern im Sedimentprofil des Bodensees im Verlauf von Spätglazial und Holozän. (a) Stickstoffgehalte (TN) und Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff (TOC/TN). (b) Kohlenstoffisotopenverhältnisse der organischen Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ). (c) Stickstoffisotopenverhältnisse des Gesamtsediments ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$ ). Auffällig sind insbesondere die Phasen mit deutlich erhöhten  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten im Spätglazial (Jüngere Dryas) und im mittleren Holozän.

### 1.5. Sedimentarchiv Huguang Maar (Lei-Qiong Volcanic Field, China)

*Fragestellung* – Im Rahmen der Untersuchung des Huguang Maars im südöstlichen China ( $110^{\circ}17'E$ ,  $21^{\circ}9'N$ ) sollte die Klimavariabilität im Spätquartär untersucht werden. Das Augenmerk lag hierbei insbesondere auf der Periode des Spätglazials und in der vergleichenden Untersuchung von Variabilitätsmuster in Europa und SE-Asien.

*Arbeiten und Resultate* – Zur Verfügung standen ca. 750 Proben aus dem Sedimentkompositprofil Huguang F, die mit isotopengeochemischen Verfahren untersucht wurden. Aufgrund sehr geringer Probenmengen, die aus diesem Profil zur Verfügung standen, konnten nicht alle Parameter durchgängig analysiert werden. Dies betrifft insbesondere die Bestimmung der Stickstoffisotopenverhältnisse für den Zeitraum Holozän, die aufgrund von zu kleinen Probenmengen nicht durchgeführt werden konnte. Die Konzentrationen des Gesamtstickstoffs lagen im Mittel bei 0,7 % mit Einzelwerten von 0,4 % bis 1 %. Die ermittelten C/N Verhältnisse variieren zwischen Werten von 8 bis 12 mit einem Mittelwert von 10 (Abb. 16). Die hervorstechende Eigenschaft des Huguang Maar Profils waren die im Wesentlichen für den holozänen Zeitabschnitt bestimmten Kohlenstoffisotopenwerte, die mit einem arithmetischen Mittel von -20,9 ‰ isotopisch sehr positiv markiert sind. Dabei wurden die Minima durch Werte um -24 ‰ gebildet, während die Maxima Werte von -17 ‰ erreichten. Dem gegenüber variieren die  $\delta^{15}\text{N}$  Werte zwischen 16.000 und 10.000 YBP im erwarteten Bereich um einen Mittelwert von 5 ‰.

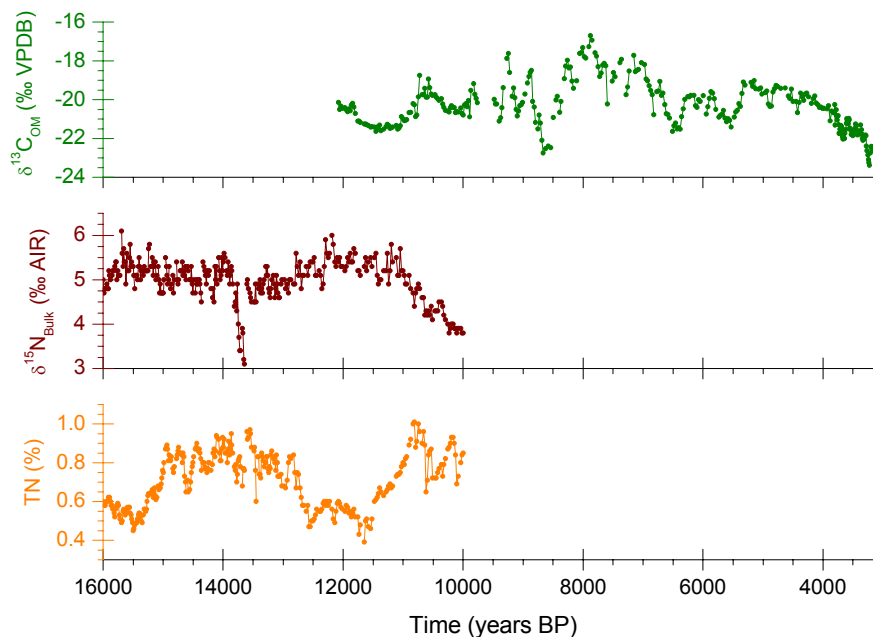
*Interpretation* – Die im Vergleich zu den europäischen Archiven stark angereicherten  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte deuten auf eine spezielle lokale Situation für das Huguang Maar hin. Mögliche Erklärungen für  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte der sedimentären organischen Substanz um -21 ‰ liegen im

Eintrag von C4 Pflanzenmaterial oder von aquatischen Macrophyten aus der Uferzone in den profundalen Bereich des Sees. Beide Pflanzentypen sind durch angereicherte  $\delta^{13}\text{C}$  Werte im Wertebereich von -20 ‰ bis -10 ‰ gekennzeichnet, unterscheiden sich aber deutlich in der Signatur der C/N Verhältnisse. Darüber hinaus kann es bei niedrigen Seespiegelständen zu einer Anreicherung von schwerem  $^{13}\text{C}$  im gelösten anorganischen Kohlenstoffpool des Sees kommen, was ebenfalls deutlich höhere  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte nach sich ziehen würde. Ein ähnlicher Effekt ist zu beobachten, wenn als anorganische Kohlenstoffquelle (DIC) für die Photosynthese von Algen an Stelle des normalerweise assimilierten gelösten Kohlendioxids das um ca. 9 ‰ isotopisch schwerere Hydrogenkarbonat tritt. Allerdings hat das Huguang Maar unter heutigen Bedingungen einen pH-Wert von 7.7 bei  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten um -19 ‰, wodurch die Hydrogenkarbonatnutzung als Ursache für die angereicherten Isotopenverhältnisse weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Ebenso kann aufgrund der vorliegenden Pollenanalyse ein nennenswerter Beitrag von C4-Pflanzenmaterial in die Seesedimente für das Holozän ausgeschlossen werden. Für diese Interpretation sprechen auch die mit Werten um 10 für Landpflanzenmaterial deutlich zu niedrigen C/N Verhältnisse der Sedimente. Derartig niedrige C/N Werte werden sowohl bei Algen als auch bei submersen aquatischen Macrophyten, aber auch in stark degradierten Böden, beobachtet. Rezentem Vergleichsmaterial, das für eine weitere Differenzierung dieser Hypothesen notwendig gewesen wäre, konnte nicht beschafft werden. Basierend auf den im Spätglazial und Holozän konstanten C/N Verhältnissen und der Situation des Huguang Maares ohne oberflächigen Zufluss und damit Einzugsgebietseinfluss kann jedoch als begründete Arbeitshypothese angenommen werden, dass die beobachteten starken Variationen der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte nicht durch wechselnden Eintrag von Landpflanzenmaterial hervorgerufen worden sind. Aufgrund der Tatsache, dass sowohl isotopische Veränderungen im DIC Pool als auch Eintrag von Wasserpflanzen an die Kernposition gleichgerichtet auf Änderungen des Wasserspiegels reagieren, können die Kohlenstoffisotopenwerte der organischen Substanz in erster Näherung als Indikator für Änderungen des Seespiegels interpretiert werden. Niedrige  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte deuten dabei Seespiegelhochstände an. **Die maximalen Seespiegelstände im Huguang Maar würden demnach im Spätglazial zwischen 12.000 und 11.000 YBP, und im Holozän von 8.600 bis 8.400 YBP und nach 4.000 YBP erreicht werden (Abb. 16). Relative Maxima wären auch für die Phasen um 6.500 und 5.500 YBP festzustellen. Die minimalen Wasserstände wären dementsprechend insbesondere für die Periode von 8.200 bis 7.000 YBP zu konstatieren.**

Demgegenüber ist der Verlauf der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte im Spätglazial als relativ konstant anzusehen. Auffällig sind eine Phase mit relativ erniedrigten Werten von 13.800 bis 12.800 YBP (Bølling/Allerød) und der starke Abfall, der nach 11.000 YBP einsetzt. In den Zeitraum der Jüngeren Dryas fällt eine Phase relativ erhöhter  $\delta^{15}\text{N}$  Werte. Damit deutet sich insgesamt eine negative Korrelation zwischen  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  und  $\delta^{15}\text{N}$  an, sodass höhere Stickstoffisotopenverhältnisse in relativ feuchtere Perioden fallen. Dies könnte durch den verstärkten Eintrag von Nitrat durch erhöhten Grundwasserzufluss in feuchteren Phasen verursacht worden sein. Alternativ wären insbesondere im Hinblick auf die Variationen der Stickstoffisotopie auch Veränderungen der Algenassoziation in Betracht zu ziehen, wobei in Phasen relativ niedriger  $\delta^{15}\text{N}$  Werte ein erhöhter Anteil der Biomasse durch Luftstickstoff fixierende Cyanobakterien (Blaugrünalgen) gebildet würde.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Isotopenvariationen im Huguang Maar nicht eindeutig einer einzigen Ursache bzw. einem Prozess zugewiesen werden können. Hierzu müsste eine deutlich größere Zahl von Parametern aus dem Kompositprofil F zur Verfügung stehen. In Bezug auf die Frage nach den Telekonnektionen zwischen Europa und SE-Asien konnten für das Holozän einige Ähnlichkeiten aufgezeigt werden. Diese ließen sich aufgrund der Unsicherheiten im Altersmodell aber auch in der zeitlichen Auflösung durch zeitreihenanalytische Methoden nicht näher fassen. Daher wurde davon Abstand genommen,

klimatische Telekonnektionen zwischen der europäischen Westwindzone und dem monsunal geprägten Klima in SE-China näher zu untersuchen.



**Abb. 16:** Zeitliche Entwicklung von Proxyparametern im Sedimentprofil des Huguang Maars im Verlauf von Spätglazial und Holozän. (a) Kohlenstoffisotopenverhältnisse der organischen Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ), (b) Stickstoffisotopenverhältnisse des Gesamtsediments ( $\delta^{15}\text{N}^{\text{Bulk}}$ ) und (c) Stickstoffgehalte (TN) der Sedimente.

Fuhrmann, A., Mingram, J., Lücke, A., Lu, H., Horsfield, B., Liu, J., Negendank, J.F.W., Schleser, G.H., Wilkes, H. (2003). Variations in organic matter composition in sediments from Lake Huguang Maar (Huguangyan), south China during the last 68 ka: implications for environmental and climatic change. *Organic Geochemistry* 34, 11, 1497-1515.

## Wegweisende technologische Verfahrensentwicklungen

### 1.6. Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Bestimmung der Sauerstoffisotopenzusammensetzung von biogenem Opal (Diatomeenopal)

Eine Aufgabenstellung des Projektes lag in der Kalibration von Proxyparametern für die quantitative Klimarekonstruktion. Da die Eifelmaare keine karbonatischen Materialien enthalten, aufgrund ihrer exzellenten Chronologie aber besonders geeignete Klimaarchive darstellen, sollte die Sauerstoffisotopenzusammensetzung des biogenen Opals (Diatomeenschalen) als Proxyparameter herangezogen werden. Die existierenden Verfahren des kontrollierten Isotopenaustausches (Juillet-Leclerc & Labeyrie, 1987) und der Fluorinierung mit Vortrocknung (Brandriss & O'Neill, 1998) erwiesen sich sowohl im Hinblick auf die für eine Analyse notwendige Probenmenge als auch für die Behandlung „frischer Diatomeenschalen“ als ungeeignet. Gerade letzteres ist aber eine Grundvoraussetzung um die Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffisotopenfraktionierung beim Aufbau der Diatomeenschalen zu bestimmen.

Deshalb wurde ein neuartiges technisches Verfahren auf Basis der Hochtemperatur-Pyrolyse entwickelt. Dabei wird in einer Vakuumzelle mittels induktiver Heizung ein Stab aus

glasartigem Kohlenstoff rasch bis auf 1550°C erhitzt. Dabei zersetzt sich das stochiometrisch ausgelegte Probengemisch aus reinem Opal und reinem Graphit zu Kohlenmonoxid (CO) und Siliziumcarbid (SiC). Das gasförmige Kohlenmonoxid wird für die nachfolgende Analyse der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Werte eingesetzt. Unmittelbar vor diesem Aufschluss erfolgt in der gleichen Vakuumzelle ein mehrstufiges Trocknungsverfahren (Raumtemperatur, 850°C, 1050°C) um Verunreinigungen des Opals mit anderen sauerstoffhaltigen Verbindungen (z.B. Luftfeuchte, OH-Gruppen, etc.) quantitativ zu entfernen. Das Verfahren ist in der aufgeführten Publikation eingehend dargestellt. **Der Einsatz dieses Verfahrens ermöglichte die Durchführung der bisher weltweit einzigen Kalibrationsstudie für biogenen Opal unter natürlichen Bedingungen direkt im Holzmaar (s. Punkt 1.1).**

Lücke, A., Moschen, R., Schleser, G.H. (2005). High temperature carbon reduction of silica: A novel approach for oxygen isotope analysis of biogenic opal. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 1423-1433. doi:10.1016/j.gca.2004.09.022

### 1.7. Entwicklung eines Verfahrens zur Extraktion reiner sedimentärer Zellulose aus feinkörnigen Sedimenten

Eine Aufgabenstellung des Projektes lag in der Nutzung von Sauerstoffisotopenwerten sedimentärer Zellulose ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$ ) als Proxyindikator für Klimavariationen (s. Punkt 1.1). Für die chemische Extraktion der Zellulose aus den zu bearbeitenden Sedimenten sollte ursprünglich ein von Wolfe et al. (2001) vorgestelltes nasschemisches Verfahren angewendet werden. Im Zuge eigener Versuche der Anwendung dieses Verfahrens auf Sedimente unterschiedlichen Alters aus dem Holzmaar stellte sich heraus, dass sich damit keine befriedigenden Extraktionsergebnisse erzielen ließen. Zum einen waren die Ausbeuten an extrahierter Zellulose äußerst gering und erbrachten, bei gegebenem limitiertem Materialeinsatz, nicht ausreichend Material für die nachfolgende Isotopenanalyse. Zum anderen war der Reinheitsgrad der gewonnenen Zellulosefraktion nicht ausreichend. Hier wurde insbesondere eine Verunreinigung mit Tonpartikeln festgestellt, die sich mit dem angegebenen Verfahren nicht entfernen ließen. Das analytische Verfahren der on-line Pyrolyse zur Bestimmung der Sauerstoffisotopenverhältnisse setzt jedoch einen sehr hohen Reinheitsgrad voraus, da nur so die Freisetzung von anorganisch gebundenem Sauerstoff und die Verfälschung des eigentlichen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Wertes im Zuge des Aufschlusses vermieden werden kann. Es war daher notwendig ein eigenes Verfahren zur Extraktion reiner sedimentärer Zellulose aus Sedimenten zu entwickeln.

Hierfür wurden Versuchsreihen durchgeführt um eine möglichst quantitative Ausbeute reiner Zellulose zu gewährleisten. Dabei konnte festgestellt werden, dass insbesondere der Zeitpunkt, die Konzentration und die Dauer der Behandlung mit Natronlauge (NaOH) für die Höhe der Zelluloseausbeuten bei gleichem Probenmaterial von erheblicher Bedeutung ist. Darüber hinaus konnte durch Untersuchungen mittels IR-Spektroskopie gezeigt werden, dass die chemisch extrahierte organische Fraktion keine reine Zellulosefraktion darstellt, sondern tatsächlich aus einer Mischung unterschiedlicher Zellulosen (holo,  $\alpha$ ) und anderer organischer Verbindungen (Pektine) bestand. Damit war die für die spätere Interpretation der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  grundlegende Voraussetzung der Homogenität sowie der chemischen Definiertheit nicht gegeben. Die eigentliche Aufgabe der Gewinnung einer definierten Fraktion von Zellulose ( $\alpha$ -Zellulose) mit sehr hohem Reinheitsgrad, i.e. ohne anorganische Verunreinigungen, konnte schließlich durch den Einsatz eines zusätzlichen Reinigungsschrittes mittels einer Kupferkomplex-Behandlung erreicht werden (Tab. 1). Hierbei wird nach der chemischen Extraktion des Sediments mittels Natronlauge und Natriumchlorit, die Zellulose durch eine

Kupferkomplexchemikalie in Lösung gebracht. Nach der Trennung dieser Lösung vom festen Residuum mittels Zentrifugation und Dekantieren, wird die Zellulose durch Zugabe von Wasser in die Kupferkomplexlösung wieder ausgefällt. **Mittels der IR-Spektroskopie konnte gezeigt werden, dass die durch die kombinierte Kupferkomplexmethode gewonnene Zellulose einen sehr hohen Reinheitsgrad besitzt und zu deutlich erhöhten Ausbeuten an Zellulose führt.** Im Zuge der erfolgreichen Extraktion sedimentärer Zellulose aus Proben des Holzmaarprofils mit dem kombinierten Kupferkomplexverfahren konnten erstmals entsprechende Sauerstoffisotopenwerte für das mittlere Holozän vorgelegt werden. Die Publikation dieser Methode mit umfangreichen Testreihen unterschiedlicher Verfahren und Materialien befindet sich in Vorbereitung.

| <b>Sphagnum<br/>Kiruna</b> |                  | <b>C (%)</b> | <b><math>^{13}\text{C}/^{12}\text{C}</math><br/>(VPDB)</b> | <b>O (%)</b> | <b><math>^{18}\text{O}/^{16}\text{O}</math><br/>(VSMOW)</b> | <b>C/O</b> |
|----------------------------|------------------|--------------|--|--------------|---|------------|
| <b>stem</b>                | <b>cellulose</b> | 42.1         | <b>-29.3</b>   | 44.4         | <b>21.6</b>   | 0.95       |
| stem                       | residue          | 36.7         | -28.7  | 38.0         | 19.9  | 0.97       |
|                            |                  |              |  |              |   |            |
| <b>branch</b>              | <b>cellulose</b> | 42.1         | <b>-27.1</b>   | 43.1         | <b>22.2</b>   | 0.98       |
| branch                     | residue          | 20.3         | -25.6  | 21.0         | 19.7  | 0.97       |

**Tabelle 1:** Verhältnisse von Kohlenstoff zu Sauerstoff (C/O) und Isotopenzusammensetzung von Stamm- (stem) und Blattzellulose (branch) aus Torfmoosproben des Profils Kiruna. Durch die Behandlung von konventionell extrahierter Zellulose mit dem kombinierten Kupferkomplexverfahren kann eine zusätzliche Trennung zwischen reiner Zellulose (cellulose) und organisch/anorganischen Verunreinigungen (residue) mit jeweils unterschiedlicher Isotopenzusammensetzung nachgewiesen werden. Das Torfbeispiel wurde bewusst aus Gründen der Anschaulichkeit gewählt und gibt auch die Bedingungen für die sedimentäre Zellulose wieder.

*Wissel, H., Lücke, A., Mayr, C.: An improved method for the extraction of cellulose from lacustrine sediments and macrophytes for carbon and oxygen isotope analysis (in preparation).*

## Literatur

- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294(5549): 2130-2136.
- Brandriss, M.E., O'Neil, J.R., Edlund, M.B. and Stoermer, E.F. (1998). Oxygen isotope fractionation between diatomaceous silica and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(7): 1119-1125.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Jouzel, J., Bond, G.C. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice-core record. *Nature* 264, 218-220.
- Charvátová, I. (2000). Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion? *Annales Geophysicae*, 18: 399-405.
- Jullet-Leclerc, A., Labeyrie, L. (1987). Temperature dependence of the oxygen isotopic fractionation between diatom silica and water. *Earth and Planetary Science Letters* 84, 69-74.



- Keeling, C.D., Whorf, T.P. (2000). The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climatic change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, 3814-3819.
- Oppo, D.W., McManus, J.F., Cullen, J.L. (2003). Deepwater variability in the Holocene epoch. *Nature* 422, 277-278.
- Wolfe, B.B., Edwards, T.W.D., Elgood, R.J., Beuning, K.R.M. (2001). Carbon and oxygen isotope analysis of lake sediment cellulose: Methods and applications. In: Last W.M. & Smol, J.P. (eds.). *Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 2: Physical and geochemical methods*, Kluwer Academic Publishers, 373-400.

## 2. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dieses Projekt diente der Grundlagenforschung und lieferte einen Beitrag zur Quantifizierung der natürlichen Klimavariabilität sowie dem Verständnis des Systems Erde. Es trug zudem zur besseren Modellierbarkeit klimatischer Größen bei. Hierdurch konnte ein Beitrag zur Reduktion der Unsicherheiten in der Vorhersage zukünftiger Änderungen des Klimasystems geleistet werden. Die erhobenen Daten wurden bzw. werden der Öffentlichkeit durch Publikationen, durch Archivierung in Datenbanken (z.B. PANGAEA) und persönliche Kommunikation zur Verfügung gestellt. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt und in internationalen Zeitschriften publiziert. Sie können zur Klimamodellierung und als Grundlage für politische Diskussionen genutzt werden. Die im Projekt entwickelten bzw. fortentwickelten Techniken wurden und werden der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur weiteren und allgemeinen Nutzung zur Verfügung gestellt. Es wurden keine Patentanmeldungen oder sonstige Schutzrechtseintragungen vorgenommen.

## 3. Wissenschaftlicher Fortschritt anderer Stellen

Im Verlaufe der Projektlaufzeit verdichteten sich die Hinweise auf eine Veränderung der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik im Zuge des menschlichen Eingriffes in das Klimasystem. Zudem konnte eine Kopplung zwischen den Tropen und den höheren nördlichen sowie südlichen Breiten nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurden neue Evidenzen zur Verwundbarkeit menschlicher Gesellschaften durch schnelle Klimaänderungen gefunden. Die Erkenntnisse von PROSIMUL stehen in diesem Zusammenhang und haben zu dieser Entwicklung ihren Beitrag geleistet.

## 4. Publikationen PROSIMUL II

### *Veröffentlichungen mit Reviewsystem (ISI)*

#### **in Vorbereitung**

- Hanisch, S., **Lücke, A.**, Wessels, M., Schwalb, A., Holocene climate evolution in the Lake Constance region from organic geochemical fingerprints (in preparation).
- Hanisch, S., **Lücke, A.**, Wessels, M., Schwalb, A., Reconstruction of eutrophication and flood history in Lake Constance sediments using an organic geochemical and stable isotope multi proxy approach (in preparation).
- Lücke, A.**, Hanisch, S., Wessels, M., Schwalb, A., Stable isotope signatures of anthropogenic eutrophication and hydrologic extremes in Lake Constance during the last two centuries (in preparation).

- Lücke, A.**, Zolitschka, B., Brauer, A., Holocene climate variability from varved lacustrine sediments from the Eifel, Germany: A lake comparison study (in preparation).
- Wagner, S., Hanisch, S., **Lücke, A.**, Jones, J., Schwalb, A., Widmann, M., Reconstruction of extreme precipitation events in the Lake Constance area during the mid Holocene with transient climate simulations and proxies (in preparation).
- Wissel, H., **Lücke, A.**, Mayr, C.: An improved method for the extraction of cellulose from lacustrine sediments and macrophytes for carbon and oxygen isotope analysis (in preparation).

#### im Druck/ingereicht

- Messyasz, B., **Lücke, A.**, Moschen, R., Schleser, G.H., Seasonal changes in the vertical distribution of phytoplankton communities in the volcanic crater Lake Holzmaar, Germany. *Archive of Hydrobiology* (in review).
- Kienel, U., **Lücke, A.**, Dulski, P., Schwab, M.J., Vos, H., Nowaczyk, N.R., Lake-system response to variable climate and human activities since AD 1607: Sub-annually resolved element chemistry and geochemistry of organic matter from varved sediments (Lake Holzmaar, Germany). *Quaternary Science Reviews* (in revision).
- Lücke, A.**, Brauer, A., Kleinmann, A., Merkt, J., Schleser, G.H.: Warm summers and strongly enhanced seasonality during the Younger Dryas in Europe. *Geology* (submitted).
- Moschen, R., **Lücke, A.**, Schleser, G.H., Parplies, J.: Seasonal and interannual variations of the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of sinking particulate organic matter in Lake Holzmaar, Germany: Reliable recorders of autochthonous primary productivity and environmental conditions? *Limnology and Oceanography* (submitted).

#### erschienen

- Enters, D., **Lücke, A.**, Zolitschka, B., Effects of land-use change on deposition and composition of organic matter in Frickenhauser See, northern Bavaria, Germany. *Science of the Total Environment* 369: 178-187.
- Lüder, B., Kirchner, G., **Lücke, A.**, Zolitschka, B. (2006). Palaeoenvironmental reconstructions based on geochemical parameters from annually laminated sediments of Sacrower See (northeastern Germany) since the 17<sup>th</sup> century. *Journal of Paleolimnology* 35, 4, 897-912.
- Moschen, R., **Lücke, A.**, Parplies, J., Radtke, U., Schleser, G.H. (2006). Transfer of oxygen isotope signals during settling and sedimentation of diatom valves in a temperate freshwater lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4367-4379.
- Wu, Y., **Lücke, A.**, Jin, Z., Wang, S., Schleser, G.H., Battarbee, R.W., Xia, W. (2006). Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234: 328-340.
- Wu, J., Schleser, G.H., **Lücke, A.**, Li, S., A stable isotope record from freshwater lake shells of the eastern Tibetan Plateau, China, during the last two centuries. *Boreas* (in press).
- Lücke, A.**, Moschen, R., Schleser, G.H. (2005). High temperature carbon reduction of silica: A novel approach for oxygen isotope analysis of biogenic opal. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 1423-1433. doi:10.1016/j.gca.2004.09.022
- Moschen, R., **Lücke, A.**, Schleser, G.H. (2005). Sensitivity of biogenic silica oxygen isotopes to changes in surface water temperature and palaeoclimatology. *Geophysical Research Letters* 32, L07708, doi:10.1029/2004GL022167.
- Fuhrmann, A., Fischer, T., **Lücke, A.**, Brauer, A., Zolitschka, B., Horsfield, B., Negendank, J.F.W., Schleser, G.H., Wilkes H. (2004). Late Quaternary environmental and climatic

- changes in central Europe as inferred from the composition of organic matter in annually laminated maar lake sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5 (11), Q11015, doi: 10.1029/2004GC000763.
- Lücke, A., Brauer, A.** (2004). Biogeochemical and micro-facial fingerprints of ecosystem response to rapid Late Glacial climatic changes in varved sediments of Lake Meerfelder Maar (Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 211, 139-155.
- Rings, A., **Lücke, A.,** Schleser, G.H. (2004). A new method for the quantitative separation of diatom frustules from lake sediments. *Limnology & Oceanography: Methods* 2, 25-34.
- Fuhrmann, A., Mingram, J., **Lücke, A.,** Lu, H., Horsfield, B., Liu, J., Negendank, J.F.W., Schleser, G.H., Wilkes, H. (2003). Variations in organic matter composition in sediments from Lake Huguang Maar (Huguangyan), south China during the last 68 ka: implications for environmental and climatic change. *Organic Geochemistry* 34, 11, 1497-1515.
- Lücke, A.,** Schleser, G.H., Zolitschka, B., Negendank, J.F.W. (2003). A continuous Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany. *Quaternary Science Reviews* 22, 569-580.
- Wu, J., Schleser, G.H., Wang, S., **Lücke, A.,** Li, S., Xia, W., Shi, Y. (2002). Quantitative recuperation of climatic sequences for the last 200 years in Xingcuo Lake, eastern Tibetan Plateau. *Science in China D*, 45 (9), 832-841.

### ***Sonstige Veröffentlichungen***

- Friedrich, M., **Lücke, A.,** Schwalb, A., Hanisch, S. (2004). Late Glacial environmental and climate changes from synchronized terrestrial archives of Central Europe: The network PROSIMUL. *PAGES Newsletter* 12(2), 27-29.
- Friedrich, M., Hanisch, S., **Lücke, A.,** Schwalb, A. (2003). Proxy-based and simulated climate variability using synchronized terrestrial records on annual to centennial timescales during the Late Quaternary (PROSIMUL). *DEKLIM Status Seminar Extended Abstracts, Bad Münstereifel, Germany*, 123-127.
- Lücke, A.,** Wissel, H. (2003). Climate variability as recorded in stable isotopes from high resolution crater lake sediments (PROSIMUL II). *DEKLIM Status Seminar Extended Abstracts, Bad Münstereifel, Germany*, 131-133.
- Lücke, A., Brauer, A.** (2003). Schnelle Klimaänderungen im Spätglazial und am Übergang zum Holozän in warvierten Seesedimenten des Meerfelder Maars. *Terra Nostra*, 2003/6, 283-284.
- Kowalczyk, K., **Lücke, A.,** Schleser, G.H., Moschen, R. (2002). Oxygen and carbon isotope fractionation by freshwater diatoms in continuous culture under controlled conditions. In: Rott, E. & N. Binder. 16. Treffen Deutschsprachiger Diatomologen – *Kurzfassungen der Vorträge und Poster, Innsbruck*, 55-56.
- Loader, N.J., Robertson, I., Lücke, A., Helle, G. (2002). Preparation of holocellulose from standard increment cores for stable carbon isotope analysis. *Swansea Geographer* 37, 1-9.

Wu, J., Li, S., **Lücke, A.**, Sumin, W. (2002). Climatic signals in the last 200 years from the stable isotope record in the shells of the freshwater snail in Lake Xingcuo, Eastern Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Geochemistry* 2, 234-243.

### **Tagungsbeiträge (Abstracts/Vorträge/Poster)**

- Moschen, R., **Lücke, A.**, Schleser, G.H. (2006): Sensitivity of Biogenic Silica Oxygen Isotopes to Changes in Surface Water Temperature - A Calibration Study in Lake Holzmaar, Germany. 10th International Paleolimnology Symposium. Abstract Volume. Duluth, MN, USA, June 25-29, 2006.
- Parplies, J., **Lücke, A.**, Brauer, A., Radtke, U. (2006). Rapid hydrological and environmental changes during the Late Glacial – diatomaceous silica oxygen isotopes derived from varved sediments of Meerfelder Maar, Germany. European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, 02-07 April 2006; *Geophysical Research Abstracts* 8, 06045.
- Wagner, S., Hanisch, S., Jones, J., **Lücke, A.**, Schwalb, A., Widmann, M. (2006). Rekonstruktion von Extremniederschlagsereignissen im Bodenseeraum während des mittleren Holozäns durch transiente Klimasimulationen und Proxydaten. 7te. Deutsche Klimatagung, München.
- Kienel, U., Schwab, M.J., Schettler, G., **Lücke, A.**, Vos, H. (2005). Distinguishing climatic from direct anthropogenic influences during the past 400 years in varved sediments from Lake Holzmaar (Eifel, Germany). European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, 24-29 April 2005; *Geophysical Research Abstracts* 7, 07760, 2005.
- Lücke, A.**, Brauer, A., Kleinmann, A., Merkt, J., Schleser, G.H. (2005). Abrupt climate changes of the Late Glacial and seasonality: Evidences from varved lake sediments of Western Europe. PAGES DEKLIM Conference “The climate of the next millennia in the perspective of abrupt climate changes during the Late Pleistocene, 7.-10.03.2005, Mainz, Germany, *Abstract Volume: 162-163*.
- Lücke, A.**, Moschen, R., Rings, A., Schleser, G.H. (2005). Oxygen isotopes of biogenic silica: Recent technical developments and lacustrine temperature calibration study. European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, 24-29 April 2005; *Geophysical Research Abstracts* 7, 06845, 2005.
- Lücke, A.**, Vos, H., Zolitschka, B., Brauer, A., Schleser, G.H. (2005). Holocene climate oscillations and climate events imprinted into varved lacustrine sediments of Western Europe. European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, 24-29 April 2005; *Geophysical Research Abstracts* 7, 07337, 2005.
- Messyas, B., **Lücke, A.**, Schleser, G.H. (2005). Comparison of the spring and summer phytoplankton assemblages in stratified Lake Holzmaar (Germany) in different years. Fourth Symposium for European Freshwater Sciences (SEFS4), Krakau, 22.-26 August 2005, *Abstract Volume, 108*.
- Mingram, J., Schettler, G., Stebich, M., Liu, Q., Frank, U., Nowaczyk, N., **Lücke, A.**, Romer, R.L., Dulski, P., You, H., Chu, G., Liu, J., Negendank, J.F.W., Haug, G.H. (2005). First >60,000-year annually resolved lacustrine record of East Asian Monsoon variability from NE-China. PAGES 2<sup>nd</sup> Open Science Meeting, Beijing, *Conference Proceedings: 146-147*.
- Kowalczyk, K., **Lücke, A.**, Schleser, G.H. (2003). *Fragilaria crotonensis* in continuous culture experiments: studies on the carbon and nitrogen isotopic composition. 17.

Treffen deutschsprachiger Diatomologen (Osterholz-Scharmbeck, 03. - 06. April 2003).

**Lücke, A., Brauer, A. (2003).** Schnelle Klimaänderungen im Spätglazial und am Übergang zum Holozän in varvierten Seesedimenten des Meerfelder Maars. 6te. Deutsche Klimatagung, Potsdam.

**Lücke, A., Moschen, R., Schleser, G.H. (2003).** The high temperature cell (HTC). A novel technique for the quantitative liberation of oxygen isotopes from biogenic silica. International Symposium on "Environmental change in Central Asia: Climate – Geodynamics – Evolution – Human Impact", Berlin, 10. – 15 March 2003.

## ABSCHLUSSBERICHT

### Netzwerkprojekt PROSIMUL

#### **Klimavariabilität des Spätquartärs in jährlicher bis hundertjähriger Auflösung: Vergleich von Proxy-Daten aus synchronisierten terrestrischen Archiven und numerischen Simulationen (PROSIMUL)**

---

##### **Vorhabensbezeichnungen:**

**PROSIMUL I:** Klimavariabilität und absolute Zeitskala des Spätglazials aus einem Netzwerk von Jahrringchronologien (01 LD 0001)

**PROSIMUL II:** Stabile Isotope in hochauflösenden Sedimenten von Kraterseen als Ausdruck von Klimavariabilität (01 LD 0002)

**PROSIMUL III:** Klimavariabilität in den Zentralalpen und den amerikanischen Kontinenten: Umweltdynamik und Telekonnektionen abgebildet in lakustrinen Ostracoden (01 LD 0003)

in Zusammenarbeit mit

**MIDHOL:** Transiente Simulation des Mittleren Holozäns mit einem gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodell (01LD0301)

**Laufzeit (maximal):**  
01.07.2001 bis 30.06.2006



**Berichtszeitraum:**  
01.07.2001 bis 30.06.2006

---

### Arbeitspakete im Netzwerk PROSIMUL

#### **1. Synchronisation der PROSIMUL Archive**

##### ***Ziele/Hypothesen:***

**Erarbeitung einer homogenen Zeitachse für die PROSIMUL Archive aus dem Spätglazial und Holozän.**

##### ***Ergebnisse/Interpretation:***

Das Altersmodell des von PROSIMUL II und III bearbeiteten Sedimentkerns aus dem Bodensee, der die letzten 16,000 Jahre umfasst, wurde anhand der neuen Datierungen aus INTCAL04 (PROSIMUL I) verändert. Die Datierungen des Endes der Jüngeren Dryas (jetzt 11.590 YBP) und des Ausbruchs des Laacher Sees (jetzt 13.160 BP) wurden nach Friedrich et al. (2004) und Kromer et al. (2004) angepasst und im Manuskript Hanisch et al. verwendet. Sämtliche Altersangaben im folgenden Text sind als YBP (years before present (1950 AD)), wobei es sich um kalibrierte Altersangaben handelt.

Die Chronologie des Sedimentprofils aus dem Bodensee (Bo97/14, Wassertiefe 186 m) basiert auf Radiokarbon-Datierungen, Warvenzählung und Korrelationen von Markerhorizonten und magnetischer Suszeptibilität mit bereits datierten Kernen. Die Zeitachse ist am Markerhorizont der Laacher See Tephra (LST), entsprechend dem nach der überarbeiteten neuen Ringbreitenchronologie revidierten Alter des LST (Friedrich et al., 2004, Kromer et al., 2004), verankert. Der Beginn der Jüngeren Dryas wurde entsprechend der überarbeiteten Ringbreitenchronologie datiert. Der Beginn der holozänen Sedimentation wurde über eine Kombination aus abnehmenden  $\delta^{18}\text{O}$  Werten der Ostracoden sowie einem scharfen Rückgang der magnetischen Suszeptibilität und einem Anstieg der Gehalte von biogenem Calcit im Sediment ermittelt.

Die Chronologie des Meerfelder Maares (MFM) basiert auf kontinuierlichen Warvenzählungen und Messungen der Warvendicke über die Analyse von mikroskopischen Dünnschliffen. Eine Kontrolle der Zählungen erfolgte über die Tephralagen des Laacher See Ausbruchs (LST, 12.880 YBP) und der Ulmener Maar Tephra (UMT, 11.000 YBP). Die so aufgebaute Chronologie wurde zusätzlich über AMS  $^{14}\text{C}$ -Datierungen abgesichert (Brauer et al., 2000). Die Jüngere Dryas ist als Biozone nach Litt und Stebich (1999) definiert.

Die spätglaziale und holozäne Chronologie des Holzmaares (HZM) basiert auf kontinuierlichen Warvenzählungen und Dickenmessungen über die Analyse von mikroskopischen Dünnschliffen (Zolitschka, 1992). Die statistischen Unsicherheiten belaufen sich auf weniger als 10 Jahre pro 1.000 Jahre. Die ursprüngliche Warvenchronologie wurde über  $^{14}\text{C}$ -Datierungen an die Dendrokalibrationskurve (INTCAL) angepasst. Ein Vergleich zwischen den beiden Chronologien der Eifelmaare Meerfelder Maar und Holzmaar über Pollenmarker erbrachte eine ausgezeichnete zeitliche Übereinstimmung der Chronologien (Brauer et al., 2000).

Die spätglaziale Chronologie des Hämelsees (HAE) basiert auf Warvenzählungen und Dickenmessungen in Kombination mit  $^{14}\text{C}$ -Datierungen. Der überwiegende Teil der Sedimente der Jüngeren Dryas ist nicht warviert. Die Dauer der Jüngeren Dryas (1.140 Jahre) wurde daher aus dem warvierten Lake Gosciadz (Polen) übernommen (Merkt und Müller, 1999). Die Synchronisation der unabhängigen Chronologien von Meerfelder Maar und Hämelsee erfolgte über definierte isochrone Ankerpunkte (LST und palynologische Ankerpunkte).

Die spätglaziale und holozäne Chronologie des Huguang Maares basiert auf acht AMS Radiocarbon-Datierungen (Mingram et al., 2004). Eine zusätzliche Absicherung dieser Chronostratigraphie durch zusätzliche  $^{14}\text{C}$ -Datierungen war nicht durchführbar, da keine weiteren terrestrischen Makroreste aus den Sedimenten gewonnen werden konnten. Eine unabhängige Kontrolle der Chronologie über absolute Tephra-Zeitmarker (z.B. LST) war für dieses Profil nicht möglich, da keine Tephralagen gefunden wurden.

Für die detaillierte Darstellung der Ringbreitenchronologie wird auf den Abschlußbericht von Prosimul I (Michael Friedrich) verwiesen.

Die Synchronisation der Archive im Holozän konnte auf Basis der kalibrierten  $^{14}\text{C}$  Alter erfolgen. Alle verwendeten lakustrinen Archive wurden über die Kalibration der  $^{14}\text{C}$  Rohwerte mit der dendrochronologischen Radiocarbon Kalibrationskurve (INTCAL) in eine identische absolute Altersskala eingehängt. Daher können die Zeitreihen im Holozän, innerhalb bestimmter Fehlergrenzen, auf ihren Zeitskalen direkt miteinander verglichen werden. Die Überprüfung dieses Ansatzes der Synchronisation für die Archive (HZM, MFM) mittels palynologischer Markerpunkte erbrachte sehr gute Übereinstimmungen (Zolitschka et

al., 2000). Für die im Holozän untersuchten Fragestellungen sind dabei die mit dem Ansatz verbundenen Fehlergrenzen vernachlässigbar.

Um Anpassungsfehler im Zuge der Synchronisation zu vermeiden, wurden für den Vergleich der Proxydaten aus dem Spätglazial die Zeitreihen vom Bodensee, dem Meerfelder Maar und aus der Kiefernchronologie auf ihren unabhängigen Zeitskalen verwendet. Durch diesen Ansatz der unabhängigen Chronologien ergab sich eine gute Altersübereinstimmung für die Grenze Jüngere Dryas/Präboreal (11.590 YBP). Im Gegensatz dazu ergab sich für die Grenze Allerød/Jüngere Dryas eine deutliche Diskrepanz zwischen dem Meerfelder Maar und den übrigen Archiven. Dies liegt an der unterschiedlichen Festlegung für das Alter der LST. Während die überarbeitete Kiefernchronologie und die daran angepasste Bodenseechronologie von einem Alter von 13.160 YBP für die LST ausgehen, legen die warvierten Sedimente und damit das Meerfelder Maar ein Alter von 12.880 YBP für die LST fest. Dieser Widerspruch konnte nicht aufgelöst werden, da es in der Warvenchronologie des Meerfelder Maares auch nach nochmaliger Überprüfung keine Anzeichen für einen mehrhundertjährigen Hiatus gibt (A. Brauer, mündliche Mitteilung). Damit ist ebenfalls ungeklärt, wie ein eventueller Altersfehler in der Meerfelder Maar Chronologie ausgeglichen werden sollte. Die Frage ob es sich dabei um einen Hiatus oder einen Zählfehler handeln könnte, ist aber für die Zuweisung der neuen Alter und damit dem späteren Vergleich der Proxyparameter zwischen den Archiven von entscheidender Bedeutung. Auf dem derzeitigen Kenntnisstand, auf dem auch die Kiefernchronologie noch nicht durchgehend bis zur LST geschlossen ist, erwies es sich daher als sinnvoller, den LST als relative Zeitmarke zu verwenden. Dies erlaubt einen aussagekräftigen Vergleich zwischen den Archiven und den jeweiligen Proxyparametern auf den entsprechenden unabhängigen Zeitskalen und verhindert die Einführung, im Zuge einer unpräzisen Korrektur unvermeidbarer, neuer Altersfehler.

## **2. Abrupte Klimaänderungen und stabile Klimazustände des Spätglazials in Mitteleuropa: Ursachen, Ablauf und Auswirkungen**

### ***Ziele/Hypothesen:***

Im Rückgang der Jahrringbreiten süddeutscher Kiefern (P-I), dem Anstieg der Kohlenstoffisotopie im organischen Material des Meerfelder Maares und des Hämelsees (P-II) sowie im  $\delta^{18}\text{O}$  benthischer Ostracoden aus dem Bodensee (P-III) zeigen sich synchrone Änderungen zu Beginn und Ende der Jüngeren Dryas sowie ein mehrphasiger Verlauf dieser Kältephase. Mit der Korrelation unser Proxies wollen wir abschätzen, wie schnell und wie stark sich das Klima im Spätglazial geändert hat und ob diese Änderungen in unterschiedlichen Archiven synchron stattgefunden haben. Verschiedene Temperaturproxies sollen zeigen, wie stark der Temperaturrückgang während der Jüngeren Dryas war.

### ***Ergebnisse/Interpretation:***

Die Diskussion der Klimaentwicklung im Spätglazial erfolgt anhand von synchronisierten Proxydaten aus PROSIMUL, die auf ihren unabhängigen Zeitskalen dargestellt sind. Die Isotopenverhältnisse ( $\delta^{18}\text{O}$ ) benthischer Ostracoden aus dem Bodensee (a) geben die Isotopenzusammensetzung der Niederschläge in den Alpen und im Voralpenraum wieder (Schwalb, 2003). In den Ringbreiten der spätglazialen deutschen Kiefernchronologie (*Pinus sylvestris* L.) (b) zeigen sich die Wuchsbedingungen während der Vegetationsperiode, die im Wesentlichen durch die mittlere Lufttemperatur im Sommer und die Länge der Vegetationsperiode geprägt sind. Die Akkumulationsraten der minerogenen Substanz (Min-SAR) im Meerfelder Maar (c) stellen die Erosion und die Höhe der Schneeschmelzabflüsse im Frühjahr im Einzugsgebiet des Sees dar. In den Isotopenverhältnissen der organischen



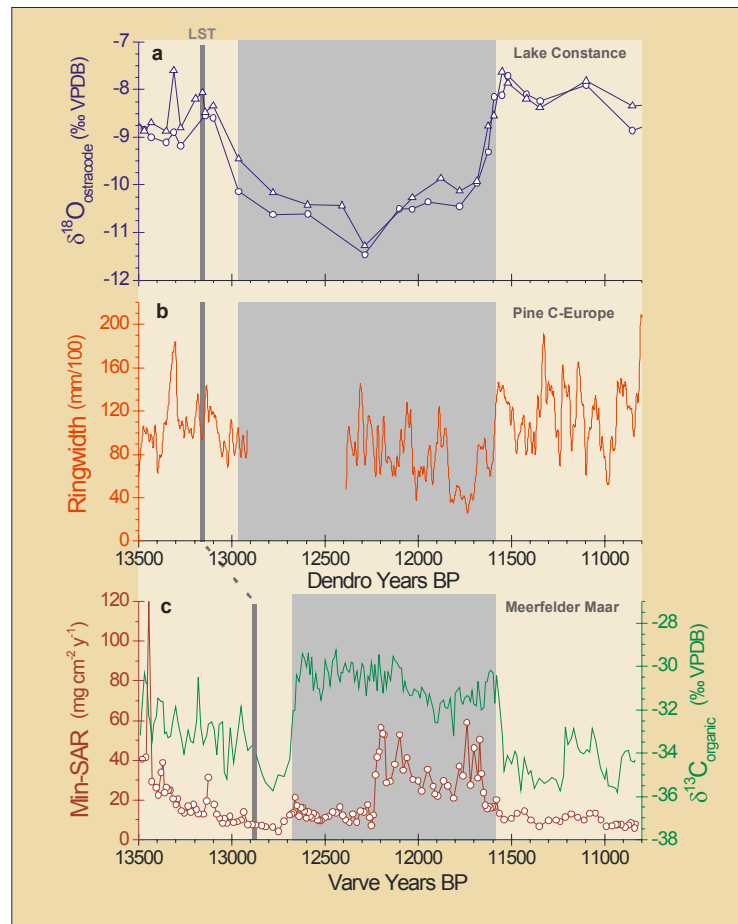
Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) der Meerfelder Maar Sedimente spiegelt sich die Primärproduktion lakustriner Algen, geprägt durch die Wachstumsbedingungen der Vegetationsbedingungen, wider (Lücke und Brauer, 2004).

Für den Übergang Jüngere Dryas/Präboreal bei 11.590 YBP zeigen die Proxydaten deutlich ausgeprägte, synchrone und rasch verlaufende Veränderungen von einer kälteren Jüngeren Dryas hin zu einem wärmeren Präboreal (Abb. 2.1). Die abrupte Zunahme der Ostracoden  $\delta^{18}\text{O}$  Werte von 2,8 ‰ im Bodensee zeigt einen Anstieg der mittleren Temperaturen von ca. 7°C an (Schwalb, 2003). Die schnelle Verdopplung der mittleren Ringbreiten der deutschen Kiefernchronologie innerhalb weniger Dekaden kann als eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen, durch erhöhte Sommertemperaturen oder durch die Verlängerung der Vegetationsperiode, interpretiert werden. Im Rückgang der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte des Meerfelder Maares zeigt sich eine erhöhte Primärproduktion während der Übergangsjahreszeiten und damit eine Verlängerung der Vegetationsperiode. Dagegen zeigt der Abfall der minerogenen Akkumulationsraten eine Verringerung der Schneeschmelzabflüsse im Frühjahr, die in Zusammenhang mit geringeren Winterniederschlägen zu bringen sind.

Für den Übergang Allerød/Jüngere Dryas zeigen sich in Bezug auf die Veränderungsgeschwindigkeit Unterschiede in den einzelnen Proxyparametern. Die Kiefernchronologie, die an dieser Grenze lediglich auf wenigen Bäumen basiert, zeigt keine deutlichen Änderungen der sommerlichen Wachstumsbedingungen an. Dagegen zeigt der deutliche Abfall der Ostracoden  $\delta^{18}\text{O}$  Werte um 1,9 ‰ einen Rückgang der mittleren Temperaturen um 5°C an (Schwalb, 2003). Im Vergleich zu den Proxydaten aus dem Bodensee zeigen die Meerfelder Maar Daten am Übergang Allerød/Jüngere Dryas sehr deutliche Veränderung, die analog den schnellen Veränderungen aller Proxyparameter am Übergang Jüngere Dryas/Präboreal sind. Die an der Grenze Allerød/Jüngere Dryas rasch ansteigenden  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte des Meerfelder Maares zeigen einen Anstieg der lakustrinen Primärproduktion an. Die Kohlenstoffisotopenverhältnisse, die während der gesamten Jüngeren Dryas relativ angereichert sind, können nur durch relativ warme Sommertemperaturen erklärt werden (Lücke und Brauer, 2004). Hierin zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den mittleren Ringbreiten der Kiefernchronologie, die in der mittleren Jüngeren Dryas noch moderate Werte aufweisen.

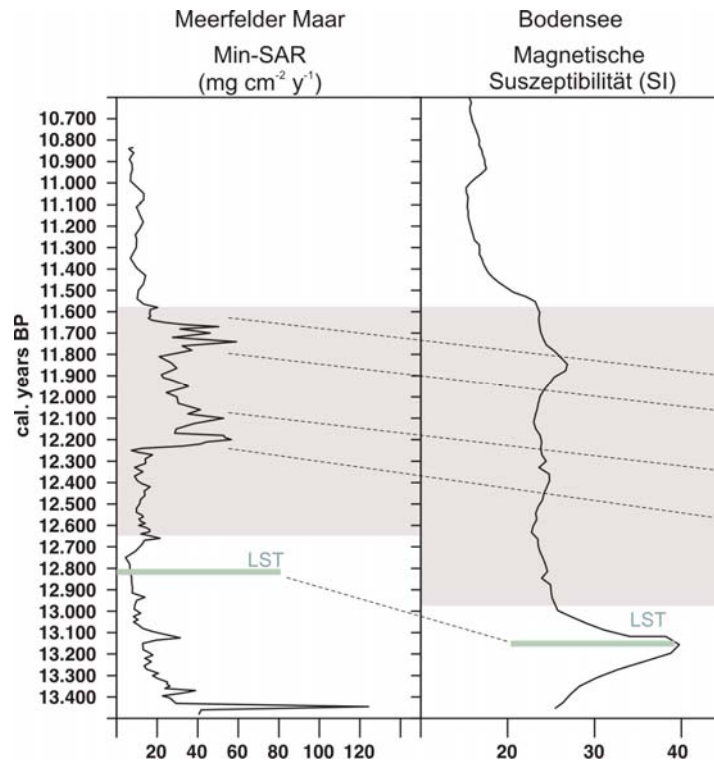
Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass die Grenze Allerød/Jüngere Dryas und damit auch die Jüngere Dryas durch einen Anstieg der Saisonalität gekennzeichnet sind. Da die Sommertemperaturen und die Dauer der Vegetationsperiode ein mittleres Baumwachstum erlauben, kann die ebenfalls detektierte Abkühlung im Wesentlichen auf die Wintermonate begrenzt werden. Diese Interpretation steht in Übereinstimmung mit Ergebnissen aus Südgrönland (Björck et al., 2002) und aus den Schweizer Alpen (Lotter et al., 2000).

In Bezug auf die klimatischen Verhältnisse während der Jüngeren Dryas zeigen unsere Proxydaten variable Bedingungen mit unterschiedlichen Phasen an. Beide Arten von Ostracoden aus dem Bodensee lassen für die zentrale Jüngere Dryas minimale Temperaturen erkennen. Demgegenüber zeigen die zum Ende der Jüngeren Dryas abnehmenden Ringbreiten, in Kombination mit einer deutlichen Zunahme fehlender Ringe und Frostringe (auch im Spät- und Sommerholz), insbesondere im Zeitraum 11.850-11.600 YBP, eine massive Verschlechterung der sommerlichen Wachstumsbedingungen gegen Ende der Jüngeren Dryas an. Ähnliche Hinweise ergeben sich sowohl aus den minerogenen Akkumulationsraten im Meerfelder Maar, die für den Zeitraum nach 12.250 YBP einen starken Anstieg der Schneeschmelzniederschläge im Frühjahr nahe legen, als auch aus den ab 12.100 YBP im Vergleich zur vorherigen Periode niedrigeren  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten. Insgesamt könnten diese Evidenzen als Hinweis auf kältere und/oder Sommer mit stärkerer Bewölkung sowie schneereiche Winter in der zweiten Hälfte der Jüngeren Dryas interpretiert werden.



**Abb. 2.1:** Vergleich von Proxydaten für das Spätglazial aus unterschiedlichen Archiven dargestellt auf ihren entsprechenden Zeitskalen. (a) Bodensee: Sauerstoffisotopenzusammensetzung der benthischen Ostracoden *Leucocythere mirabilis* ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ostracodes}}$ , Dreiecke) und *Limnocythere sanctipatricii* ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ostracodes}}$ , Kreise). (b) Geglättete Ringbreiten der überarbeiteten absolut datierten deutschen Kiefernchronologie (Holozän) und der schwebenden Kiefernchronologie für das Spätglazial, zeitlich eingehängt über  $^{14}\text{C}$  Wiggle-Matching mit der Cariaco-Warvenchronologie. (c) Meerfelder Maar: Akkumulationsraten der minerogenen Substanz (Min-SAR, Kreise) und die Isotopenzusammensetzung der hauptsächlich autochthon geprägten organischen Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ , Linie) der profundalen Sedimente. Die Chronozone der Jüngeren Dryas ist grau hinterlegt; dunkelgraue Linien stellen die absolute Zeitmarke der Laacher See Tephra dar. Die Chronologien entsprechen Hanisch et al. (subm.) für den Bodensee, Friedrich et al. (2004) für die Kiefernchronologie und Brauer et al. (2000) für das Meerfelder Maar.

Die Verteilungskurven der minerogenen Akkumulationsraten aus dem Meerfelder Maar und der magnetischen Suszeptibilität der Bodensee-Sedimente (Abb. 2.2) zeigt jeweils zwei Perioden erhöhten terrigenen Eintrags während der Jüngeren Dryas. Aufgrund der unterschiedlichen Altersmodelle in Bezug auf die Datierung der LST in beiden Archiven können die Kurven nur mit dem sich hieraus ergebenden zeitlichen Versatz interpretiert werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Variation der magnetischen Suszeptibilität auch auf die oben beschriebenen Klimaschwankungen während der Jüngeren Dryas (Abb. 2.1) zurückzuführen ist und sich archiv- und proxyübergreifend in den Seesedimenten durchpaust.



**Abb. 2.2:** Vergleich hochauflösender Proxies spätglazialer Sedimente aus verschiedenen Archiven. Meerfelder Maar: Akkumulationsraten mineralogischer Substanz; Bodensee: Magnetische Suszeptibilität.

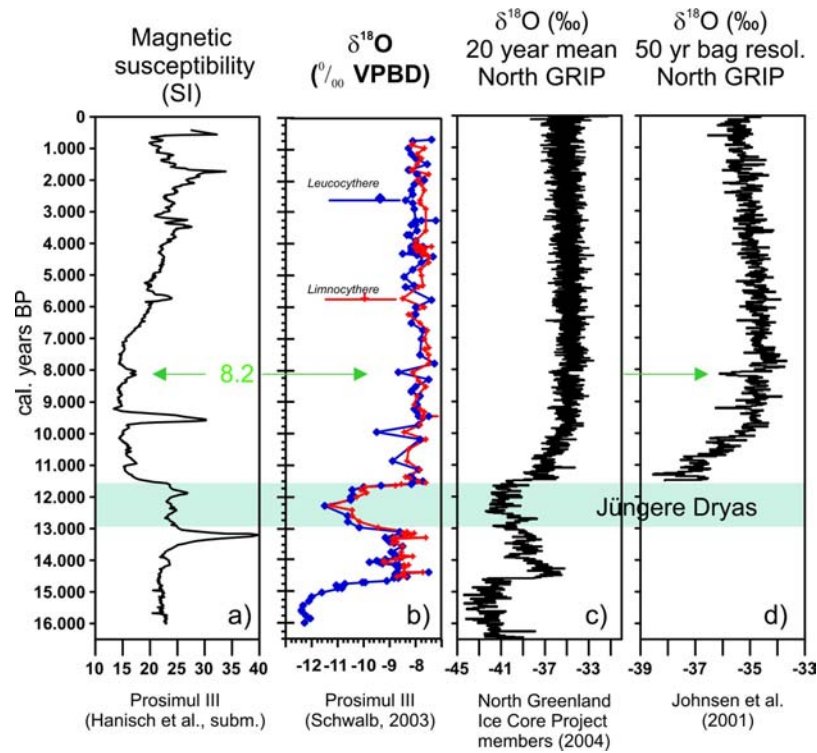
### 3. Veränderungen des Ausmaßes und der Häufigkeit von Hochwässern im späten Holozän. Ist die Ursache Klima oder der Mensch?

#### **Ziel/Hypothese:**

Die Zunahme der Ablagerung süddeutscher Flusseichen und ein erhöhter Eintrag terrestrischen Materials in mitteleuropäische Seen zeigt eine Zunahme der Frequenz und des Ausmaßes von Hochwässern seit etwa 5.000 Jahren an. Da zeitgleich der Mensch begonnen hat, durch Rodungen die Erosionsraten zu erhöhen, ist bislang nicht geklärt, ob die Ursache der starken Zunahme der Hochwässer natürlich oder zumindest teilweise anthropogen bedingt war.

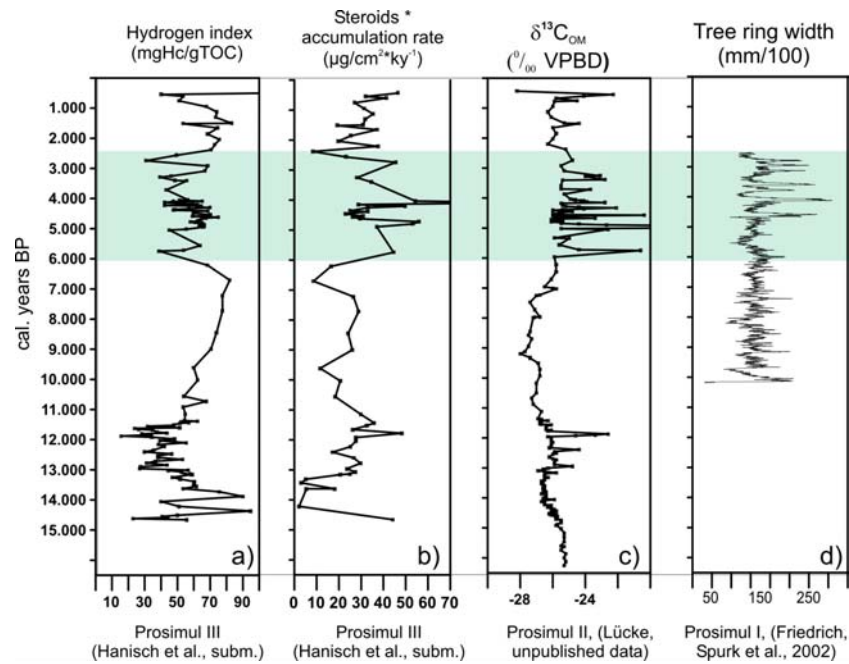
#### **Ergebnisse/Interpretation:**

Die spätglazialen und holozänen Sedimente aus dem Bodensee (Kern 97/14) repräsentieren die klimatischen Veränderungen in Europa während der letzten 16.000 Jahre (Abb. 3.1). Das  $\delta^{18}\text{O}$  benthischer Ostracoden (P-III) zeigt den Verlauf der mitteleuropäischen Temperaturgeschichte. Magnetische Suszeptibilität (P-III) und  $\delta^{18}\text{O}$  markieren deutlich die Kälteperiode der Jüngeren Dryas, den abrupten Übergang zum Holozän und das 8.2-Ereignis (Bond et al., 1997, Barber et al., 1999). Der Anstieg der magnetischen Suszeptibilität ab 7.000 YBP auf das Niveau der Jüngeren Dryas korreliert nicht mit den Isotopenwerten aus den Ostracoden und nur eingeschränkt mit den  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten aus grönländischen Eiskernen (North GRIP). Dies legt den Schluss nahe, dass regionale Prozesse die globale Klimasignatur in den Sedimenten ab 7.000 YBP überprägen.



**Abb. 3.1:** Vergleich zwischen Proxydaten aus dem Bodensee (Bo97/14) und Grönland. a) Magnetische Suszeptibilität, b)  $\delta^{18}\text{O}$  benthischer Ostracoden, c)  $\delta^{18}\text{O}$  aus grönländischen Eiskernen

Anhand dieser klimageschichtlich repräsentativen Sedimente aus dem Bodensee wurden mit verschiedenen Proxies klimatische und/oder anthropogen gesteuerte Veränderungen im Einzugsgebiet untersucht und mit Schwankungen der Ablagerungsraten von Eichenstämmen aus dem Süddeutschen Raum verglichen (Abb. 3.2).

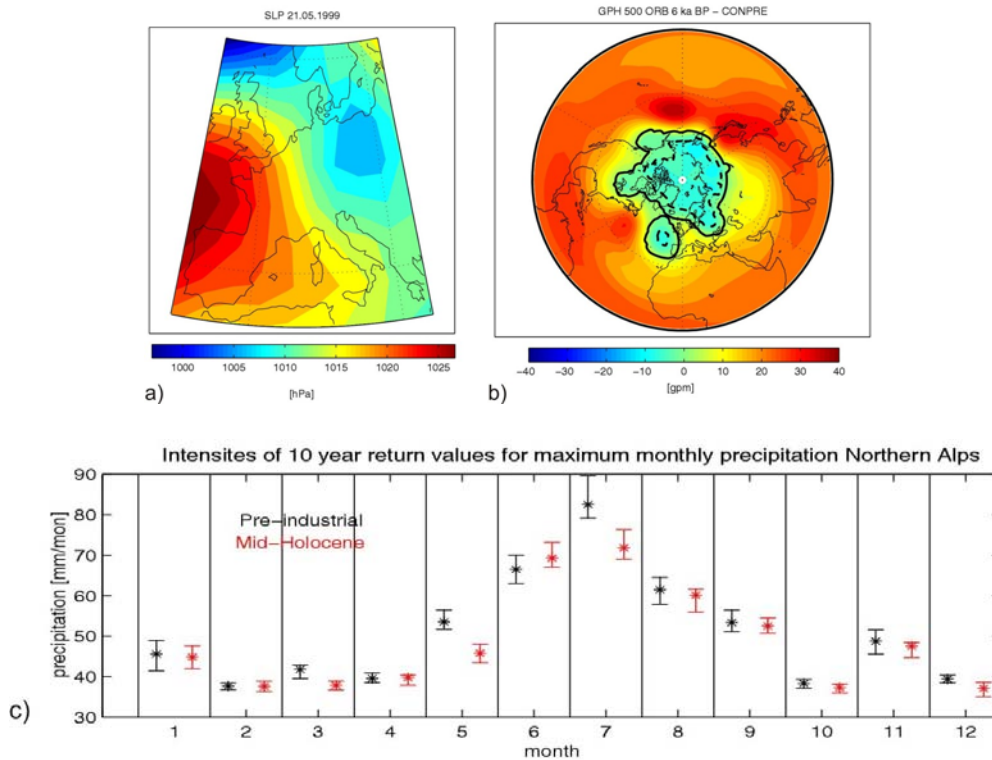


**Abb. 3.2:** Vergleich von Proxydaten aus dem Bodensee (Bo97/14) und der süddeutschen Eichenchronologie aus PROSIMUL I-III. Bodensee: Wasserstoffindex (a), Steroid-Akkumulationsraten (\*  $\beta$ -sitosterol + stigmasterol + stigmasterol) (b), ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) (c). Eichenchronologie: d) Baumringbreiten. Die Phase der Häufung hydrologischer Extremereignisse ist farbig hinterlegt.

Erste Hinweise auf einen deutlichen Wandel in der Zusammensetzung der organischen Substanz in den Sedimenten des Bodensees ab ca. 6.500 YBP gibt der Wasserstoffindex. Er zeigt eine Abnahme der Kohlenwasserstoffe in der organischen Substanz zwischen 6.500 und 2.500 YBP auf ein Niveau, das fast das der Jüngerer Dryas erreicht. Die Akkumulationsrate von Biomarkern, die Landpflanzen zugeordnet werden ( $\beta$ -Sitosterol, Stigmastanol, Stigmasterol), zeigt gleichermaßen erhöhte Werte in dieser Zeit. Dies deutet auf einen erhöhten terrigenen Eintrag in den Bodensee hin, der fast so hoch wie während der Jüngerer Dryas ist. Die Ursache dafür könnten in klimatischen Änderungen (höhere Niederschläge, häufigere Hochwässer) oder zunehmendem anthropogenen Einfluss (Rodung, verstärkte Erosion) liegen. Die Kohlenstoffisotopenwerte der gesamten organischen Substanz ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) der Sedimente zeigen ebenfalls eine starke Häufung positiver Extremwerte im Zeitfenster von 6.000 bis 2.500 YBP, mit wesentlich größeren Amplituden als während der Jüngerer Dryas. Die Extremwerte im Holozän können nicht als Hinweis auf relativ kurzfristige Änderungen der lakustrinen Primärproduktion gewertet werden, sondern sind als Eintrag von nicht-planktonischer organischer Substanz zu interpretieren. Hierin zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Biomarker-Analysen. Die Isotopenverhältnisse, die  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte von bis zu  $-22,0\text{‰}$  erreichen, geben zusätzliche Hinweise auf die Herkunft des an die Kernlokation gebrachten Materials. Derartig angereicherte  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte sind, in Verbindung mit relativ abgereicherten  $\delta^{15}\text{N}$  Werten (nicht dargestellt), in temperierten Klimata nur von submersen Wasserpflanzen bekannt. Zusätzlich zum Eintrag von terrigenem Material, abgeleitet aus der Akkumulation von Landpflanzen-Biomarkern, deutet sich daher in den  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten ein verstärkter Eintrag von Wasserpflanzenmaterial aus Ufer- und/oder Flussmündungsbereichen an. Damit belegen alle Proxyparameter über die Zusammensetzung des organischen Materials in Bodensee-Sedimenten eine Häufung hydrologischer Extremereignisse zwischen 6.000 und 2.500 YBP. Diese Interpretation wird durch die Kurzkernelstudien für den Bodensee unterstützt (s. AP 7).

Der Vergleich mit Ringbreiten der Hohenheimer Eichenchronologie (Spurk et al., 2002) zeigt eine ebenfalls erhöhte Schwankungsbreite in der zweiten Hälfte des Holozäns, die allerdings erst ab 4.500 YBP einsetzt. Die Ringbreiten geben direkte und exakt datierte Informationen zur Hochwasseraktivität von Main, Donau und Rhein, sowie zu Wiederbestockungsphasen des Auwaldes. Schwankungen des Alterstrends der Eichen zeigen Standortveränderungen wie Auflichtungsphasen der Auwälder (Spurk et al., 2002), die durch anthropogenen Einfluss verursacht werden können. Die zeitliche Differenz von 1.500 Jahren zum Beginn der Phase verstärkten terrigenen Eintrags in den Bodensee lässt darauf schliessen, dass episodische Veränderungen in der Zusammensetzung des organischen Materials im Bodensee als eine durch klimatische Ursachen bedingte Phase erhöhter Hochwasserhäufigkeiten in Süddeutschland und angrenzenden Gebieten interpretiert werden kann, die bereits ab 6.000 YBP einsetzte.

Zur genaueren Unterscheidung von klimatischen und anthropogenen Ursachen für den erhöhten terrigenen Eintrag in der zweiten Hälfte des Holozäns, den die Ergebnisse der Proxy-Analysen aus P-II und P-III zeigen, wurden vom Projekt MIDHOL für den Zeitraum 6.500 bis 4.500 YBP Simulationen mit dem globalen Klimamodell ECHO-G durchgeführt. Ausgehend von Zirkulationsmustern, die unter heutigen Bedingungen Extremniederschläge und nachfolgend Hochwasserereignisse begünstigen (Abb. 3.3), Nordströmung mit verstärkten Stauwirkungen am Alpennordrand) konnte für das mittlere Holozän kein Hinweis auf verstärkte Extremniederschlagsereignisse festgestellt werden. Vielmehr deutet sich in den Simulationsergebnissen eine Abnahme von Extremniederschlagsereignissen im mittleren Holozän gegenüber heute an (Wagner et al., 2006).



**Abb. 3.3:** Simulationsergebnisse aus dem Projekt MIDHOL (Wagner): a) Heutige Nordstaulage, die zu Hochwasserereignissen im Bodensee führt. b) Simulierte Verlagerung der Polarfront im untersuchten Zeitraum (6.500 - 4.500 YBP). c) Reduzierte Niederschlagswerte (Extremereignisse) im Simulationszeitraum im Vergleich zu heute.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse aus PROSIMUL I, II und III und die Simulationen von MIDHOL erlauben die Schlussfolgerung, dass menschlicher Einfluss wie z.B. Rodungen mit nachfolgender höherer Erosion bereits für das mittlere Holozän nicht auszuschließen ist. Da jedoch kein direkter Hinweis auf menschlichen Einfluss in den Sedimenten nachgewiesen wurde, dürfen Unsicherheiten in Bezug auf die Modellierbarkeit der Niederschlagsverteilung im mittleren Holozän nicht außer Acht gelassen werden. Zumindest deutet sich in den Ringbreitenuntersuchungen von Au-Eichen aus den süddeutschen Flusseinzugsgebieten ein eher späteres Einsetzen des markanten menschlichen Einflusses (4.500 Jahre BP) in den Landschaftswasserhaushalt an.

Wagner, S., Hanisch, S., Jones, J., Lücke, A., Schwalb, A., Widmann, M. (2006). Rekonstruktion von Extremniederschlagsereignissen im Bodenseeraum während des mittleren Holozäns durch transiente Klimasimulation und Proxydaten. Abstract/Poster, Deutsche Klimatagung München.

#### 4. Telekonnektionen zwischen Nordamerika und Mitteleuropa im späten Holozän

##### **Ziele/Hypothesen:**

Der Vergleich von Proxies aus Pickerel Lake (P-III) und dem Holzmaar (P-II) zeigt ein ähnliches Muster zwischen 3.000 YBP und 1.500 YBP, das auf einen Zusammenhang zwischen spätholozänen Dürrezyklen im Mittleren Westen der USA (P-III) und Erosionsmaxima in Mitteleuropa (P-II) hinweist. Welche Rolle spielen Veränderungen in Lage und Stärke der Westerlies für das Klima des nordatlantischen Sektors in dieser Zeit? Spielen Variationen der solaren Aktivität für diese Zyklen eine Rolle?

**Ergebnisse/Interpretation:**

Spätholozäne Zyklen in magnetischer Suszeptibilität, die in den Sedimenten des Pickerel Lake, USA, nachgewiesen wurden, wurden durch die Bestimmung der Ostracoden-Artenvergesellschaftung genauer definiert. Häufigkeitsmaxima der Ostracode *Candona rawsoni*, eine Ostracodenart, die auch in Wässern mit erhöhter Turbulenz und einer Anreicherung von gelösten Stoffen infolge von Evaporation leben kann, korrelieren mit Maxima in magnetischer Suszeptibilität, die einen erhöhten Eintrag an detritischem Material anzeigen. Mit beiden Proxies können Phasen erhöhter Evaporation und Westwindaktivität rekonstruiert werden, die seit ca. 3.800 YBP alle 700 Jahre im Mittleren Westen auftreten.

Die Sedimentakkumulationsraten im Holzmaar zeigen ein entsprechendes Variabilitätsmuster lediglich in einem engen Zeitfenster von 2.700 Jahren bis 1.500 YBP (Abb. 4.1). Im Abschnitt vor 2.700 YBP deutet sich die Existenz eines solchen Musters allerdings in den  $\delta^{13}\text{C}$  Werten der organischen Substanz an. Auffallend für das Holzmaar ist der sehr starke positive Shift in beiden dargestellten Parametern gerade bei 2.700 YBP, der einen Vergleich mit dem Pickerel Lake erschwert. Neue Studien zeigen jedoch, dass es sich hierbei, entgegen der ursprünglichen Annahme, nicht um eine rein anthropogen verursachte Systemänderung handelt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass zunächst eine natürliche klimatische Veränderung einsetzte und erst nachfolgend der starke anthropogene Einfluss hinzu kam (A. Brauer, mündliche Mitteilung). In der Zeit nach 1.500 Jahren YBP ist dagegen für das Holzmaar derzeit von einem anthropogen geprägten Signal auszugehen.

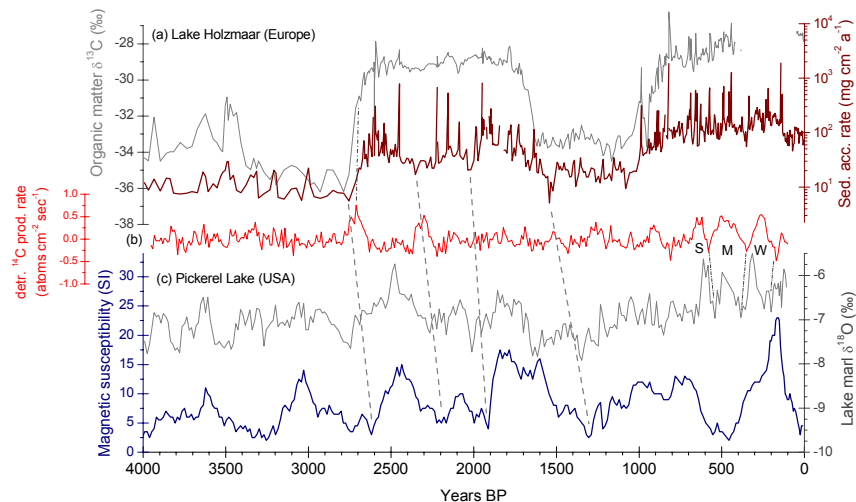
Für das Verständnis klimatischer Zusammenhänge zwischen Nordamerika und dem europäischen Kontinent ist es von entscheidender Bedeutung, deren grundlegenden Prozesse zu identifizieren. In den Proxydaten des Pickerel Lake und des Holzmaares ist ein 700jähriger Zyklus deutlich zu erkennen (2.700-1.500 YBP). Suszeptibilitätsmaxima in den Sedimenten des Pickerel Lake, die trockene und windige Bedingungen für Nordamerika anzeigen, korrelieren mit höheren Sedimentakkumulationsraten im Holzmaar, die auf feuchtere Bedingungen für Europa hinweisen. Wir vermuten hier eine Telekonnektion über den Nordatlantik, da die Westwindmaxima über Nordamerika mit Phasen erhöhter Meerwasseroberflächentemperaturen in z.B. den Nordic Seas korrelieren (N. Koç, unveröff. Daten). Möglicherweise kurbeln stärkere Westwinde den Golfstrom an, so dass mit höheren Meerwasseroberflächentemperaturen im Nordatlantik die Voraussetzung für stärkere Niederschläge in West-Europa geschaffen wird. Diese Telekonnektionen sollen durch Simulationen mit einem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell in einem bereits beantragten Folgeprojekt getestet werden.

Darüber hinaus ergeben sich aus den untersuchten Proxies klare Hinweise für einen solaren Einfluss auf das Klima. Dies gilt insbesondere für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{marl}}$  Werte aus dem Pickerel Lake, die für die solaren Minima der Kleinen Eiszeit prägnante Maxima zeigen und Absenkungen der Sommertemperaturen während der Sonnenfleckenminima von ca. 3-4°C ableiten lassen. (Abb. 4.1). Zusätzlich korrelieren auch die beiden ausgeprägten solaren Minima bei 2.300 und 2.700 YBP mit entsprechenden Minima der Sedimentakkumulationsraten im Holzmaar und der Suszeptibilität im Pickerel Lake.

Ein weiterer Hinweis auf solaren Einfluss ergibt sich aus dem Vergleich der Frequenzmuster. Im Holzmaar konnte über Zeitreihenanalysen des Nährstoff- und Produktivitätsproxy  $\delta^{15}\text{N}$  eine Periode von 340 Jahren nachgewiesen werden, deren Phasenverhalten im späteren Holozän zwar sehr unruhig wird, die aber dennoch erhalten bleibt. Eine vergleichbare Frequenz wurde auch in Isotopen-Proxydaten des Meerfelder Maares gefunden (s. Bericht PII). Interessanterweise haben Keeling & Whorf (2000) eine Periode mit vergleichbarer Zyklendauer als luni-solaren Zyklus interpretiert. Die Zyklendauer von 340 Jahren entspricht innerhalb der Unsicherheitsbereiche einer halben Periodendauer des im Pickerel Lake



beobachteten 700jährigen Dürrezyklus. Dabei ist auch hier ein Phasenversatz zwischen den Zyklen zu beobachten. Eine genauere Klärung der Mechanismen, über die sich der solare Einfluss in die lakustrinen Proxyparameter in Nordamerika und Europa einprägt, muss aber nachfolgenden Projekten vorbehalten bleiben.



**Abb. 4.1:** Vergleich von Proxydaten aus dem Holzmaar in Europa (Lücke et al., 2003) und dem Pickerel Lake in Nordamerika (Schwalb, 2003, Schwalb et al., 2003b). (a) Holzmaar: Kohlenstoffisotopenzusammensetzung der organischen Substanz ( $\delta^{13}\text{C}$ , grau) und jährliche Sedimentakkumulationsraten (braun, log-Skala). (b) Solare Aktivität dargestellt als  $^{14}\text{C}$  Produktionsraten (INTCAL, Stuiver et al., Radiocarbon 1998, B. Kromer, mündliche Mitteilung). Solare Minima der letzten Jahrhunderte sind gekennzeichnet: Spörer (S), Maunder (M), Wolf (W). (c) Pickerel Lake: Sauerstoffisotopenzusammensetzung von Seekreiden ( $\delta^{18}\text{O}$ , grau) sowie Variationen der magnetischen Suszeptibilität (blau).

## 5. Telekonnektionen zwischen den Tropen und der Antarktis am Übergang Spätglazial/Holozän?

### **Ziel/Hypothesen:**

Multi-Proxyanalysen zeigen drastische Seespiegelschwankungen des Lago Cardiel (P-III und Kooperationspartner) an der Grenze Spätglazial/Holozän, die auf Änderungen im Niederschlagsregime zurückzuführen sind. Es soll untersucht werden, ob diese Niederschlagsänderungen durch Änderungen in der Lage der subtropischen Hochdruckgebiete, und den damit verbundenen Verschiebungen der südhemisphärischen Westwindzone (südliche Grenze der Hochdruckzone) und der Passatwinde (nördliche Grenze der Hochdruckzone) erklärt werden können.

### **Ergebnisse/Interpretation:**

Der Lago Cardiel war bis zum Beginn des Holozän ein kleiner und sehr flacher See. Zwischen 10.000 und 9.000 YBP stieg der Seespiegel innerhalb weniger Jahrzehnte um 130 m an. Zwischen ca. 8.000 und 6.000 Jahren vor heute sank der Seespiegel um ca. 50 m. Seit 6.000 Jahren vor heute schwankt der Seespiegel ca.  $\pm 10$  m um das heutige Niveau und Proxies zeigen eine gute Durchmischung des Wasserkörpers an, die auf stärkere Windeinwirkung zurückgeführt werden könnten. Auswirkungen von Lageänderungen des südhemisphärischen Westwindgürtels auf die Niederschläge in der Südhemisphäre wurden von MIDHOL zunächst



für den Zeitabschnitt des Mittleren Holozän untersucht, für ältere Zeitabschnitte liegen noch keine Ergebnisse vor.

Die Simulationsergebnisse von MIDHOL deuten auf eine stärkere Saisonalität in der Lage der südhemisphärischen Westwinde hin. Die Westwinde zeigen im Vergleich zu einer Simulation mit vorindustriellen Bedingungen eine Südwärtsverlagerung während des Südwinters und eine Nordwärtsverlagerung während des Südsommers. Die Westwinde stehen ebenfalls in Zusammenhang mit Veränderungen des Niederschlags über Patagonien. Hierbei zeigen sich allerdings nur moderate Korrelationen, welche grundsätzlich verstärkte Westwinde mit reduzierten Niederschlägen und umgekehrt aufzeigen. Somit konnte für den südpatagonischen Raum ebenfalls eine verstärkte Saisonalität in den Niederschlägen während des mittleren Holozäns festgestellt werden.

Unterschiede in der jahreszeitenspezifischen Breitenlage der südlichen Westwinde können durch die von den orbitalen Erdbahnparametern verursachten Einstrahlungsunterschiede zwischen dem mittleren Holozän und der vorindustriellen Zeit erklärt werden. Ein wichtiger Prozess sind hierbei meridionale troposphärische Temperaturgradienten zwischen den Tropen und der Antarktis. Die Gradienten steuern die Lage der südhemisphärischen Jetstreams, welche ihrerseits Auswirkungen auf die Lage der südhemisphärischen Westwinde haben. So kommt es beispielsweise aufgrund einer erhöhten Einstrahlung in den Tropen im Südwinter während des mittleren Holozäns zu einer Intensivierung und Kontraktion des südlichen Jetstreambandes. Dies führt zu einer Nordwärtsverlagerung des südlichen außertropischen Westwindgürtels und äußert sich schließlich in Niederschlagsänderungen in Patagonien. Somit zeigen Prozesse über den Tropen indirekte Auswirkungen bis auf das lokale Klima in den hohen südlichen Breiten Südamerikas.

## **6. Klimaänderungen im Zeitraum 6.500 – 4.500 yr BP am Übergang vom Atlantikum zum Subboreal**

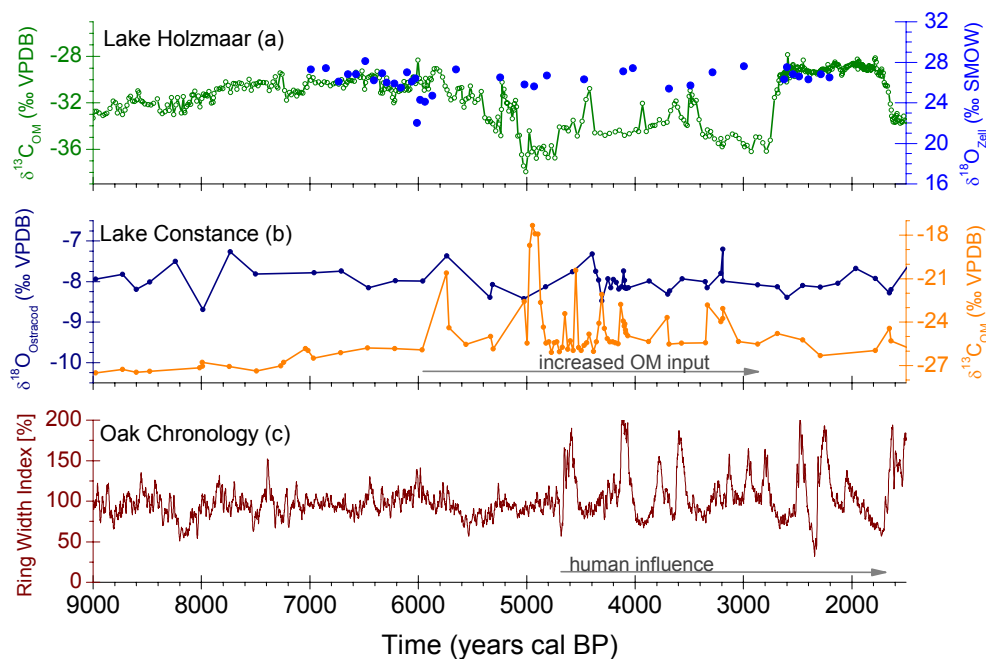
### ***Ziele/Hypothesen:***

Ergänzend zu bereits länger vorliegenden pollenanalytischen Daten belegen Veränderungen in der Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopensignatur von Eifelmaarsedimenten (P-II) eine Verschlechterung der Klimabedingungen an der Grenze Atlantikum/Subboreal. Das erste in Proxydaten dokumentierte Auftreten von Hochwasserereignissen am Bodensee (P-III) fällt ebenfalls in diesen Zeitraum. Zeitgleiche Veränderungen der Kohlenstoffisotopie des organischen Materials im Holzmaar (P-II) und eine Schwächung der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik (Oppo et al. 2003) weisen auf einen Zusammenhang zwischen der Dynamik der thermohalinen Zirkulation und den Niederschlägen in Mitteleuropa hin.

### ***Ergebnisse/Interpretation:***

Für den Zeitbereich von 6.000 – 4.500 YBP zeigt sich in der Kohlenstoffisotopie benthischer Foraminiferen, einem Proxy für die meridionale Ozeanzirkulation, eine deutliche Abschwächung der thermohalinen Zirkulation off-shore der britischen Inseln (Oppo et al., 2003). Innerhalb dieser Phase wurden die niedrigsten Werte im gesamten Holozän beobachtet. Im zeitgleichen Abfall der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte im Holzmaar, der mit einer Änderung von ca. 6 ‰ sehr ausgeprägt ist, zeigt sich ein deutlicher Rückgang der lakustrinen Primärproduktion auf dem Kontinent. Diese Interpretation wird bestätigt durch die entsprechenden  $\delta^{15}\text{N}$  Werte, ebenfalls ein Proxy für Primärproduktion, die nach 5.000 YPB durch eine deutlich eingeschränkte Varianz gekennzeichnet sind. Diese Isotopensignale im Holzmaar sind nicht durch Variationen der eintragsgesteuerten Nährstoffverfügbarkeit oder wechselnde Quellen des organischen Materials zu erklären, sondern müssen klimatisch interpretiert werden. Zusätzliche Unterstützung für klimatisch gesteuerte Veränderungen der lakustrinen

Primärproduktion im mittleren Holozän ergeben sich aus parallelen Untersuchungen am Meerfelder Maar, die ebenfalls einen deutlichen Rückgang der  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte zwischen 6.100 und 4.800 YBP aufweisen. Entgegen der ursprünglichen Hypothesen fanden sich keine Anzeichen für nachhaltige Veränderungen im hydrologischen Kreislauf im Eifelraum (Abb. 6.1). In den  $\delta^{18}\text{O}$  Werten der lakustrinen Zellulose aus dem Holzmaar, einem Proxy für hydrologisch gesteuerte Quellwertänderungen im Seewasser, zeigen sich keine signifikanten Änderungen im untersuchten Zeitbereich. Innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite sind die Werte und damit die hydrologischen Bedingungen im mittleren Holozän als konstant anzusehen. Eine ausgeprägte Isotopenschwankung in den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opal}}$  Werten des Holzmaares (-5 ‰), bleibt auf den Zeitraum 5.400 bis 5.100 YBP beschränkt. Da sich hierfür keine Übereinstimmung mit den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$  Werten ergibt, kann zunächst nicht von Veränderungen des  $\delta^{18}\text{O}$  Quellwertes des Seewassers ausgegangen werden. Insgesamt ergeben sich damit für den Eifelraum keine Hinweise auf Veränderungen der Hydrologie, z.B. Niederschlag, aber deutliche Evidenzen für eine Verschlechterung der thermischen Bedingungen.



**Abb. 6.1:** Zusammenstellung von Proxyparametern aus dem Holzmaar (a), dem Bodensee (b) und der süddeutschen Eichenchronologie (c) für das Holozän. (a) Kohlenstoffisotopenzusammensetzung des organischen, algenbürtigen Materials ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) als Indikator für Primärproduktion, Sauerstoffisotopenzusammensetzung lakustriner Zellulose ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Zell}}$ ) als Proxy für Quellwertvariationen im Seewasser. (b) Sauerstoffisotopenzusammensetzung benthischer Ostracoden ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ostracods}}$ ) als Indikator für die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags in den Alpen und im Voralpenraum, Kohlenstoffisotopenzusammensetzung des organischen Materials ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ ) als Indikator für Eintrag von terrigenem Material und Wasserpflanzen. (c) Ringbreitenindex der süddeutschen Eichenchronologie als Proxy für Wachstumsbedingungen in der Vegetationsperiode und menschlichen Einfluss (nach 4.800 YBP).

In der süddeutschen Eichenchronologie zeigt sich für den Zeitraum nach 5.900 YBP eine Abnahme der Ringbreiten, mit einem Minimum zwischen 5.600 bis 5.300 YBP, die nicht durch Veränderungen der Belegung zu erklären sind (Abb. 6.1). Da für die Au-Eichen im Allgemeinen von einer günstigen Wasserversorgung auszugehen ist, deutet sich in den geringeren Holzzuwächsen nach 5.900 YBP wahrscheinlich eine Verschlechterung der Wachstumsbedingungen an. Diese können durch eine Temperaturabnahme oder durch eine

kürzere Vegetationsperiode, niedrigere Wintertemperaturen, verursacht sein. Im Gegensatz dazu ergeben sich für den Voralpenraum bzw. Alpenraum aus den Bodenseeuntersuchungen Evidenzen für hydrologische Veränderungen. Wie bereits dargestellt (siehe auch AP3), kann für dieses Archiv von einer Zunahme der Hochwasserereignisse nach 6.000 YBP ausgegangen werden.

Zur Verifizierung der proxy-gestützten Hypothesen zum Klimawandel auf dem europäischen Kontinent im mittleren Holozän wurden vom Projekt MIDHOL transiente Simulationen mit dem gekoppelten globalen Klimamodell ECHO-G für den Zeitraum 7.000 bis 4.500 YBP durchgeführt. Das Modell wurde durch Veränderungen des orbitalen Antriebs (ORB) und zusätzlich durch Veränderungen der Solaraktivität und der Treibhausgaskonzentrationen (ORBSG) angetrieben (Abb. 6.2). Als Vergleichsexperiment diente eine 300 Jahre lange vorindustrielle Simulation (CONPRE), angetrieben mit konstanten äußeren Bedingungen.

Anhand der Simulationen wurde überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der thermohalinen Zirkulation, den klimatischen Veränderungen in Europa und der solaren Aktivität besteht. Jedoch ergaben sich aus den Simulationen auch auf multi-dekadischen Zeitskalen keine Hinweise auf eine solare Steuerung von Intensitätsveränderungen der thermohalinen Zirkulation im nördlichen Atlantik. Hinsichtlich der Frage nach der wechselseitigen Beziehung zwischen atmosphärischem Forcing, das einen wesentlichen Faktor für das europäische Klima darstellt, und der thermohalinen Zirkulation zeigt die Korrelationsanalyse der Modelldaten einen signifikanten Zusammenhang ( $r \approx -0,4$ ). Dabei tritt eine Phasenverschiebung von 5 Jahren auf, die jedoch aufgrund der geringeren zeitlichen Auflösung mit den Proxydaten nicht nachvollzogen werden kann. Zusätzlich wurde der Zusammenhang zwischen Ozeanzirkulation und europäischen Wintertemperaturen im Modell untersucht. Auch für diese Frage ergab sich ein signifikanter Zusammenhang, allerdings mit einem Verzögerungseffekt in der Größenordnung weniger Jahre. Insgesamt bestätigen die Modellsimulationen den postulierten Zusammenhang zwischen der thermohalinen Zirkulation bzw. zwischen der oberflächennahen Ozeankonvektion (Wagner et al., 2005) und den Lufttemperaturen in Europa.

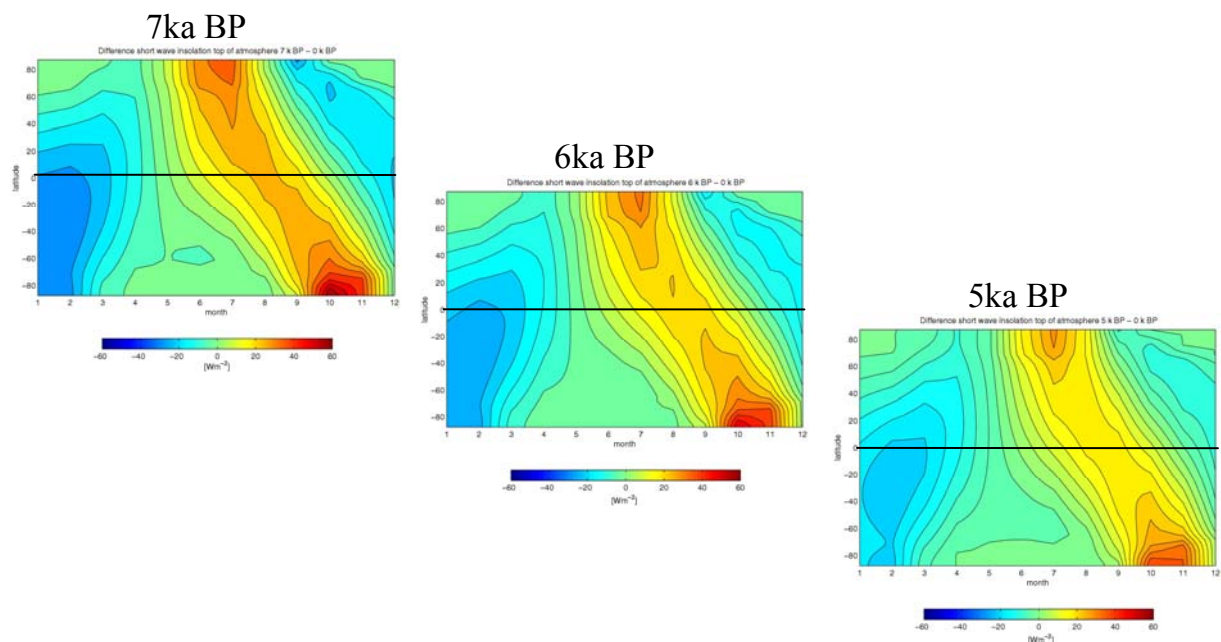
Die Hypothese von Temperaturveränderungen im mittleren Holozän auf dem europäischen Kontinent wurde mit einem Vergleich des orbital, solar und mit Treibhausgasen angetriebenen Modelllaufes (ORBSG) mit der vorindustriellen Kontrollsimulation (CONPRE) überprüft. Die Modellsimulationen erlauben eine jahreszeitlich aufgelöste Analyse von Änderungen bestimmter Klimaparameter im Laufe des mittleren Holozäns. Dadurch kann innerhalb des Modell-Proxy Vergleichs der Eigenschaft von Proxydaten Rechnung getragen werden, oftmals jahreszeitlich konditionierte Parameter darzustellen.

In Abb. 6.3 ist die Entwicklung der bodennahen Lufttemperaturen und der zonalen Windgeschwindigkeiten in 10m Höhe für die Modellregion Mitteleuropa (48-57°N; 0-26°E) dargestellt. Die 10m zonalen Windgeschwindigkeiten enthalten hierbei Informationen der Westwindstärke über Mitteleuropa. Die Stärke der westlichen Strömung moduliert während des Winters die Advektion milder maritimer Luftmassen und während des Sommers kühler Luftmassen.

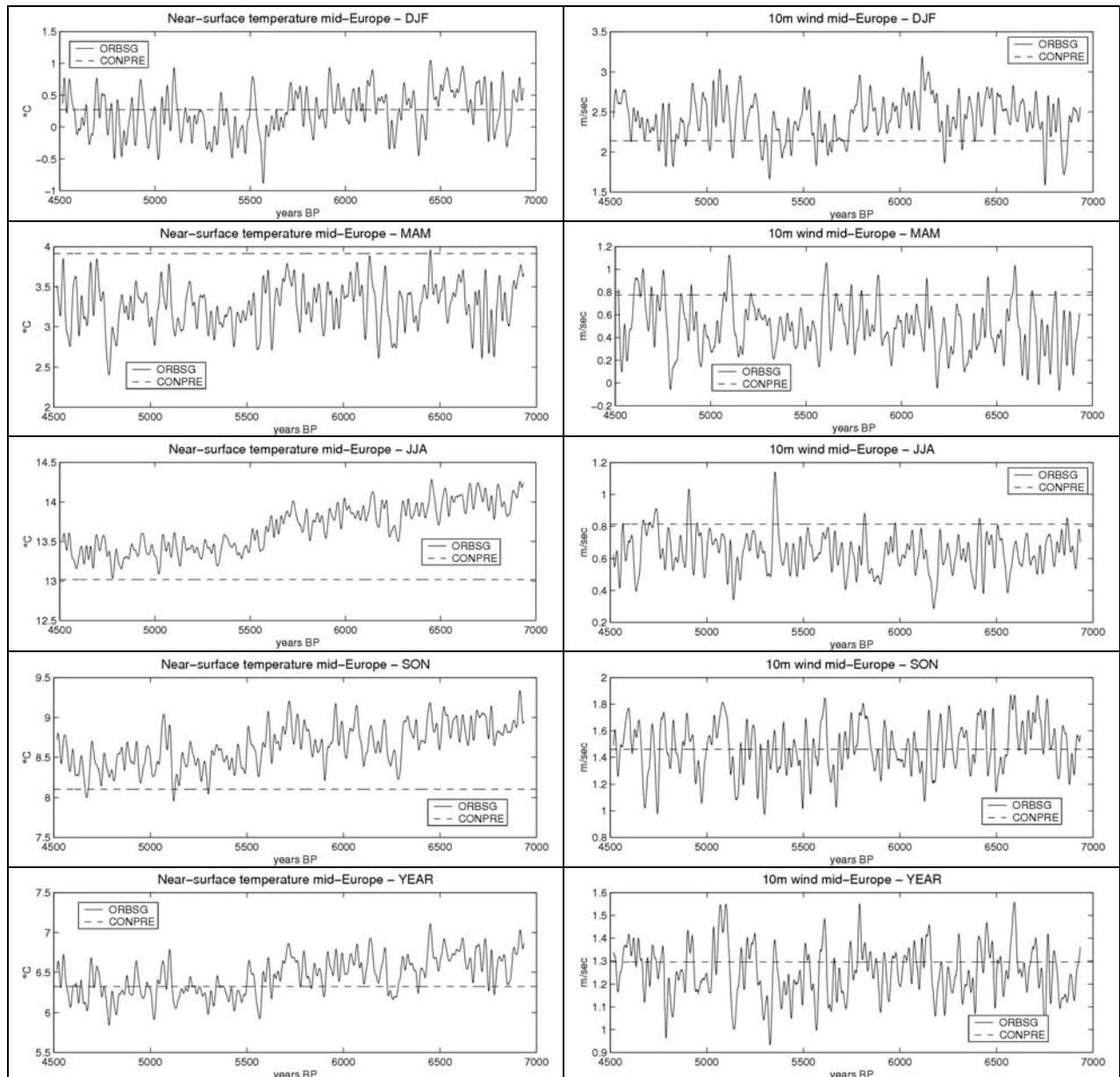
In der Zeitreihe der Wintertemperaturen (DJF) der ORBSG Simulation zeigt sich eine Abnahme der DJF-Temperaturen ( $\sim 0,5^\circ\text{C}$ ) im europäischen Raum für den Zeitraum 5.800 bis 5.500 YBP, wobei vor dieser Zeit positive Temperaturen im Vergleich zu CONPRE zu beobachten sind. Eine Temperaturabnahme in vergleichbarer Größenordnung von  $0,5^\circ\text{C}$  ergab sich auch aus Simulationsexperimenten mit einem Modell mittlerer Komplexität (CLIMBER) für die europäischen Wintertemperaturen (DJF) für den Zeitraum von 6.000 und 4.200 YBP (C. Kubatzki, mündliche Mitteilung). Eine im Mittel negativere Temperaturanomalie, wie sie durch die negative Einstrahlungsanomalie zu erwarten wäre, kann jedoch durch eine im Mittel erhöhten zonalen Wind kompensiert werden. Während des Frühlings (MAM) sind die

Temperaturen im Vergleich zu CONPRE reduziert und weisen keinen deutlichen Trend auf. Die mittleren negativen Temperaturanomalien im Vergleich zu CONPRE lassen sich durch die stark negativ orbital induzierte Einstrahlungsanomalie erklären (vgl. Abb. 6.2). Die Zonalwinde weisen ebenfalls auf eine abgeschwächte Advektion atlantischer Luftmassen hin. Dies führt zu einer weiteren Intensivierung der negativen Temperaturanomalie. Während des Sommers (JJA) zeigen die Temperaturen i) ein im Vergleich zur vorindustriellen Simulation stark erhöhtes Niveau und ii) einen starken negativen Temperaturtrend. Dieses Muster reflektiert die zeitlichen Änderungen innerhalb des orbitalen Antriebs während des Nordsommers auf der NH (vgl. Abb. 6,2). Die Zonalwinde weisen im Vergleich zu CONPRE ebenfalls reduzierte Werte auf, zeigen aber keine eindeutigen Trends auf. Die abgeschwächten zonalen Winde verstärken zusätzlich die rein strahlungsinduzierten positiven Temperaturanomalien durch die abgeschwächte Advektion kühler atlantischer Luftmassen. Während des Herbstes (SON) weisen die Temperaturen ebenfalls erhöhte Werte im Vergleich zu CONPRE auf. Ein negativer Trend ist auch hier zu erkennen. Die zonalen Windgeschwindigkeiten weisen im Mittel jedoch keine klar erkennbaren Unterschiede zu CONPRE auf. Die jährlich gemittelten Temperaturen sind im Vergleich zu CONPRE erhöht und zeigen einen negativen Trend auf. Die entsprechenden zonalen Winde sind geringfügig schwächer, weisen aber keine eindeutigen Trends auf. Daher kann postuliert werden, dass die Änderungen der jährlich gemittelten Temperaturen offensichtlich primär auf direkte transiente Änderungen des orbitalen Antriebs zurückzuführen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Änderungen der mitteleuropäischen Temperaturen während des mittleren Holozäns durch Änderungen im orbitalen Antrieb direkt (Einstrahlung) oder indirekt (Dynamisch durch zonale Winde) gesteuert werden. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen orbital induzierten Änderungen können während des Sommerhalbjahres zusätzlich auch (schwache) Korrelationen ( $r \sim 0,3$ ) zwischen den mitteleuropäischen Temperaturen und der Solaraktivität auf dekadischen Zeitskalen nachgewiesen werden.



**Abb. 6.2:** Änderungen der orbital induzierten Strahlungsanomalien als Differenzen zwischen verschiedenen Zeitscheiben des mittleren Holozäns und der vorindustriellen Zeit. Man beachte die negative Strahlungsanomalie über den NH während des Nordwinters und Frühlings sowie die positive Strahlungsanomalie über der NH während des Sommers und Herbstes. Im Laufe des mittleren Holozäns schwächen sich die Strahlungsunterschiede ab.



**Abb. 6.3:** ECHO-G Klimamodell: linke Spalte: Änderungen der bodennahen Lufttemperaturen über Mitteleuropa ( $0-26^{\circ}\text{E}$ ;  $47-57^{\circ}\text{N}$ ) während des mittleren Holozäns in der Simulation ORBSG; rechte Spalte: zonale Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über Mitteleuropa für jeweils DJF, MAM, JJA, SON, und das jährliche Mittel. Die Zeitserien wurden jeweils mit einem 30jährigen Hamming-Window geglättet. Die gestrichelte Linie zeigt jeweils den mittleren Zustand der CONPRE-Simulation.

Hinsichtlich der eingangs erwähnten Hypothese kann somit eine Übereinstimmung zwischen Proxydaten und Simulationsexperimenten im Hinblick auf die postulierte Temperaturabnahme im mittleren Holozän festgestellt werden. Die GCM-Simulation erlaubt darüber hinaus diesen Temperaturwandel im mittleren Holozän in einer Größenordnung von  $0.5^{\circ}\text{C}$  für die mittleren Wintertemperaturen zu quantifizieren.

## **7. Stabile Isotope, Biomarker und Ostracoden in Bodensee-Sedimenten der letzten 200 Jahre - Lässt das anthropogen beeinflusste Ökosystem Bodensee während der letzten 150 Jahre den Einfluss der NAO bzw. weiterer klimatischer Faktoren erkennen?**

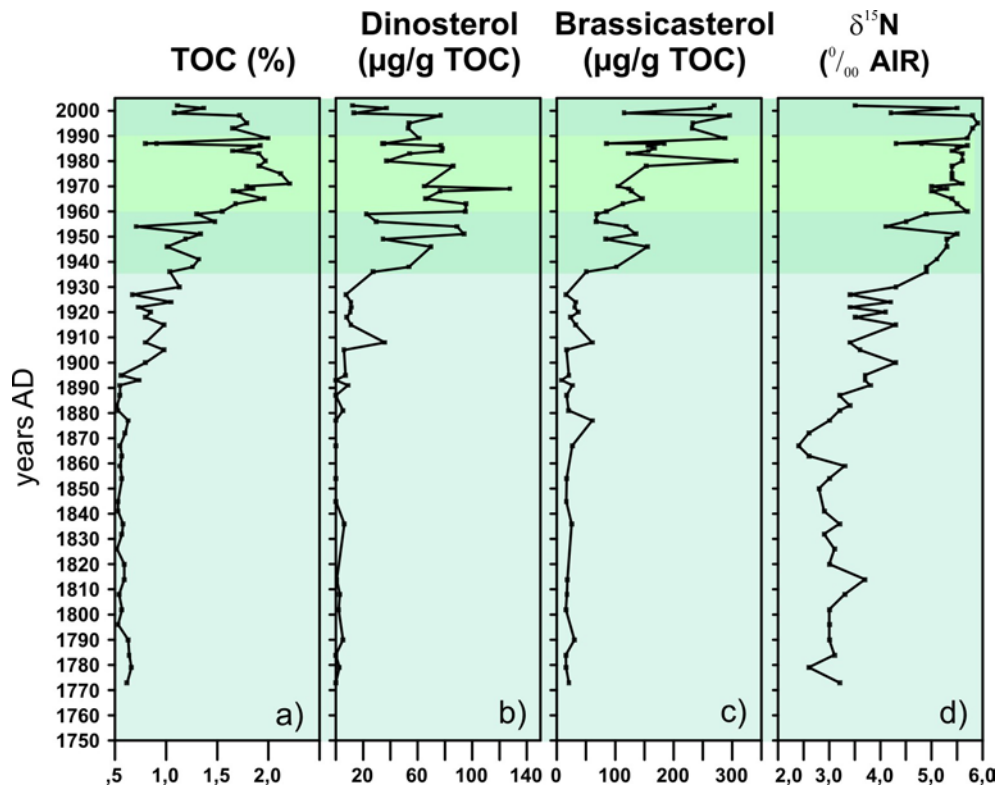
### ***Ziele/Hypothesen:***

Rezente Bodenseesedimente, die die bekannte Eutrophierungsgeschichte des Bodensees der letzten 200 Jahre repräsentieren, bieten die Möglichkeit, gezielt nach Fingerprints für lakustrine Bioproduktivität im Sediment zu forschen. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwieweit sich hydrologische Extremereignisse in den Bodenseesedimenten durch die Anwendung isotopengeochemischer Parameter und Biomarker charakterisieren lassen. Außerdem sollte untersucht werden, ob Schwankungen im  $\delta^{13}\text{C}$  der Ostracoden auf die Variabilität der Nordatlantischen Oszillation (NAO) zurückzuführen ist. Ziel der Kurzkernstudie war, die Interpretation der Proxies ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$ , organische Biomarker,  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^{13}\text{C}$  in Ostracoden) in spätglazialen und holozänen Bodensee-Sedimenten durch Kalibration anhand junger Sedimente zu verbessern und so besser klimatische von anthropogenen Einflüssen zu trennen zu können. Mittelfristiges Ziel ist dabei, diese Erkenntnisse auf weitere, vergleichbare Seesysteme mit älteren Sedimenten zu übertragen, um auch hier eine größere Interpretationssicherheit zu erlangen. Die in PROSIMUL II und III am gleichen Probenmaterial analysierten unabhängigen Proxies bieten die Möglichkeit für einen Multi-Proxy-Ansatz, der auch Erkenntnisse über die Aussagekraft und Grenzen einzelner Proxies liefert.

### ***Ergebnisse/Interpretation:***

Der Schwerpunkt der Analysen lag auf den Kernen Bo02/79 und Bo03/88, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Seenforschung in Langenargen (Dr. M. Wessels) gezogen und datiert wurden. Angaben zur Probenahmelokation, Datierung der Sedimente und eine detaillierter Beschreibung der Proxies befinden sich in den jeweiligen Einzelberichten von Prosimul II und III.

*Organische Biomarker, stabile Isotope und Ostracodenvergesellschaftungen als Indikatoren für die Eutrophierungsgeschichte des Bodensees* - Die Zunahme der Produktivität des Bodensees zu Beginn des letzten Jahrhunderts ist durch einen deutlichen Anstieg des organischen Kohlenstoffs, einem leichten Anstieg der autochthonen Biomarker Dinosterol und Brassicasterol, sowie einem Shift zu deutlich schwereren  $\delta^{15}\text{N}$  gekennzeichnet (Abb. 7.1). Die Veränderung des Trophiezustandes des Sees von oligotroph zu mesotroph ab ca. 1940 und zu eutroph ab 1960 drückt sich in einem sehr deutlichen Trend zu höheren Werten bei allen Parametern aus. Dinosterol als Indikator für Dinoflagellaten und Brassicasterol als Biomarker für Diatomeen zeigen eine deutliche Zunahme dieser Algen im Verlauf des letzten Jahrhunderts. Ebenso zeigt sich im Anstieg der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte, der als eine zunehmend geringere Diskriminierung gegen das schwere  $^{15}\text{N}$  Isotop im Zuge der Nutzung des DIN Pools zu interpretieren ist, eine starke Zunahme der lakustrinen Primärproduktion. Die Anzahl der Individuen von Ostracoden ging im Zuge der Eutrophierung zurück, *Leucomythere mirabilis* starb bereits ca. 1940 aus. Da das  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Ostracodes}}$  Signal der Klappen dieser Art zur Überprüfung der Auswirkung der NAO auf das Ökosystem genutzt werden sollte, war dieser Test nicht möglich.



**Abb. 7.1:** Proxies in Sedimentkern Bo02/79 (Friedrichshafener Bucht) in Abhängigkeit vom Trophiestatus des Bodensees: Organischer Kohlenstoff (a), autochthone Biomarker Dinosterol (Dinoflagellaten) und Brassicasterol (Diatomeen) (b+c) und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (d)

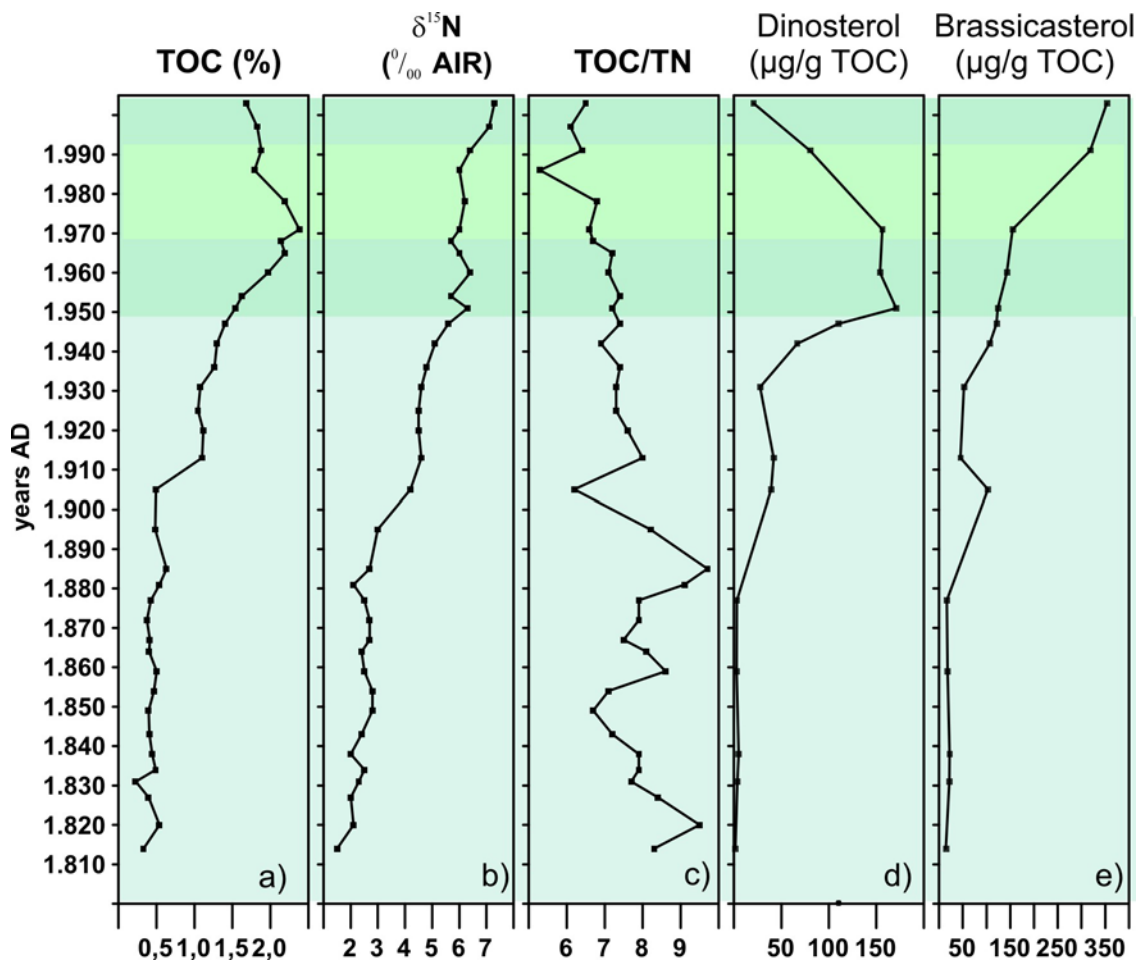
Die Entwicklung des Seesystems zurück zu einem mesotrophen Zustand seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts drückt sich in einem abnehmenden Anteil anorganischem Kohlenstoff im Sediment und einer Abnahme von Dinosterol in der organischen Substanz sowie der Zunahme der Individuen von Ostracoden aus. Brassicasterol als Biomarker für Diatomeen zeigt ebenfalls eine Zunahme. Dies ist möglicherweise auf einen Anstieg der Wassertemperaturen in der gesamten Wassersäule seit Mitte der 80er Jahre (Daten: IGKB) zurückzuführen. Durch die Erwärmung des Tiefenwassers kommt es zu einer verlängerten Mischungsphase des Bodensees mit einer verkürzten Stagnationsphase, was die Lebensbedingungen der Diatomeen begünstigt. Ein derartiger Prozess würde auch zu einer verbesserten Verfügbarkeit von gelöstem Stickstoff im Wasser und damit einhergehend zu einem Rückgang der  $\delta^{15}\text{N}$  Werte passen.

Der Vergleichskern Bo03/88 aus dem Mündungsbereich des Rheins (Abb. 7.2) zeigt im Vergleich zum Kern Bo02/79 aus der Friedrichshafener Bucht sehr ähnliche Kurvenverläufe im Langzeittrend aller Proxies, allerdings deuten die höheren Konzentrationen und Werte aller Parameter darauf hin, dass das Erhaltungspotential für die organische Substanz durch die größere Wassertiefe und damit geringeren Gehalten an im Wasser gelöstem  $\text{O}_2$  an diesem Standort größer ist. Im Gegensatz zu den Sedimenten aus der Friedrichshafener Bucht lassen sich in diesem Sedimentkern keine einzelnen Hochwasserlagen visuell erkennen, so dass sich die Interpretation der Proxies auf den Langzeittrend beschränken muss.

Der direkte Vergleich der Proxies aus den rezenten und subrezentem Sedimenten der Kurzkerne mit den spätglazialen und holozänen Sedimenten aus Kern Bo97/14 ermöglicht erstmals eine quantitative Einschätzung der Paläoproduktivität des Bodensees während des frühholozänen Temperaturmaximums. Während die Dinosterolkonzentrationen in der organischen Substanz in den frühholozänen Sedimenten aus Kern Bo97/14 nur  $35 \mu\text{g/g TOC}$  erreichen (Hanisch et al., subm.), liegen die Konzentrationen während des Eutrophierungsmaximums in den 70er Jahren meist über  $100 \mu\text{g/g TOC}$ . Dies zeigt, dass die



Dinoflagellatenpopulation im Bodensee nie so groß war wie zu den Zeiten stärkster anthropogener Verschmutzung.

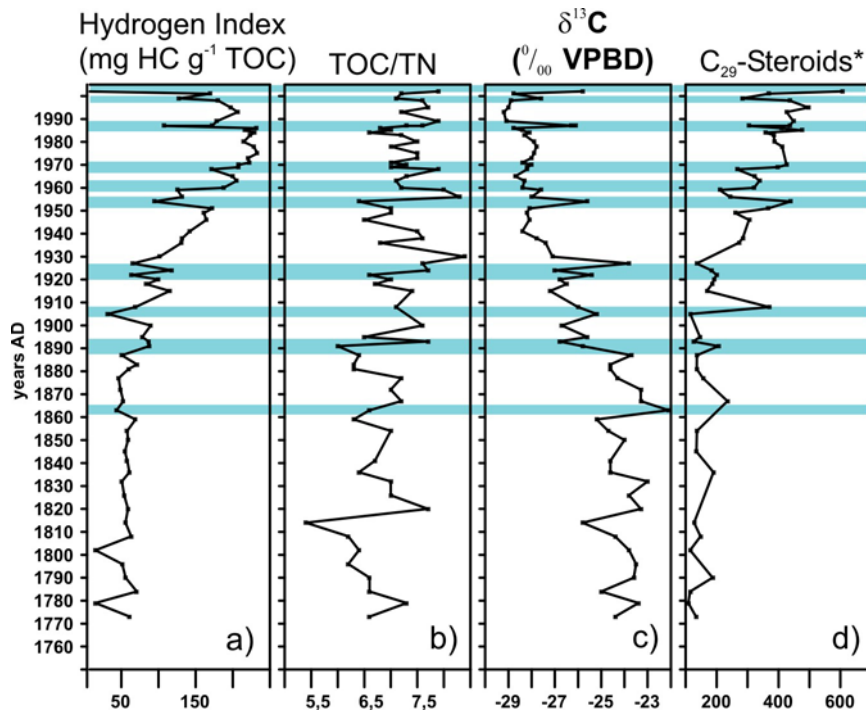


**Abb. 7.2:** Proxies im Vergleichskern Bo03/88 aus 205 m Wassertiefe im Mündungsbereich des Rheins: Organischer Kohlenstoff (a),  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (b),  $\delta^{15}\text{N}$  Werte (c), autochthone Biomarker Dinosterol (d) und Brassicasterol (e)

*Organische Biomarker, stabile Isotope und Wasserstoffindex als Indikatoren für terrigenen Eintrag* - Die Sedimente des Kerns Bo02/79 aus der Friedrichshafener Bucht weisen deutliche, datierbare Hochwasserlagen auf, so dass Veränderungen in der Zusammensetzung der organischen Substanz im Sediment durch hydrologische Extremereignisse genau untersucht werden konnte. Ziel war es, die Unterscheidung zwischen autochthoner und allochthoner organischer Substanz in Sedimentarchiven zu verbessern. Der Wasserstoffindex weist niedrigere Werte in den Hochwasserlagen auf, was auf einen erhöhten Anteil an terrigenem organischem Material hindeutet (Abb. 7.3). Die Hochwasserlagen zeigen zudem nach 1900 ein signifikantes Isotopenmuster mit jeweils deutlich erhöhten  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werten und erniedrigten  $\delta^{15}\text{N}$  Werten. In diesem Muster zeigt sich eindeutig eine zusätzliche Quelle von organischem Material in diesen Lagen. Aufgrund der Isotopensignatur kommen hierfür lediglich Böden oder Wasserpflanzen, also eindeutig allochthone Quellen in Frage.

$\text{C}_{29}$ -Steroiden wie  $\beta$ -Sitosterol, Stigmasterol und Stigmastanol werden vorwiegend von Landpflanzen gebildet. Die Summe der Konzentrationen der miteinander verwandten Steroide zeigen erhöhte Konzentrationen in den Flutlagen und belegen daher ihr Potential, als Marker für terrigenen Eintrag in Sedimentarchiven zu dienen.





**Abb. 7.3:** Proxies im Kern Bo02/79 (Friedrichshafener Bucht) für hydrologische Extremereignisse und terrigenen Eintrag: Wasserstoff-Index (a), TOC/CN (b),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{OM}}$  Werte (c), Steroide als terrigene Biomarker (\*  $\beta$ -sitosterol + stigmasterol + stigmasterol). Hochwasserlagen im Sediment sind durch farbige Balken gekennzeichnet.

Die Fingerprints im Sediment, die die Hochwasserereignisse während des letzten Jahrhunderts in der organischen Substanz hinterlassen haben, lassen sich auf ältere Bodensee-Sedimente übertragen und unterstützen die in Punkt 3 aufgestellte Hypothese (PROSIMUL I, II und III), dass es zwischen 6.500 und 2.500 YBP zu einer Zunahme von terrigenem Eintrag in den Bodensee kam (siehe auch AP3 und Hanisch et al.). Die in den rezenten Kernen untersuchten Proxies dienen als Instrument, den Anteil an allochthoner und autochthoner organischer Substanz im Sediment zu quantifizieren und könnten damit als Schlüsselparameter in vielen Sedimentarchiven eingesetzt werden.

#### Literatur:

- Barber, D.C., Dyke, A., Hillaire-Marcel, C., Jennings, A.E., Andrews, J.T., Kerwin, M.W., Bilodeau, G., McNeely, R., Southon, J., Morehead, M.D., Gagnon, J.-M., 1999. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature* 400, 344-348.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Gonani, G., 1997. A pervasive Millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science* 278, 1257-1266.
- Friedrich, M., S. Remmele, B. Kromer, I. Boeren, K.F. Kaiser, and M. Küppers, (2003). A combined Late Glacial pine tree-ring chronology of Central Europe for radiocarbon calibration, in 18th International Radiocarbon Conference, pp. 216, Wellington New Zealand.
- Hanisch, S., Wessels, M., Niessen, F., Püttmann, W., Schwalb, A.. Differentiation between allochthonous and autochthonous sedimentation in Lake Constance using biomarkers- a

- mirror of Late Glacial and Holocene environmental change (submitted to *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*).
- Hughen, K.A., M.G.L. Baillie, E. Bard, W.J. Beck, C.E. Buck, K. Cutler, P.E. Damon, R. Fairbanks, M. Friedrich, T.P. Guilderson, C. Herring, B. Kromer, F.G. McCormac, C.B. Ramsey, P.J. Reimer, R.W. Reimer, S. Remmele, J.R. Southon, M. Stuiver, H. van der Plicht, C.E. Weyhenmeyer, G.S. Burr, R.L. Edwards, F. Taylor, and P. Blackwell, (2003). Extension and revision of the radiocarbon calibration dataset: Part 2 INTCAL04 beyond tree-rings 26.0-12.4 ka cal BP, in 8th International Radiocarbon Conference, pp. 119, Wellington, New Zealand.
- Johnsen, S.J., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Steffensen, J.P., Clausen, H.B., Miller, H., Masson-Delmotte, V., Sveinbjörnsdóttir, A.E., White, J., 2001. Oxygen isotope and palaeotemperatures records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and North GRIP. *Journal of Quaternary Science*, 16, 299-307.
- Kromer, B., M. Friedrich, K.A. Hughen, K.F. Kaiser, S. Remmele, and S. Talamo, (2003). Late Glacial Early Younger Dryas 14C ages derived from floating Central European tree-ring chronologies, in 8th International Radiocarbon Conference, pp. 86, Wellington New Zealand.
- Lücke, A., and A. Brauer, Biogeochemical and micro-facial fingerprints of ecosystem response to rapid Late Glacial climatic changes in varved sediments of Lake Meerfelder Maar (Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (in revision).
- Lücke, A., Schleser, G.H., Zolitschka, B. and J.F.W. Negendank, (2003). A continuous Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany. *Quaternary Science Reviews*, 22, 569-580.
- North Greenland Ice Core Project members, 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 147-151
- Oppo, D.W., McManus, J.F. and J.L. Cullen (2003). Deepwater variability in the Holocene epoch. *Nature*, 422, 277-278.
- Reimer, P.J., M.G.L. Baillie, E. Bard, W.J. Beck, C.E. Buck, P.E. Damon, R. Fairbanks, M. Friedrich, T.P. Guilderson, A. Hogg, K.A. Hughen, B. Kromer, and P. Blackwell, (2003). Extension and revision of the radiocarbon dataset: Part 1 INTCAL04 12.4 - 0 ka cal BP, in 8th International Radiocarbon Conference, pp. 120, Wellington, New Zealand.
- Reimer, P.J., K.A. Hughen, T.P. Guilderson, G. McCormac, M.G.L. Baillie, E. Bard, P. Barrat, W.J. Beck, C.E. Buck, P.E. Damon, M. Friedrich, B. Kromer, C.B. Ramsey, R. Reimer, S. Remmele, J.R. Southon, M. Stuiver, and H. van der Plicht, (2002). Preliminary report of the first workshop of the INTCAL04 radiocarbon calibration/comparison working group, *Radiocarbon*, 44 (3), 653-661.
- Schwalb, A., (2003). Lacustrine ostracodes as stable isotope recorders of late-glacial and holocene environmental dynamics and climate. *Journal of Paleolimnology*, 29, 3: 265-351.
- Spurk, M., H.H. Leuschner, M.G.L. Baillie, K.R. Briffa, and M. Friedrich, (2002). Depositional frequency of German subfossil oaks: climatically and non-climatically induced fluctuations in the Holocene, *Holocene*, 12 (6), 707-715.
- Straile, D., Jöhnk, K., and H. Roszknecht (2003). Complex effects of winter warming on the physiochemical characteristics of a deep lake. *Limnology & Oceanography*, 48, 1432-1438.
- Vos, H., Brüchmann, C., Lücke, A., Negendank, J.F.W., Schleser, G.H. and B. Zolitschka, B. (2003). Phase stability of the solar Schwabe cycle in Lake Holzmaar, Germany, and GISP2 (Greenland) between 10,000 and 9,000 cal. BP. In: Fischer, H., Kumke, T., Lohmann, G., Flöser, G., Miller, H., von Storch, H., Negendank, J.F.W. - The KIHZ project: Towards a synthesis of Holocene proxy data and climate models. Springer Verlag, Berlin.

**Berichtsteil III:**  
**Erfolgskontrollbericht**

## 1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen von DEKLIM

Das Projekt PROSIMUL II und das Netzwerkprojekt PROSIMUL hat zu den förderpolitischen DEKLIM Schwerpunkten A, C, D und E beigetragen sowie insbesondere einen Beitrag zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses geleistet. Fragen zur natürlichen Klimavariabilitäten während verschiedener erdgeschichtlicher Abschnitte, die Reaktion von Ökosystemen auf Klimaveränderungen, die Entwicklung von Transferfunktionen für Isotopenproxies, sowie die Verbesserung und Anwendung globaler Zirkulationsmodelle wurden im Rahmen des Vorhabens bearbeitet. Damit wurden insbesondere Beiträge zu europäischen und internationalen Forschungsanstrengungen auf den folgenden Gebieten der Klimaforschung geliefert:

- Differenzierung zwischen dem Einfluss von Steuerfaktoren (extern und intern) und internen Rückkopplungsmechanismen auf das Klimasystem basierend auf dem Verständnis der Aufzeichnungssysteme.
- Entwicklung von Transferfunktionen zur Gewinnung von Daten über Temperatur und Hydrologie ausgehend von der Frage nach der Art der Übersetzung von atmosphärischer Klimainformation in das Sedimentarchiv von Seen.
- Extraktion von Klimadaten für das Spätquartär unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens des Klimasystems (z.B. Schwellenwertreaktionen) um lange quantitative Reihen für die Modellierung zur Verfügung zu stellen.
- Detektion der klimatischen Entwicklung des Spätglazials unter besonderer Berücksichtigung rascher bzw. gradueller Übergänge zwischen unterschiedlichen Stadien und den jeweils charakteristischen natürlichen Variabilitäten.
- Vergleich der Klimavariabilität ermittelt aus Proxydaten und Simulationsläufen und Reduktion der mit der Untersuchung der Klimavariabilität verbundenen Unsicherheiten.

## 2. Ergebnisse

Das Projekt PROSIMUL II und das Netzwerkprojekt PROSIMUL konnte zu wesentlichen Fragestellungen der Klimaentwicklung im Spätquartär Beiträge leisten. So konnte gezeigt werden, dass die Variabilität des Klimas in Holozän auch auf dem europäischen Kontinent höher war als bisher angenommen. Hierzu tragen neben zeitlich befristeten Ereignissen auch zyklische Entwicklungen auf Zeitskalen von Jahrhunderten und Jahrtausenden bei. Regionale Unterschiede in der Ausprägung des Klimas bzw. einzelner Klimaelemente spielen für das Verständnis der Klimaentwicklung im Holozän in Europa eine bedeutende Rolle. Hydrologische und thermische Veränderungen zeigen in verschiedenen regionalen Räumen unterschiedliches Verhalten. Die Klimaentwicklung wird geprägt durch die Interaktion verschiedener Subsysteme, die eng miteinander gekoppelt sind. Die Verzahnung verschiedener atmosphärischer Zirkulationssysteme (NAO, ENSO, PDO) mit der Zirkulation in den Ozeanen ist noch weitergehend und enger als angenommen. Der solare Einfluss auf die natürliche Klimaentwicklung lässt sich in den unterschiedlichen Archiven eindeutig nachweisen. Neben der Bedeutung quantitativer Ansätze für die Klimarekonstruktion wurde auch die Rolle qualitativer Klimaelemente, z.B. die Ausprägung der Saisonalität, für das Gesamtverständnis der Klimaentwicklung unterstrichen. Für eine nähere Darstellung sei auf den Abschlußbericht, Kapitel II.1 verwiesen.

### **3. Fortschreibung Verwertungsplan**

Im Rahmen von PROSIMUL II und dem Netzwerkprojekt PROSIMUL wurden keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen. Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende sind gegeben. Die erhobenen Daten werden in nationale und internationale Datenbanken eingespeist und stehen der Allgemeinheit zur Verfügung. Diese Daten werden innerhalb der nächsten ein bis zwei Jahre für weitere Publikationen und fortführende Arbeiten in nationalen und internationalen Rahmen genutzt werden. Die Erfahrungen aus den Projekten finden laufend Eingang in die Konzeption und Beantragung von Folgeprojekten im Rahmen nationaler (SPP Interdynamik) und internationaler (ICDP Pasado) Forschungsinitiativen.

### **4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

- entfällt –

### **5. Präsentationsmöglichkeiten**

- keine -

### **6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung**

Die tatsächlichen Ausgaben von PROSIMUL II lagen ca. 60.000 € unter der bewilligten Summe. Die Zeitplanung wurde eingehalten, und die Veröffentlichung der Ergebnisse wird fortgesetzt.