

# CONTINENT – Der Baikalsee: ein außergewöhnliches kontinentales Klimaarchiv

Hedi Oberhänsli, Birgit Heim, François Demory, Jens Klump, Hermann Kaufmann, Norbert Nowaczyk, Ronald Conze und CONTINENT-Partner

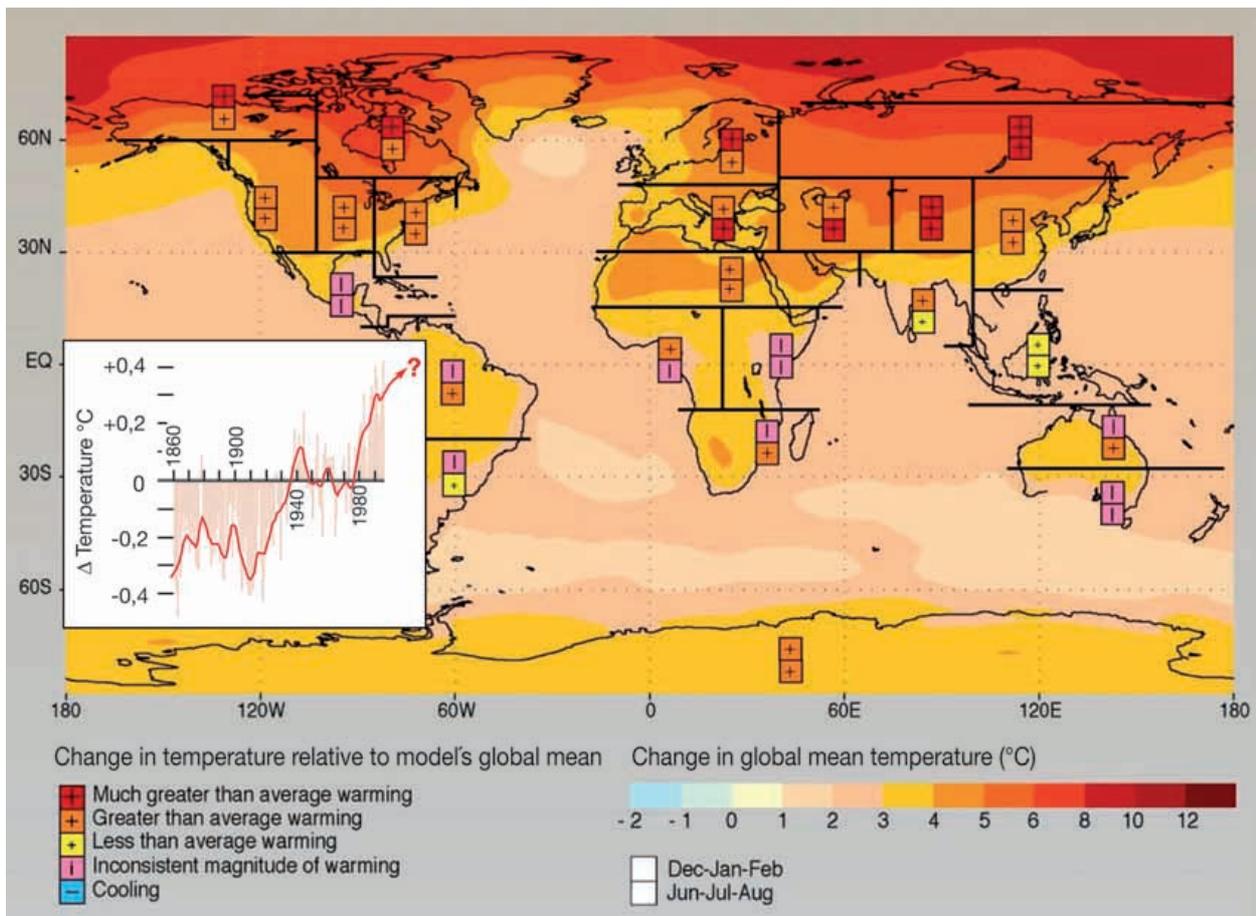
*Lake Baikal represents one of the few Eurasian, continental, lacustrine sites with an extremely long, uninterrupted sedimentary record (spanning potentially 25 million years) that can be exploited for high-resolution palaeoclimate studies. Baikal is also close to the boundaries of two important weather systems - the Siberian high-pressure zone and the Asian monsoon zone. Over recent decades, scientists have become increasingly aware that weather systems in one region of the world can have significant effects on climate elsewhere, many thousands of miles away. By definition, remote influences such as these are termed teleconnections. Moreover, it is also increasingly apparent that the earth's climate can change very abruptly in contrast to current predictions that, for example, global warming will occur gradually over the next 50 to 100 years. It is therefore important that we are fully able to understand the extent and rate of change of past climate variability. Lake Baikal represents a site remote from oceanic influences, for long time ignored in high-resolution climate studies. By reconstructing climate variability in continental Eurasia, we can contribute to the knowledge base of, for example, the importance of changes in oceanic circulation to climate in regions remote from oceans during known periods of instability.*

*In CONTINENT (High Resolution CONTINENTal Paleoclimate Record in Lake Baikal) we used both biological and non-biological proxies to reconstruct climate variability in Eurasia during the interglacials known as the Holocene (10 kiloannum (ka = 1000 years) before present BP) and the Eemian (c. 110 to 130 ka BP), and the preceding Terminations I and II phases. Of interest were also abrupt climatic changes, in particular their timing and extent. However, in order to do this with confidence we also investigated contemporary processes in the lake that are likely to affect each of the different climate proxies. Challenges identified include understanding: (i) biological processes in the photic zones, e.g. life cycle strategies of organisms dependent on ice-cover in the lake; (ii) processes influencing wind-blown and riverine input to the lake; (iii) transport of biological and non-biological particles through the water column, e.g. rates of transport, seasonality; and (iv) processes that affect final incorporation of sediment particles into the sedimentary record, e.g. grazing, dissolution of diatom tests, bacterial consumption of organic material, typical processes occurring at the water/sediment interface. In order to address these challenges, climate has been reconstructed at high resolution: on decadal to centennial scales. Using these results we have learned more about the influence of climate forcing factors and their feedbacks. CONTINENT provided an improved knowledge on the central Asian climate history, which helps toward a better understanding of European and Northern Hemisphere climate systems.*

Meteorologische Messreihen belegen, dass auch Zentralurasien in den letzten 100 Jahren eine deutliche Erwärmung erfahren hat, die sich wahrscheinlich in die Zukunft fortsetzen wird (Todd und Mackay, 2004). Diese Aussagen beruhen auf Eisdickenentwicklung am Baikalsee und dem Beginn des Eisaufbaus und Abschmelzens. Temperaturmessungen zeigen weiter, dass seit den 1980er Jahren ansteigende kontinentale Wintertemperaturen über Eurasien und Nordamerika zu einem großen Teil für die beobachtete generelle Erwärmung über der Nordhemisphäre verantwortlich sind, während der Nordatlantik leicht kühlere Werte zeigt. In Sibirien hat das zu extremen räumlich und zeitlich gestreuten Temperatur- und Feuchtigkeitsanomalien geführt.

Weite Permafrostbereiche finden sich bereits klimatisch im Ungleichgewicht. Bleibt es bei diesem Klimatrend, würde das bedeuten, dass sich die Grenze des permanenten Dauerfrostes, die sich derzeit noch am Nordende des Baikalsees befindet, langsam aber stetig weiter nach Norden zurückzieht. Dies wird eine Vielzahl von ökologischen Veränderungen nach sich ziehen. Noch ungeklärt ist,

inwieweit die Auftauprozesse in Permafrostböden, unter anderem durch einsetzende Kompostierung der organischen Substanzen, Treibhausgase in noch nicht einschätzbarem Ausmaß zur Klimaveränderung freisetzen werden. Dass sie ihre Bedeutung haben, deckt sich mit Modellen, denn deren Ergebnisse gehen von starken Zunahmen von Treibhausgas und partikulären Aerosolen aus. Aus klimatischen Modellierungen wird prognostiziert, dass in den nächsten Dekaden in Zentralasien die Wintertemperaturen um 2 bis 8 °C (globale Durchschnittstemperaturen 1,5 bis 4,5 °C) ansteigen und die Niederschläge um 300 bis 600 mm/Jahr zunehmen könnten (IPCC, 2001; z. B. Abb. 1). Die für die nächsten 50 bis 150 Jahre vorliegenden Prognosen sind allerdings mit großer Unsicherheit behaftet, weil Rückkopplungsprozesse nicht ausreichend bekannt sind. Ebenfalls sind in Zukunft mehr Extremereignisse zu erwarten. In Zentralsibirien würde das bedeuten, dass mehr Frühjahrs- und Sommerstürme auftreten, die zu extremen Sommergewittern führen und verstärkt massive Staubmassen aus den zentralasiatischen Wüsten nach Osten bis nach Nordamerika transportieren.



**Abb. 1:** Globale Temperaturänderungen, die in den letzten 150 Jahren gemessen wurden (unten links). Der rote Pfeil könnte die Richtung in die Zukunft weisen, wenn wir mit einer deutlichen Erwärmung rechnen. Das große Bild zeigt die Temperaturverteilung, basierend auf einer maximalen vorhergesagten Erwärmung, wie sie in 100 bis 200 Jahren zu erwarten wäre. Danach wäre im Baikalseegebiet mit einer durchschnittlichen Temperaturzunahme von 5 bis 8 °C zu rechnen (ICPP, 2001).

Global temperature changes as recorded during the last 150 years are shown in the inset to the lower left. The red arrow points toward increasing values indicating considerable warming during the coming decades though the extent of the increase is not yet clear. From the least conservative assumption (Scenario A2) global temperature changes have been proposed. The succession of colour changes makes obvious that major temperature increases are expected to occur in mid and high latitudes of the N Hemisphere. In the Baikal area, annual average temperature might rise according to this scenario as much as 5 to 8 °C during the following 200 years (ICPP, 2001).

Unsere kurzen meteorologischen Datenreihen von 100 bis 120 Jahren reichen allerdings nicht aus, um Ereignisse mit extremen Amplituden zu beleuchten, deren Prozesse auch zu verstehen und regionale Zusammenhänge aufzudecken. Daher müssen wir klimatische Studien aus den letzten Interglazialen (Warmzeiten) nutzen. Aus ihnen lernen wir, wie wir Extremereignisse einzustufen und deren Auswirkung und Nachhaltigkeit auf das gesamte Klimasystem einzuschätzen haben. Extreme Klimaereignisse können im Kontext der Folgewirkungen verstanden werden, wenn aus verschiedenen Räumen paläoklimatische Daten zusammengebracht werden. Zur ausgewogenen Modellvalidierung sollten ebenfalls Daten aus unterschiedlichsten Regionen zur Verfügung stehen. Gerade Untersuchungen der letzten Jahre weisen darauf hin, dass die klimatische Variabilität im Raum beträchtlich ist. Daten der letzten 30 Jahre zeigen für Sibirien, dass für die dort aufgetretenen extremen räumlichen und zeitlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsanomalien die Prozesse bisher nicht hergeleitet werden können (IPCC, WMO/UNEP, 2001).

Gute Gründe, den zentral in Eurasien gelegenen Baikalsee als Untersuchungsobjekt auszuwählen, sind die Interaktionen zwischen verschiedenen atmosphärischen Systemen, die im Baikalseegebiet studiert werden können (Abb. 2). Im Winter liegt das Zentrum der Sibirischen Hochdruckzelle über dem westlichem Baikalseegebiet und der nordwestlichen Mongolei. Als Folge der Druckverteilung dringt nur wenig Feuchtigkeit aus dem Nordatlantik und Nordpazifik nach Zentral- und Ost-Sibirien vor, so dass die Winter in der Regel kalt und trocken sind; dies wird kontrolliert durch die Stärke der Hochdruckzelle und deren meridiane Position. Im Sommer dagegen wird die Feuchtigkeitsverteilung in der Baikalseeregion über die thermisch kontrollierte Tiefdruckzelle, mit Zentrum südwestlich des Tibetischen Plateaus, und über die Polarfront gesteuert. Deren Positionen und Dynamik kontrollieren den arktischen Vortex und die Spur der Westwinde, die feuchte Luft aus dem Nordatlantik bzw. dem Arktischen Meer nach Zentralsibirien bringen und so im Sommer zu Regen und zu starker Wolkenbedeckung über dem See führen. Zudem

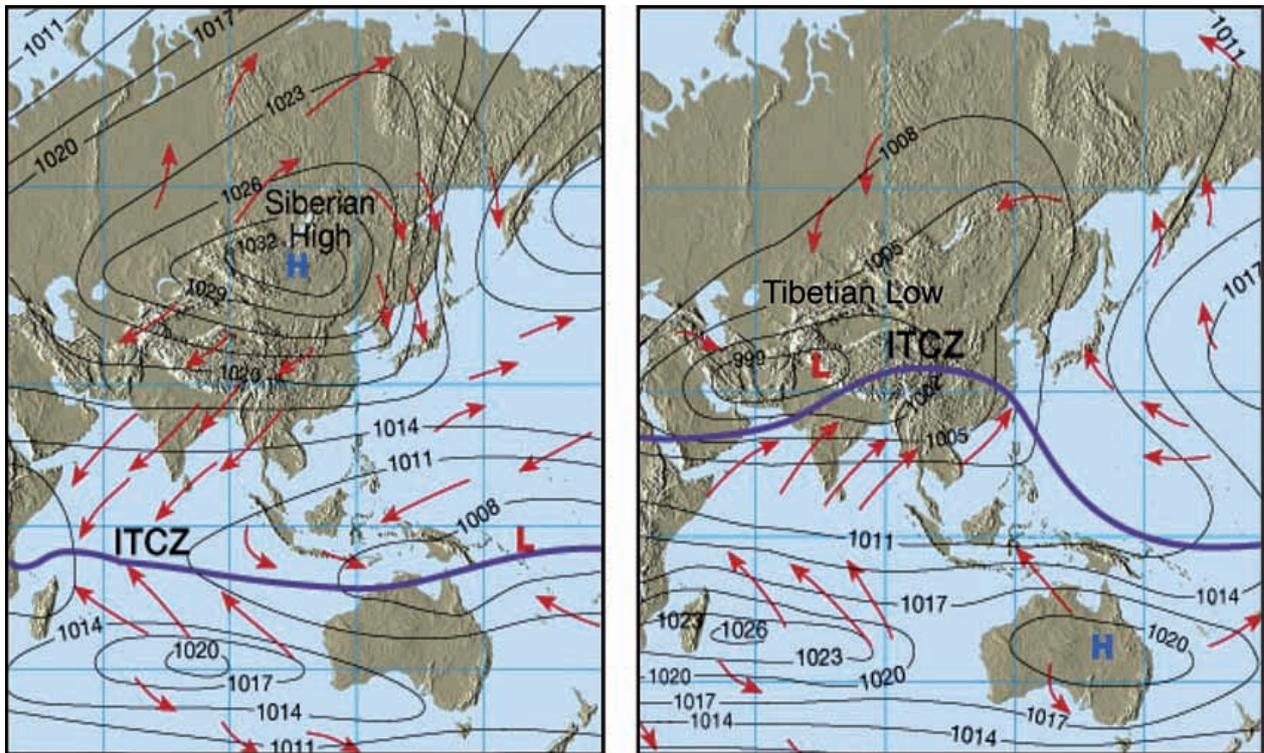
wird das südliche Einzugsgebiet der Selenga, des größten Zuflusses des Baikalsees, im Sommer auch mit monsonalen Niederschlägen aus dem Nordwest-Pazifik beliefert.

Entsprechend war diese exponierte klimatische Positionierung des Baikalsees auch die Motivation, eine der ersten Bohrungen im Rahmen des vom GFZ Potsdam koordinierten „International Continental Scientific Drilling Program“ (ICDP) im Baikalsee abzuteufen (Abb.3). Zudem dokumentieren die Sedimente des ältesten Sees der Erde eine lückenlose Klimageschichte für die letzten 25 bis 35 Millionen Jahre. Die Bohrung erwies sich als sehr erfolgreich und eröffnete die Möglichkeit, in einem 200 m langen Sedimentkern die Klimageschichte der letzten 5 Millionen Jahre einschließlich der Nordhemisphärenvergletscherung, die sich vor ca. 2,7 Mio. Jahren etablierte, zu studieren (z. B., Williams et al, 1998; Kashiwaya, 2003; Demske et al., 2002). Das CONTINENT-Projekt (*High Resolution CONTINENTal Paleoclimate Record in Lake Baikal*) kann als Weiterführung dieser ersten lakustrinen ICDP-Bohrung gesehen werden, denn CONTINENT als Folgeprojekt wird viele komplexe Prozesse, die beim ersten Anlauf noch nicht verstanden werden konnten, nun weiter klären (Z. B., Oberhänsli and Mackay, 2005).

Im EU-geförderten Projekt CONTINENT standen zwei Fragen im Zentrum:

**(i) Wie funktioniert das Ökosystem Baikalsee heute, und welche Prozesse sind Schlüssel zum Verständnis des Klimas der Vergangenheit?**

- Welche Prozesse sind für die Biologie in der photischen Zone relevant? Ist z. B. die Überlebensstrategie der Organismen von der Dauer und der Dicke der Eisbedeckung abhängig?
- Wie funktioniert der Nährstoffkreislauf?
- Welche Prozesse beeinflussen den allochthonen Eintrag (Aerosole oder Flussfracht) in den Baikalsee und welche die räumliche Verteilung der detritischen Partikel?
- Was passiert während des Transports von biologischen and abiotischen Partikeln durch die Wassersäule, die im zentralen Becken bis 1650 m mächtig ist? Wie viel Material wird biologisch abgebaut, wo finden laterale Transporte statt?
- Welche Prozesse können die Einbettung der Partikel an der Wasser-Sediment-Grenzfläche beeinflussen: Bioturbation und zoologisches Abweiden, bakterieller Abbau, chemische Lösung und Umwandlung an der Sediment-/Wassergrenzfläche?



**Abb. 2:** Druckverteilung während des Winters und Sommers über Eurasien. Hauptmerkmale sind das Sibirische Hochdruckgebiet und das Tibetische Tiefdruckgebiet. Sie kontrollieren die Feuchtigkeit über Eurasien, die aus dem Nordatlantik, der Arktis (sommers und winters) und dem NW-Pazifik (hauptsächlich im Sommer) herangeführt werden.

*Pressure distributions over Eurasia during winter and summer. The major features are the Siberian High-Pressure Cell and the Tibetan Low-Pressure Cell, which control on atmospheric moisture distribution over Eurasia originating from the North Atlantic, and the Arctic Oceans (summer and less pronounced during winter) as well as from the NW Pacific (mostly during summer).*



**Abb. 3:** Für das ICDP-Bohrprogramm wurde mit dem Forschungsschiff „ULAN UDE“ (oben) die Bohrplattform zur Bohrungsstelle gebracht und mit dem Bohren begonnen, als der gesamte Bohrkomplex eingefroren war. Die Bohrung wurde beendet, als das Eis im frühen Sommer aufbrach. Für das CONTINENT-Programm (<http://continent.gfz-potsdam.de>) haben wir das Forschungsschiff „VERESHAGIN“ (unten) für das Aussetzen der Sedimentfallen, die biologische, physikalische und chemische Geländearbeit sowie für die seismischen Aufnahmen und zum Einholen von Sedimentkernen vom Limnologischen Institut in Irkutsk angemietet (Fotos: H. Oberhänsli, GFZ). For the ICDP deep drill hole the research vessel (RV) „ULAN UDE“ (above) was dragging a barge with drilling tower and equipment to the site. When the lake was frozen and ship position had stabilized drilling could be started and continued until the ice cover was breaking up. For the CONTINENT field studies (<http://continent.gfz-potsdam.de>), like deployment of sediment traps, biological, physical and chemical monitoring, seismic survey of surface sediment layers, and sediment coring we rented RV „VERESHAGIN“ (below) from the Limnological Institute, RAS, Irkutsk during the summer cruises from 2001 to 2003.

### (ii) Welche Klimavariationen charakterisieren die letzten beiden Interglaziale (Warmzeiten) in Zentralsibirien?

- Holozän (0 bis 10 ka BP) und Eem (entspricht der Kasantzevo-Warmzeit) (117 bis 127 ka BP)
- mit den zugehörigen Übergängen aus den vorangehenden Glazialen (Terminationen I und II)

Die Klimavariationen sollten in hoher zeitlicher Auflösung, von Jahrzehnten bis zu einem Jahrhundert, rekon-

struiert werden. Darüber hinaus sollten die gefundenen Paläoklimavariationen mit Daten aus Westeuropa und Asien verglichen werden, um im räumlichen Vergleich Amplituden von kurzen Klimaereignissen und die Ausrichtung der Änderungen zu evaluieren.

Wir erwarteten, dass sowohl die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen, wie auch die wechselnden Niederschläge aus den Sedimentparametern herauszulesen sind. Wichtig war es uns, für beide Interglaziale Daten in Zeit und Raum zu bekommen. Deshalb wurden drei Bohrlokationen geplant und damit auch dem Monitoring der morphologischen und klimatischen Diversität des Sees Rechnung getragen (vgl. Abb. 4, 5).

### Wie funktioniert das Ökosystem Baikalsee?

Der Baikalsee ist mit einer Tiefe von bis zu 1650 m der tiefste Süßwassersee der Welt. Der südsibirische See, ca. 650 km lang und maximal 80 km breit, erstreckt sich über eine Oberfläche von 31.500 Quadratkilometern und hat eine durchschnittliche Wassertemperatur von 4 °C. Aufgrund seiner Tiefe ist er zugleich auch der größte Süßwasserkörper der Welt: er enthält ein Fünftel des Süßwassers aller Seen der Erde.

Der Baikalsee besteht aus drei morphologisch durch Unterwasserrücken abgetrennten Becken von unterschiedlicher Tiefe (maximal: 1650 m, minimal: 910 m). Im August kann die Oberflächentemperatur 8 bis 10 °C erreichen, in Ufernähe oder kleinen Buchten sogar 14 bis 18 °C.

Der See ist dimiktisch. Das bedeutet, dass der See zeitweise geschichtet ist (mit Epilimnion und Hypolimnion). Der Wasserkörper wird also einmal im Jahr bis zu einer Tiefe von 250 m windbedingt umgewälzt und friert mindestens für die Hälfte des Jahres zu. Die Sommerschichtung dauert nur kurz (Ende Juli-Anfang September), doch dabei wird das Epilimnion (Deckschicht) bis zu 50 m mächtig. In Jahren mit langen Wintern und kühlen Sommern kann im Nordbecken die Schichtung auch ausbleiben (Kozhova and Izmet'seva, 1998). Der See ist ab Ende Dezember für die Hälfte des Jahres mit Eis bedeckt. Eisfrei wird das Südbecken ab Mitte Mai, das Nordbecken erst ab Mitte Juni (Kozhov 1963). Diese extrem jahreszeitlich geprägte limnologische Situation hat Auswirkungen auf die Primärproduktion und damit auf die gesamte Nahrungskette.

Hier liegt der Schlüssel zur Frage: „Welche biologischen Seesedimentparameter liefern welche Klimainformationen, und was bewirkt und beeinflusst diese klimatische Signalbildung?“, die wir zuerst zu lösen hatten, bevor wir die Rekonstruktion der Klimavariationen in der Vergangenheit angehen konnten. Wir hatten ein ausgedehntes Monitoringprogramm vor Ort mit Expeditionen geplant, die im März (Insolation nimmt zu: wichtiger Zeitpunkt in der saisonalen Produktivität) und im Juli/August (Beginn des Sommerproduktionsmaximums) stattfanden. Nicht nur die autochthonen (d. h. Vor-Ort-) Prozesse bilden Kli-

masignale im Sediment ab. Der Baikalsee ist über Flussfrachten und äolischen Transport das Auffangbecken für wechselnde allochthone (d. h. außerhalb des Systems generierte) Einträge, die ebenfalls Klimasignale (Klimaproxies) mit sich bringen.

### Monitoring für biologische, chemische und mine-rogene Parameter

#### Geländedaten

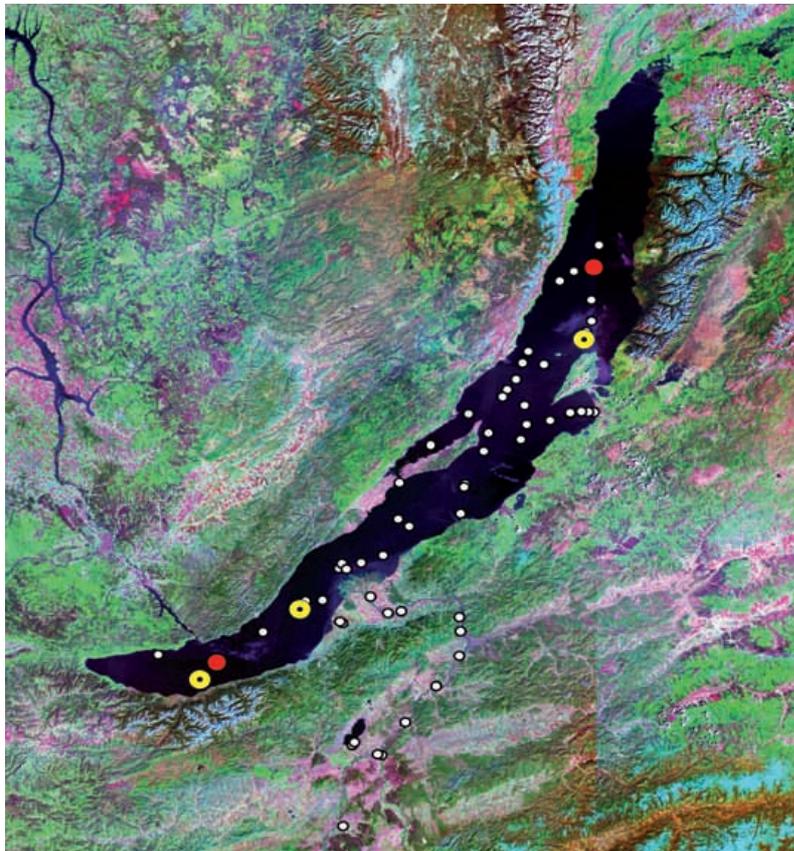
Während der Sommerexpeditionen von 2001 – 2003 wurden biologische, geochemische, sedimentologische und physikalische Geländeuntersuchungen im Baikalsee durchgeführt (Abb. 4). Dazu wurden Stationen mit wechselnder Primärproduktion und terrigenem Eintrag ausgewählt. Die erfolgreiche Bohrung und Einholung der drei CONTINENT-Sedimentkerne gelang im Sommer 2001 vom Forschungsschiff VERESHAGIN aus (Abb. 5).

Die bio-optische Geländedatenaufnahme bestand in spektro-radiometrischen Messungen (GER Geländespektrometer) des photischen Bereiches mit gleichzeitiger Wasserprobennahme aus den entsprechenden Tiefen. Die Hauptparameter der limnologischen Geländedatenaufnahme wurden aus der Analyse der lipophilen Phytoplanktonpigmente (Chlorophylle und Carotinoide mittels High-Pressure-Liquid-Chromatography (HPLC)), sowie der Kieselalgenvergesellschaftung (Diatomeen) gewonnen. Nährstoffe und Schwebstoffgehalt und eine Vielzahl weiterer Parameter wurden ebenfalls analysiert. Temperatur- und Dichte-Stationsprofile (CTD-Sonde) bis in

100 m Wassertiefe gaben Aufschluss über die Schichtungsverhältnisse der Wassersäule. Zusätzlich wurde mit multispektralen fluorometrischen Messungen (Moldaenke FluoroProbe) die Tiefenverteilung der verschiedenen taxonomischen Phytoplanktergruppen erfasst. Nach Kalibrierung der FluoroProbe auf die Phytoplanktonvergesellschaftung im Baikalsee (Diatomeen, Cryptomonaden, Blaualgen, etwas weniger gesichert Grünalgen) bestätigten die Daten aus den hochauflösenden Fluoreszenzprofilen die Konzentrationen der Phytoplankter aus dem regionalen und saisonalen Monitoring, die auf Zählungen der Phytoplanktergruppen und HPLC-Pigmentanalysen basierten. Neben Offenwasserstationen wurden gezielt Transekte, ausgehend von der Barguzin-Mündung und vom Selenga-Delta, in das Pelagial erstellt. Da auf den Forschungsfahrten horizontale Fluoreszenztransekte kontinuierlich gefahren wurden, erhöhte sich die Beobachtungsdichte signifikant. Der CONTINENT-Geländedatensatz stellte auch die Grundlage für die Evaluierung der Satellitendatenprodukte dar.

#### Optische SeaWiFS-Satellitendaten

Der spektral wirksame Wasserinhaltsstoff der obersten Gewässerschicht im Pelagial ist das Chlorophyll-a (Chl-*a*), ein guter Indikator für die Primärproduktion. Von radiometrisch hochaufgelösten Ocean-Colour-Satelliten werden in täglichen Aufnahmezyklen diese spektralen Signale der Weltmeere global erfasst und dem Nutzer als Chl-*a*-Standardprodukte zur Verfügung gestellt. Dieser nutzt die globalen Chl-*a*-Daten in den marinen, logistisch schwer zu erfassenden Gebieten zum Phytoplanktonmonitoring.



Dieses Potential der optischen Gewässerfernerkundung, bezüglich flächenhafter hydrodynamischer und quantitativer Prozesse fehlende Informationen zu liefern, konnte jedoch bisher für den limnischen Bereich wenig ausgeschöpft werden. Daher haben wir in dieser ersten bio-optischen Satellitendatenanalyse des Baikalsees Satellitendatenprodukte entwickelt

**Abb. 4:** Landsat TM-MOSAIK RGB742 (UTM 48), Quelle: Baikal Online-GIS: <http://dc108.gfz-potsdam.de/website/>. Karte der Geländestationen: „Ground truthing“ 2001 – 2003 (weiße Punkte), Sedimentfallen (rote Punkte), Bohrstellen der Sedimentkerne (gelbe Punkte): Continent Ridge (Norden), Posolsky, Vydrino Shoulder (Süden). Landsat TM-MOSAIK RGB742 (UTM48), source: Baikal Online-GIS: <http://dc108.gfz-potsdam.de/website/>. Sampling map: „Ground truthing“ 2001 – 2003 (white dots), sediment traps (red dots), sediment coring sites (yellow dots): Continent Ridge (north), Posolsky Bank, Vydrino Shoulder (south).



**Abb. 5:** Aktivitäten im Gelände 2001 bis 2003: Side-scan-sonar SONIC 3 der Kollegen aus St. Petersburg (oben links), Geländespektrometer GER (unten links), Bekernung mit modifiziertem Kullenberglot (Prof. Meischner, Universität Göttingen) (oben rechts). 70 m Sedimentkerne gestapelt im Container (Mitte rechts). Susanne Fietz und Xavier Boes bei der Kernbeschreibung und Beprobung am GFZ Potsdam (unten rechts). In der Bildmitte das russische Forschungsschiff „Vereshagin“ (Fotos: J. Klump, GFZ).

Activities during field trips summer 2001 to 2003: Side-scan-sonar SONIC 3 of the colleagues from St. Petersburg (upper left), GER spectrometers (lower left), modified Kullenberg corer (Prof. Meischner, University Göttingen; upper right). To the middle at the right side 70 m cored sediment packed in the container. To the right below Susanne Fietz and Xavier Boes are describing and sampling cores at GFZ Potsdam. In the central part the Russian research vessel „Vereshagin“.

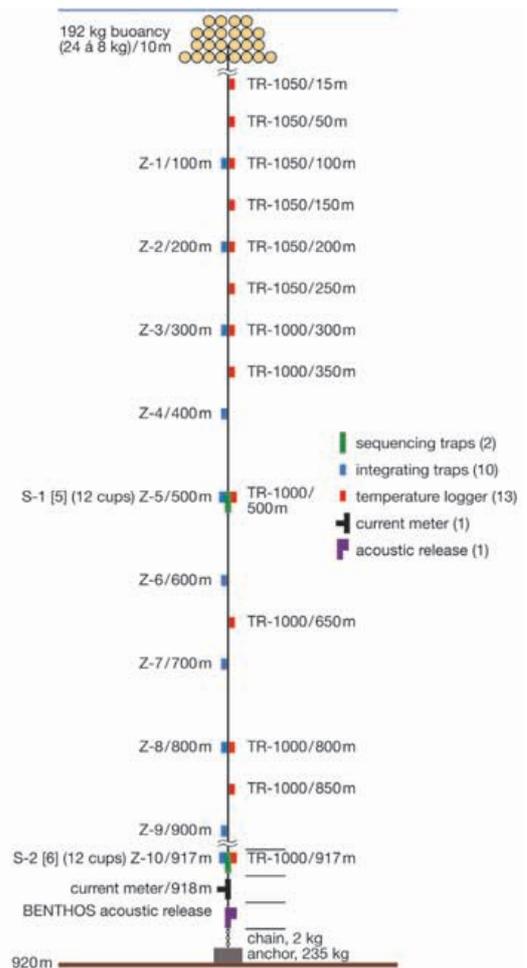
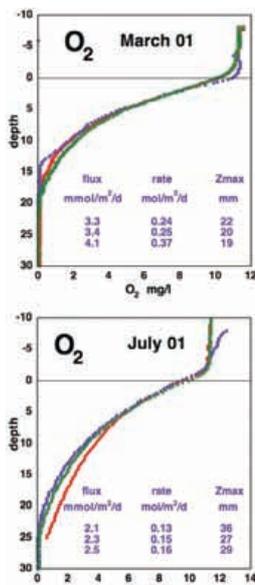
und evaluiert, und in unsere wissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt. Unsere Grundlagen waren High Resolution Picture Transmission (HRPT)-Satellitendaten des NASA-SeaWiFS-Instrumentes mit insgesamt 8 spektralen Aufnahmebereichen (Bänder) im Blauen, Grünen, Roten und Nahinfraroten und 1,3 km<sup>2</sup> räumlicher Auflösung pro Pixel. Ab Juni 2001 erhielten wir regelmäßig über 18 Monate Rohdaten der HRPT-Empfangsstation in Ulan Baator (Mongolei). Die digitalen Rohdaten wurden von uns radiometrisch zu empfangenen Strahldichten am Sensor konvertiert. Dann musste das Hauptsignal der Atmosphäre herauskorrigiert und die spektralen wassererlassenden Reflektanzen (entspricht der apparenten Gewässerfarbe) herausgerechnet werden (Heim et al., 2003). Nun musste noch untersucht werden, inwieweit für den sehr klaren Baikalsee die spektralen Variationen der Gewässerfarbe über empirische und globale Algorithmen zu Chl-a-Konzentrationen konvertiert werden können (Heim et al., 2005; Heim 2005). Des weiteren sollte aus den atmosphärenkorrigierten Satellitendaten die räumliche Ausdehnung der Flusseinträge lokalisiert und deren saisonale Dynamik beobachtet werden. Trotz der halbjährigen Eisbedeckung und häufiger Wolkenbedeckung, vor allem im späten Frühjahr und Sommer, konnten aus den Satellitendaten kurze Zeitserien im Sommerhalbjahr gewonnen werden.

### Sedimentfallen im südlichen und nördlichen Baikalsee

Zur Erfassung der saisonalen Dynamik im Wasserkörper wurden zwei komplexe Verankerungen mit Sedimentfallen von März 2001 bis Juli 2003 ausgesetzt. Das in verschiedenen Wassertiefen aufgefangene partikuläre Material wird zur Quantifizierung der vertikalen Stoffflüsse für die verschiedenen Jahreszeiten genutzt. Daraus kann auf biologische Produktionsraten in der photischen Zone, aber auch auf biologische Abbauprozesse in tieferen Schichten des Wasserkörpers geschlossen werden.

Eine Gerätekettenkette wurde im Nordbecken und die andere im Süd-Zentralbecken verankert (Abb. 6). Sie bestanden aus 9 bzw. 15 integrierenden Fallen, 2 sequenziellen Fallen, 13 bzw. 17 Temperaturloggern, 1 Strömungsmesser und einem akustischen Auslösersystem. Aussetzen und Einholen geschah im Winter vom Eis (Südbecken) oder von dem Forschungsschiff VERESHAGIN. Die Datenaufnahme in den verschiedenen Wasserstockwerken erfolgte je nach Gerätebestückung im 60- oder 10-Minutentakt (Abb. 7). Die Beprobungsdauer in den sequenziellen Fallen wurde auf die biologische Dynamik abgestimmt und lag zwischen 10 Tagen und 2 Monaten. Die Verankerungen wurden jährlich eingeholt, dabei die Daten ausgele-

**Abb. 6:** Ausstattung der Sedimentfalle aus dem Nordbecken (EAWAG Zürich; Mike Sturm). Im Nordbecken wurden die Temperaturen alle 10 Minuten mit dem Brancker TR-1000 Logger bei 16, 174, 227, 389, 550, 740, 795, und 868 m Wassertiefe registriert. Strömungsgeschwindigkeit und Richtung wurden in Bodennähe alle 30 Minuten mit einem Aanderaa-Strömungsmesser aufgezeichnet. Im Südbecken (Falle nicht gezeigt) wurde die Temperatur alle 60 Minuten mit VEMCO-Minilogs bei 16, 41, 75, 100, und 195 m Wassertiefe und alle 10 Minuten mit Brancker TR-1000-Temperaturloggern bei 303, 350, 397, 455, 540, 825, 1015, 1210, 1305, 1352, und 1396 m Wassertiefe aufgezeichnet. In Bodennähe (1398 m) wurden ebenfalls alle 30 Minuten Strömungsgeschwindigkeit und Richtung aufgezeichnet. Beide Verankerungen wurden während der CONTINENT-Sommerexpedition im Juli 2003 geborgen. Zusammen mit der PEEPER-Sonde, die Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlendioxidflüsse an der Sediment/Wasser-Grenzschicht aufzeichnet, sind Sauerstoff-Flussdaten für Frühjahr und Sommer 2001 aufgezeichnet (Maerki et al., 2005; Foto: M. Sturm, EAWAG Zürich).



Sediment trap deployed in the North Basin (EAWAG, Zurich; Mike Sturm). Temperature was recorded every 10 minutes using Brancker TR-1000 Loggers at 16, 174, 227, 389, 550, 740, 795, and 868 m water depth. Current speed and direction were recorded every 30 minutes with an Aanderaa current meter. In the South Basin (trap not shown), temperatures were recorded with VEMCO Minilogs at 16, 41, 75, 100, and 195 m at 60 minutes intervals and with Brancker TR-1000 temperature loggers at 303, 350, 397, 455, 540, 825, 1015, 1210, 1305, 1352, and 1396 m again at 10 minute intervals. Near-bottom (1398 m), current speed and direction were recorded every 30 minutes. The PEEPER instrument registering O, N and CO<sub>2</sub> fluxes at the sediment water interface is shown together with O<sub>2</sub> data sequences for spring and summer 2001 (right) (Maerki et al., 2005).

sen, die Fallen beprobt und dann der gesamte Komplex erneut mit Probengefäßen bestückt und wiederum ausgesetzt. Des weitern wurden mittels einer PEEPER-Sonde die Stoffflüsse (Ammonium, Nitrat, Phosphate, Sauerstoff) zwischen der Sediment-Wasser-Grenzschicht und den obersten 5 cm Sediment gemessen, um die Nährstoffflüsse aus den Fallen zu komplettieren (Abb. 6, Maerki et al, 2004).

### Biotische und abiotische Dynamik im Baikalsee

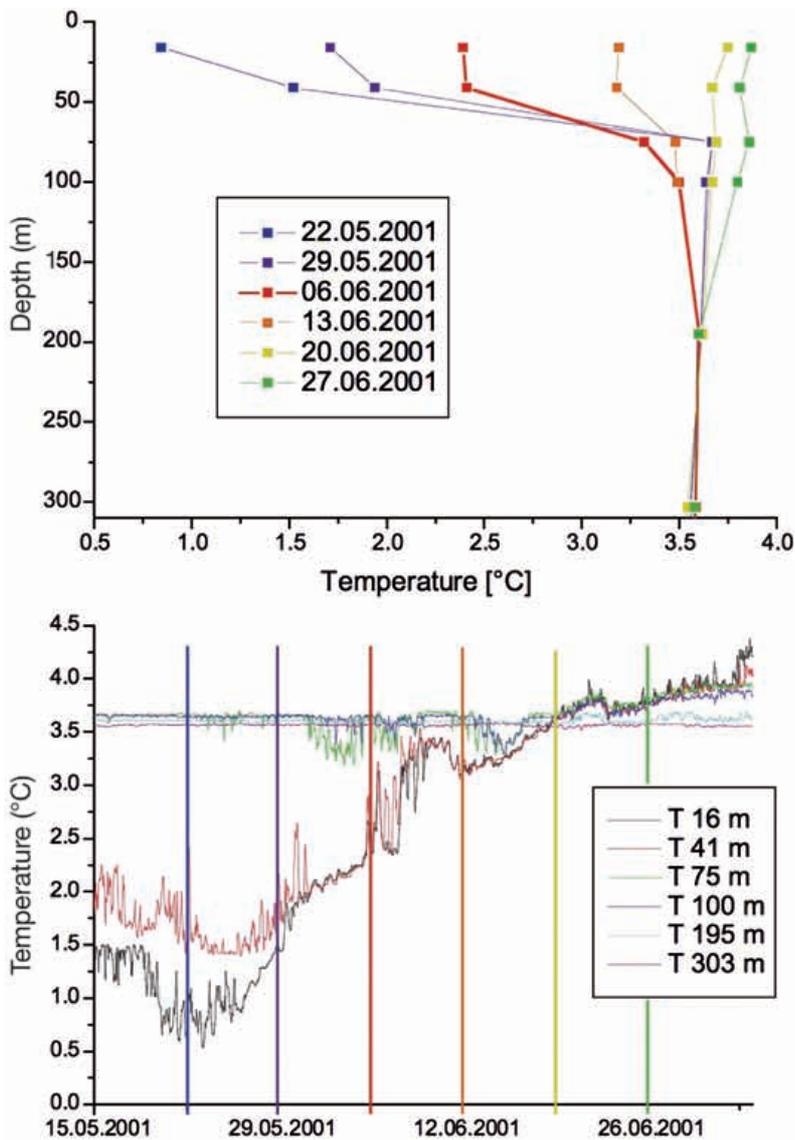
#### Phytoplanktonverteilung im Baikalsee

Für das CONTINENT-Projekt waren die saisonal sich ändernden Diatomeen- und Pigmentverteilungsmuster, die im Projektverlauf mit ökologisch gut definierten Bedingungen verknüpft werden konnten, von besonderem Interesse. Die schalenbildenden Diatomeen (Bacillariophyceae) sind die häufigsten Phytoplankter im pelagialen Baikalsee. Sie teilen den photischen Bereich mit weiteren Mikrophytoplanktern (Eustigmatophyceae, Chrysophyceae, Cryptophyceae) und autotrophen Picoplanktern (Auto-

trophic Picoplankton APP: Eukaryonten und Cyanobakterien). Letztere Gruppen tragen keine Schalen und können demzufolge nicht wie Diatomeen im Sediment direkt nachgewiesen werden. Sie sind dagegen gut über Pigmente im Sediment nachzuweisen. Da jede Phytoplanktergruppe photosynthetische Schlüsselpigmente (Markerpigmente = MP) besitzt, können die Beiträge der einzelnen Phytoplanktergruppen auf Grund dieser aus den Geländedaten festgelegten Anteile zum totalen Chl-*a*-Gehalt über lineare Regressionen errechnet werden:

$$\text{Chl-}a = a(\text{MP}_{\text{Bacillariophyceae}} + \text{Chrysophyceae}) + b(\text{MP}_{\text{Chlorophyta}}) + c(\text{MP}_{\text{Eustigmatophyceae}}) + d(\text{MP}_{\text{Cyanobakterielle APP}});$$

Dabei wurden die Schlüsselpigmentkombinationen über einen iterativen Ansatz bestimmt. Als Kriterien liegen die Bedeutung der milieuspezifischen Faktoren (a, b, c und d), die Koeffizienten des Bestimmtheitsgrades (r<sup>2</sup>) und der totale Anteil an Chl-*a* in der beprobten Region zu Grunde. Dieses Konzept wurde mit mikroskopischen und quantitativen Bestimmungen des Phytoplanktons unterstützt.



**Abb. 7:** Das Temperaturprofil über die obersten 300 m Wassersäule im Frühjahr/Frühsummer zeigt deutlich die Advektions- und Turbulenzereignisse in Abhängigkeit des Anstiegs der Sonneneinstrahlung und damit sich erwärmender Oberflächenwassertemperaturen. (Wüest et al., 2005).

Temperature profiles across the topmost 300 m of the surface water layer during the spring/early summer. Advection and turbulences are evidenced as a result of increasing insolation, thus increasing surface water temperature in late spring/early summer (Wüest et al., 2005).

Wie die Faktoren zeigen, sind einerseits Prozesse, die zu stark wechselnden Lichtverhältnissen in der photischen Zone führen, aber auch turbulente Umwälzungen, die Nährstoffe zur Wiederverwendung wieder nach oben bringen, ausschlaggebend für die Prosperität der geologisch wichtigsten Phytoplanktergruppe der Diatomeen (z. B. Abb. 9). Lichtverhältnisse im Winter und zum Teil auch im Sommer werden über Niederschläge kontrolliert (d. h. Ausmaß der Schneebedeckung, Ausmaß der Wolkenbedeckung, die die Intensität der auftreffenden Globalstrahlung beeinflusst, u. ä.). Durch ausgedehntes Monitoring während der letzten 10 Jahre ist weitgehend bekannt, welche Verhältnisse im Winter und im Sommer Arten begünstigen bzw. zurückdrängen (Jewson und Granin, 2004, Mackay et al. 2006).

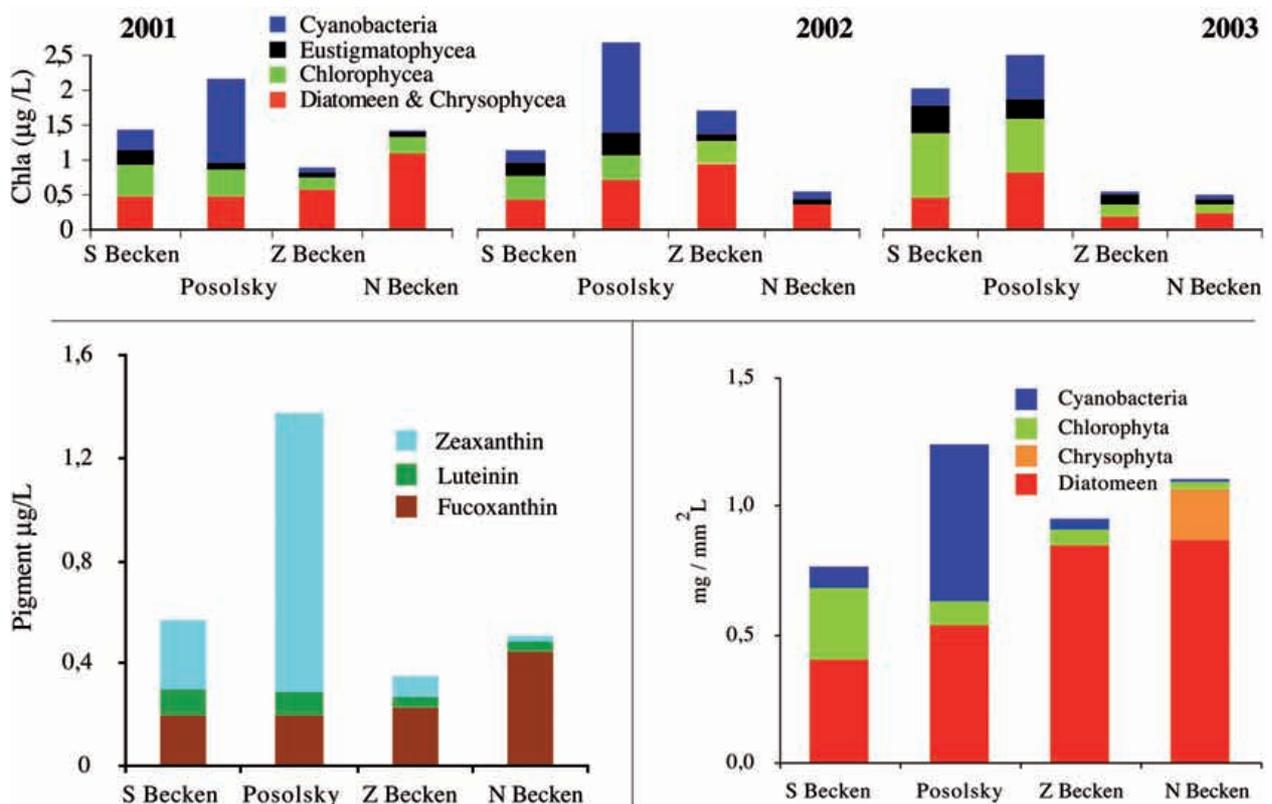
Zur Absicherung der Interpretation der Pigmentdaten wurde die Pigmentzusammensetzung der Gruppen auch in Zuchtversuchen untersucht und mit Werten aus der Literatur verglichen (Fietz, 2005). Über Chlorophyll sowie die drei Marker-Pigmente (MP) Fucoxanthin, Lutein und Zeaxanthin konnte daher sehr gut auf die heterogene Phytoplankter-Verteilung im Baikalsee geschlossen werden (Abb. 8).

Die Verteilung der verschiedenen Diatomeen-Arten, die im Baikalsee einen eindeutigen Nord-Süd-Gradienten zeigt, wird über viele Faktoren - wenn auch in unterschiedlichem Grad - gesteuert und spiegelt so die Komplexität des Systems wider (Mackay et al., 2006). Wichtig sind folgende Faktoren:

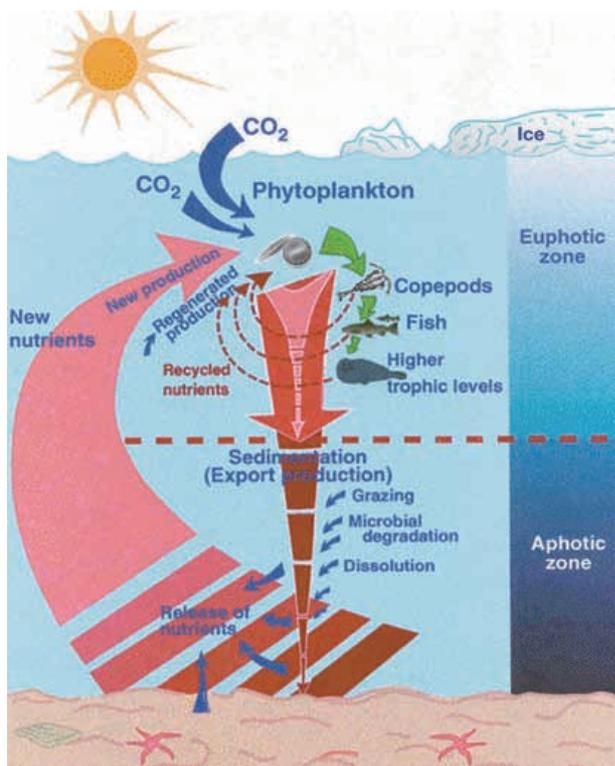
- Schneedicke auf dem Eis, Dauer der Eisbedeckung, Dauer der Bedeckung mit opakem (lichtundurchlässigem) Eis
- Wassertemperatur im Juli,
- Wassertrübung durch minerogene Suspensionsfracht, suspendiertes organisches Material
- Zooplanktonkonzentration, Wassertiefe (entscheidend für Trophiestrukturen).

Interessant ist, dass die absolute Wassertemperatur einen nicht so entscheidenden Faktor darstellt, weil diese in dem riesigen Wasserreservoir vor allem im Winter wenig schwankt und zudem immer nahe am Gefrierpunkt liegt. Auch im Sommer sind die Wassertemperaturen für die Plankterpopulation nicht im absoluten Wert bedeutend. Sie sind aber dafür entscheidend, ob und wo sich die spätsommerliche Schichtung oder die Umwälzungen unter der Eisschicht im Winter und im Frühjahr entwickeln können. Temperaturänderungen spielen also eine relative Rolle für die komplexe Hydrophysik des Baikalseesystems. Ein steuernder Faktor, der als wichtig identifiziert werden konnte, ist der Niederschlag, der wiederum von der atmosphärischen Zirkulation gesteuert wird.

Biologische Faktoren (Nahrungsnetze, Interaktionen zwischen Populationen, community ecology; Abb. 9) nehmen zwar eine wichtige Rolle ein, sind aber bis jetzt kaum unter dem Aspekt der geologischen Anwendung untersucht worden. In dem Sinne könnten Biomarkerstudien trotz schnellen bakteriellen Abbaus gute Einblicke in Zooplankterpopulationen bringen. Derzeit sind im Rahmen von CONTINENT noch Untersuchungen in Arbeit, die dazu neue Perspektiven eröffnen werden.



**Abb. 8:** Chlorophyll-a-Konzentration auf die verschiedenen Phytoplanktongruppen aufgeteilt. Die Daten der vier Stationen (S-Becken = Vydrino, Posolsky, Z-Becken, N-Becken = Kontinent-Rücken) zeigen große Variationen über die drei Sommer 2001 bis 2003 (Fietz et al., 2005). Links unten sind die Schlüsselpigmentverteilungen und rechts unten die Konzentrationen der verschiedenen Phytoplankter für die vier Stationen aufgezeichnet. Die Diatomeen stellen die dominante Gruppe in der Phytoplankterzusammensetzung. Chlorophyll-a distribution attributed to the different phytoplankton groups calculated with multiple linear regression techniques across the lake (4 stations: S Basin = Vydrino, Posolsky, C Basin, N Basin = Continent Ridge) during summer 2001 to 2003 (upper panel, Fietz et al., 2005) is indicating a strong interannual variability. To the left (below) the distribution of marker pigments and to the right the phytoplankton concentration at the 4 stations during the summer season. Diatoms are evidently the most abundant group.



Für Phytoplankter, die keine Schalen ausbilden, ist die Nährstoffverfügbarkeit wichtig. Die Messkampagnen zeigten allerdings, dass Nährstofflimitierung, anders als in europäischen und nordamerikanischen Seen, kaum für Phosphor, sondern höchstens ausnahmsweise für Stickstoff gilt. Neben Nitrat and Ammonium zeigt z. B. im Sommer auch der anorganische Stickstoff eine Abreicherung im Selenga-Delta. Erstere Abnahmen sind der Denitrifizierung zuzuschreiben. Die N<sub>2</sub>-Abnahme erklärt sich mit den während der Sommersaison vorherrschenden N-

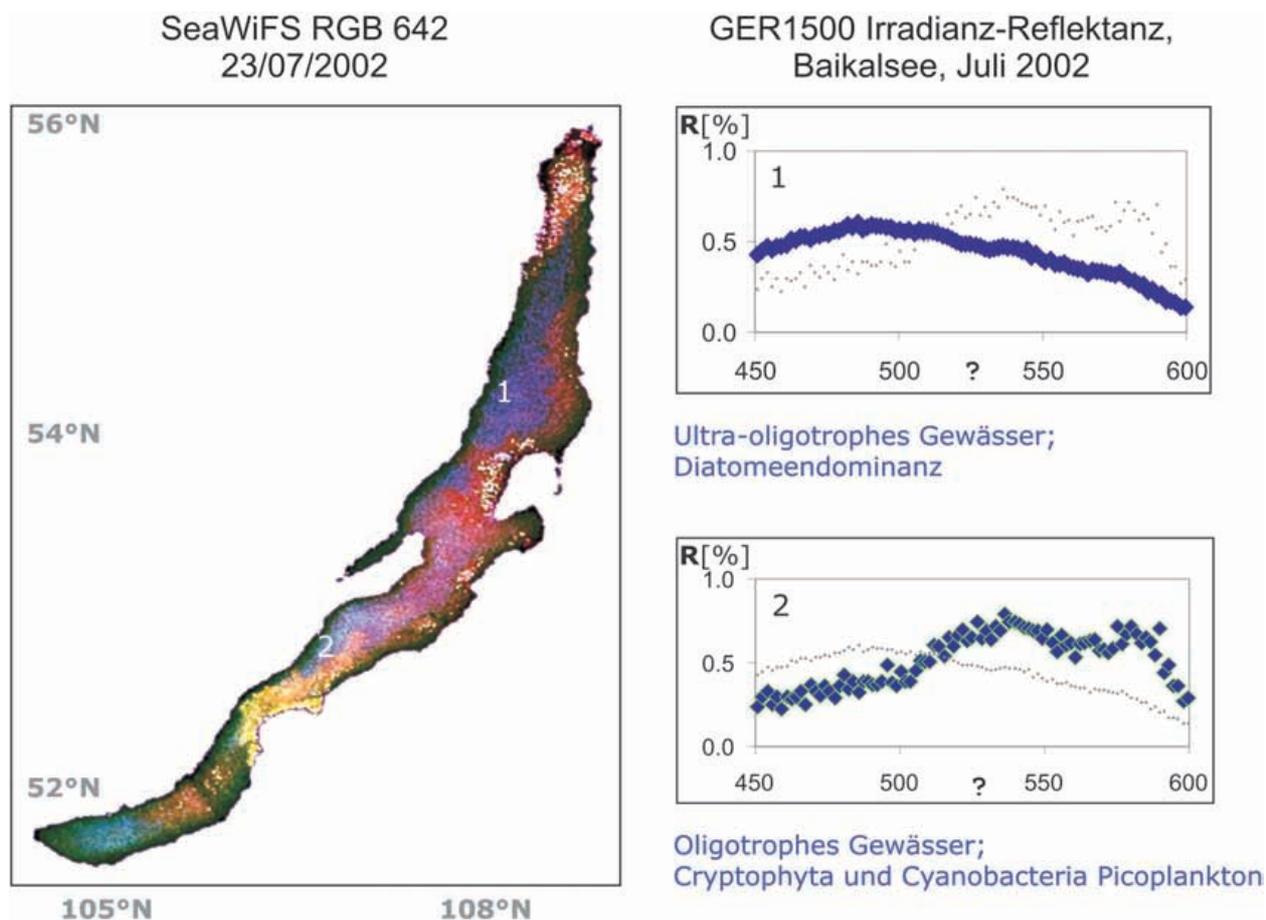
**Abb. 9:** Wichtigste biotische Prozesse in der photischen und aphotischen Zone: (i) Primärproduktion mit Nahrungskreislauf, (ii) Export des organischen Materials aus der photischen Zone mit wirksamen Abbauprozessen in der Wassersäule (iii) „New Production“ in der photischen Zone dank der wiederverwendbaren Nährstoffe (<http://lepo.it.da.ut.ee/~olli/eutr/sedFig3.gif>). Principal biotic processes occurring in the euphotic and aphotic zones: (i) Primary production and food web, (ii) Sedimentation through the water column: showing degradation processes of organic matter settling to the bottom, and (iii) new production in the photic zone using recycled nutrients (<http://lepo.it.da.ut.ee/~olli/eutr/sedFig3.gif>).

fixierenden, cyanobakteriellen Picoplanktern. Somit sind deren Pigmente ein ausgezeichneter Indikator für die Sommerproduktivität als Folge der Nährstoffsituation. Gemessen am gesamten Phytoplanktonvolumen sind die Anteile der cyanobakteriellen und eukaryotischen autotrophen Picoplankter am höchsten bei der Station Posolsky in der Nähe des Selenga-Deltas (61 %) und im südlichen Becken, in dem der Flusseintrag maximal ist, während sie am niedrigsten im nördlichen Becken (11 %) sind (Fietz 2005, Fietz und Nicklisch, 2004). Diese Unterschiede in der Häufigkeit bilden den Nährstoffgradienten für Stickstoff zwischen Süd- und Nordbecken ab und zeigen somit die unterschiedlichen Trophiestrukturen. Insgesamt ist die Phytoplankterproduktion im Winter geringer als während der eisfreien Zeit. Die totale Primärproduktion erreichte im Juli/August, der Hauptproduktionszeit, im nördlichen Becken eine über die Wasserkolonne integrierte Akkumulation von  $0,3 \text{ g m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  Kohlenstoff. Im wärmeren südlichen Becken liegt sie von Juli bis August bei  $0,8 \text{ g m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  Kohlenstoff. Allerdings treten alle 3 bis 5 Jahre im späten Winter „Melosirablüten“ auf. Dabei vermehrt sich die Diatome *Aulacoseira baicalensis*, früher Melosira genannt, im März-April und erreicht in 1 bis 25 m Wassertiefe Biomassen von 4 bis  $6 \text{ g m}^{-3}$ . Diese

extremen Kieselalgenblüten sind über erhöhte Silizium-Konzentrationen gesteuert, die sich über komplexe biologische Interaktionen aus der Vorjahressituation ergeben. Während der „Melosira-Jahre“ dominiert im Sediment die Winterproduktion, während in den anderen Jahren größtenteils die Sommerproduktion für das Sedimentsignal ausschlaggebend ist (David Jewson; persönl. Mitt. 2005).

### Satellitendaten-Auswertung: In situ Bioproduktion und Flusseintrag

Die Gewässerfernerkundung kombiniert mit „Ground Truthing“ bewährte sich als eine ausgezeichnete Methode, die biologische und allochthone Dynamik im Oberflächenwasser des Baikalsees in Raum und Zeit nachzuvollziehen. Der riesige Seekomplex erwies sich als ein bio-optisch vielseitiges Studienobjekt. Aus den morphologischen, klima- und einzugsgebietbedingten Gegebenheiten des Baikalsees hatte sich ein regionales Unterwasserlichtfeld der oberen Wasserschicht entwickelt, das den Baikalsee von den bio-optischen Rahmenbedingungen bisheriger Gewässerfernerkundungsstudien des marinen Bereiches, der Küstenfernerkundung, und der mesotrophen großen europäischen Seen unterscheidet. Die bio-



**Abb. 10:** Atmosphärenkorrigierte wasserverlassende Reflektanzen, Baikalsee, 23. 07. 2002, dargestellt als SeaWiFS „Quasi True Colour“, ein „Red Green Blue (Bänder:) 642“-Bild. Irradianzreflektanz-Messungen des Unterwasserlichtfeldes, Juli 2002, sowie die Information zur Phytoplankton-Dominanz\* (\*S. Fietz, IGB, Berlin) veranschaulichen die bio-optischen Provinzen (B. Heim, 2006).

Atmospherically corrected water leaving reflectance, Lake Baikal 23/07/2002, presented as SeaWiFS „Quasi True Colour“, a „Red Green Blue (spectra:) 642“-picture. Irradiance reflectance measurements of the under water light field, July 2002, and the phytoplankton dominances \* (\*S. Fietz, IGB, Berlin) are used to visualise the bio-optical provinces.

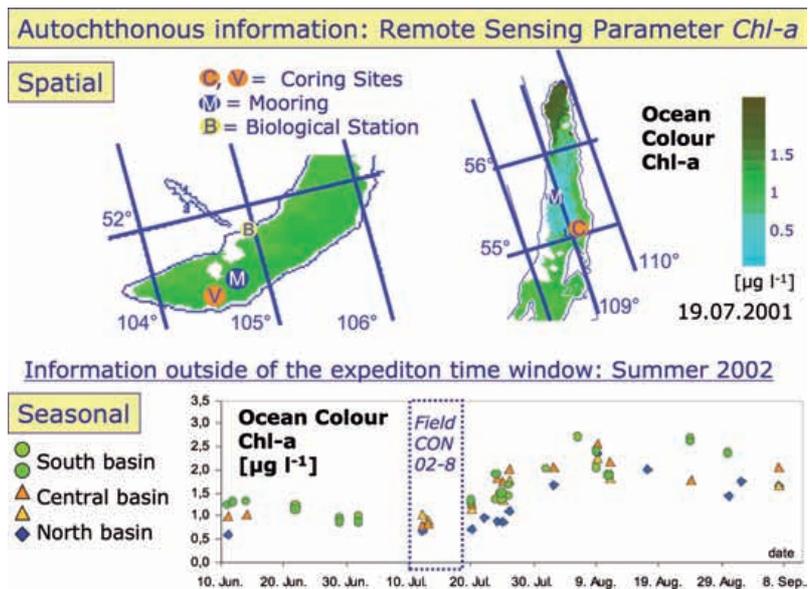
optischen Rahmenbedingungen, die durch die ausgedehnten Gelände-Messkampagnen definiert werden konnten, sind die hohe Transparenz und der oligotrophe Status in den Beckenbereichen sowie die Besonderheit von sehr organikreichen Flusseinträgen aus den Sumpfbereichen des Hinterlandes.

Die Evaluierung der empirischen globalen Chl-*a*-Algorithmen zeigte, dass eine standardisierte Atmosphärenkorrektur für den Baikalsee zu bedeutenden Überschätzungen von Chl-*a* bis zu Faktor 10 führt. Diese Chl-*a*-Überschätzung in den Standard-Chl-*a*-Satellitenprodukten tritt in Bezug auf oligotrophe Seen weltweit auf und behindert die Nutzung dieser eigentlich frei zur Verfügung stehenden Daten. Über regionale Recherchen zur Atmosphärenschicht über dem Baikalsee konnte eine angepasste Atmosphärenkorrektur-Prozessierung für das Baikalseegebiet eingerichtet werden, die eine Korrektur zu realen spektralen Strahlungswerten (der wasserverlassenden Reflektanz) ermöglichte (Abb.10).

Für den Baikalsee als oligotrophes System mit entsprechend sehr niedrigen Chl-*a*-Werten, die zwischen 0,7 und 2  $\mu\text{g l}^{-1}$  liegen, funktionierte der SeaWiFS-OC2-Chl-*a*-Algorithmus, der aus einem globalen Datensatz (2853 Messsätze) oligotropher mariner Gewässer entwickelt wurde (O'Reilly et al. 1998, 2000) am besten (Heim, 2005). Die Evaluierung mit den Geländedatensätzen zeigte eine Ableitungsgenauigkeit im Rahmen des vorgegebenen NASA- und ESA-Qualitätsstandards für Chl-*a*-Ableitung aus optischen Satellitendaten einer gringeren Abweichung als  $\pm 35\%$ .

Die SeaWiFS-Chl-*a*-Daten offenbarten eine relativ homogene horizontale Verteilung Anfang des Sommers, die aufgrund der sich entwickelnden thermischen Schichtung im Juli/August in einer heterogenen Wirbelstruktur zerbricht. Durch diese in den Satellitendaten räumlich nachvollziehbare Heterogenität konnten wir überprüfen, ob die einzelnen Monitoringstationen in getrennten Produktivitätsprovinzen liegen und inwiefern die Ergebnisse der einzelnen Stationen miteinander betrachtet werden können. Gemittelte Konzentrationen der einzelnen Beckenbereiche aus den Chl-*a*-Zeitreihen der Jahre 2001 und 2002 zeigen deutlich einen Anstieg der Bioproduktion im Juli/August, der über das Zeitfenster der Geländeerkampagnen nicht mehr erfasst werden konnte (Abb. 11).

Auch die Flusseinträge (Parameter Suspended Particulate Matter, SPM) konnten wir im ersten Jahr der Untersuchungen auf spektakuläre Weise verfolgen, denn im südlichen Einzugsgebiet des Baikalsees fand während der

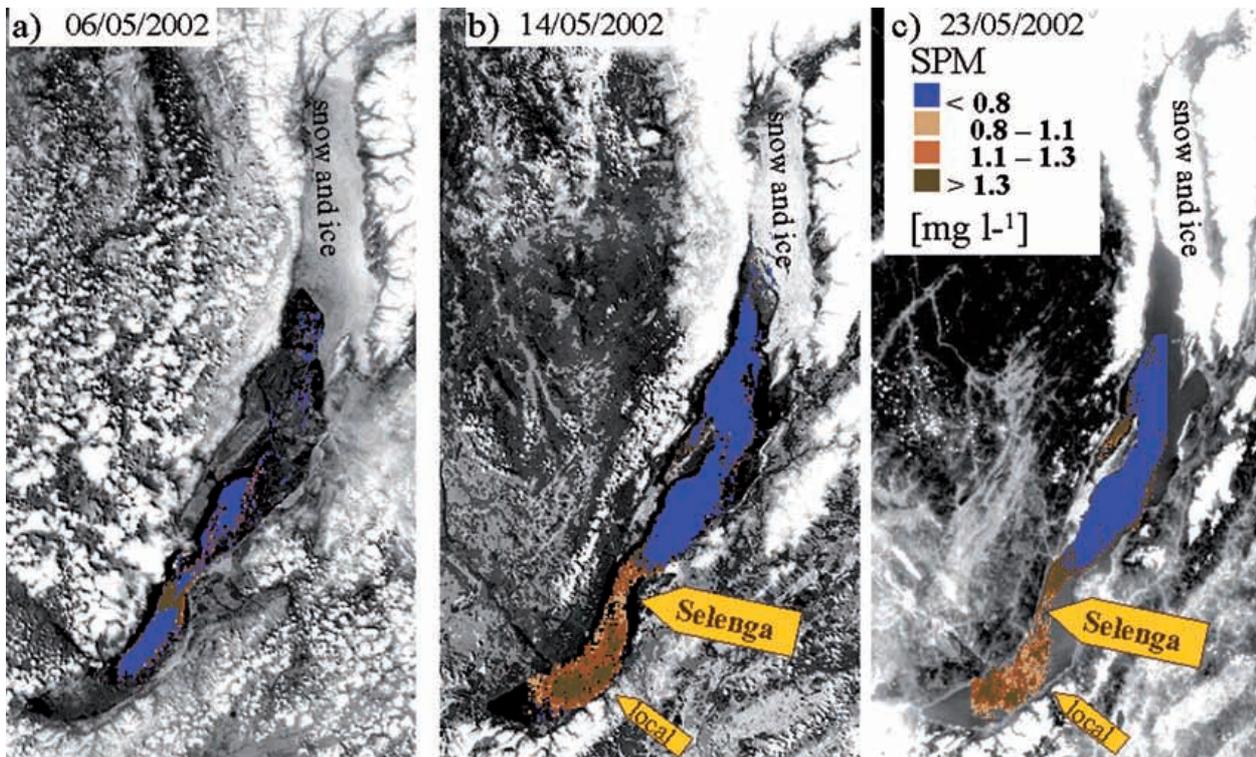


**Abb. 11:** Ausschnitte aus den aus atmosphärenkorrigierten SeaWiFS-Satellitendaten berechneten Chl-*a*-Karten des Baikalsees. Sie zeigen die räumliche Verteilung der Primärproduktivität. Die berechneten Chl-*a*-Werte widerspiegeln auch die Werte außerhalb der Expeditionszeit. Die Kurven im unteren Teil der Abbildung zeigen die Sommerproduktivität (2002) für verschiedene Gebiete im Baikalsee; blau: ultraoligotroph im zentralen Nordbecken; orange: oligotroph im Zentralbecken; grün: Südbecken (B. Heim, 2006). Chl-*a* maps of Lake Baikal calculated from atmospherically corrected SeaWiFS satellite data provide spatial information on primary productivity. The calculated Chl-*a* data also provide information on the seasonal succession of productivity beyond the expedition time windows (summer 2002, CON02-8). The graph at the bottom displays summer (2002) productivity of different regions in Lake Baikal: blue: ultra-oligotrophe central North Basin; orange: oligotrophe Central Basin; green: South Basin (B. Heim, 2006).

Feldaufnahmen ein Jahrhundertgewitter statt. Die Belieferung des Sees mit Huminstoffen und mineralischem Detritus war demzufolge außergewöhnlich reichlich. Das optische Signal dieses organikreichen Flusseintrages bestand in einer deutlich verstärkten Absorption im blaugrünen Wellenbereich, der in den kurzwelligen SeaWiFS-Bändern sichtbar wurde und sich noch in einem Zeitraum von zwei Wochen nach dem katastrophalen Flutereignis hielt. Über diesen optischen Indikator konnte die Intensität und die außergewöhnliche räumliche Ausbreitung der Flusseinträge vor allem in das Südbecken nachvollzogen werden (Abb. 12). Für die Ableitung des am Baikalsee anzutreffenden organikreichen Flusseintrages wurde ausgehend von Schlussfolgerungen aus der Barguzin- und Selenga-Transektenbeprobung und den Schwebstoffgeländedaten von Juli 2001 ein empirischer Algorithmus generiert. Auch in den Zeiten der Schneeschmelze zeigten die SeaWiFS-Satellitendaten, dass über einen mehrwöchigen Zeitraum im Mai bedeutende Flusseinträge in das Südbecken stattfanden (Heim et al., 2005).

### Wie werden die Signale aus der photischen Zone ins Sediment verbracht?

Damit die Proxies aus den Sedimenten mit realistischen ökologischen Situationen in Verbindung gebracht und entsprechend quantifiziert werden können, mussten zuerst



**Abb. 12:** Terrigener Eintrag (SPM in mg/L), dargestellt auf der SeaWiFS-Karte für den 19. 07. 2001. Der Eintrag aus dem Hinterland des Barguzin und der Selenga sowie aus umliegenden Gebirgsbächen ist erhöht, weil zwei Wochen früher ein Unwetter geherrscht hatte (B. Heim, 2006).

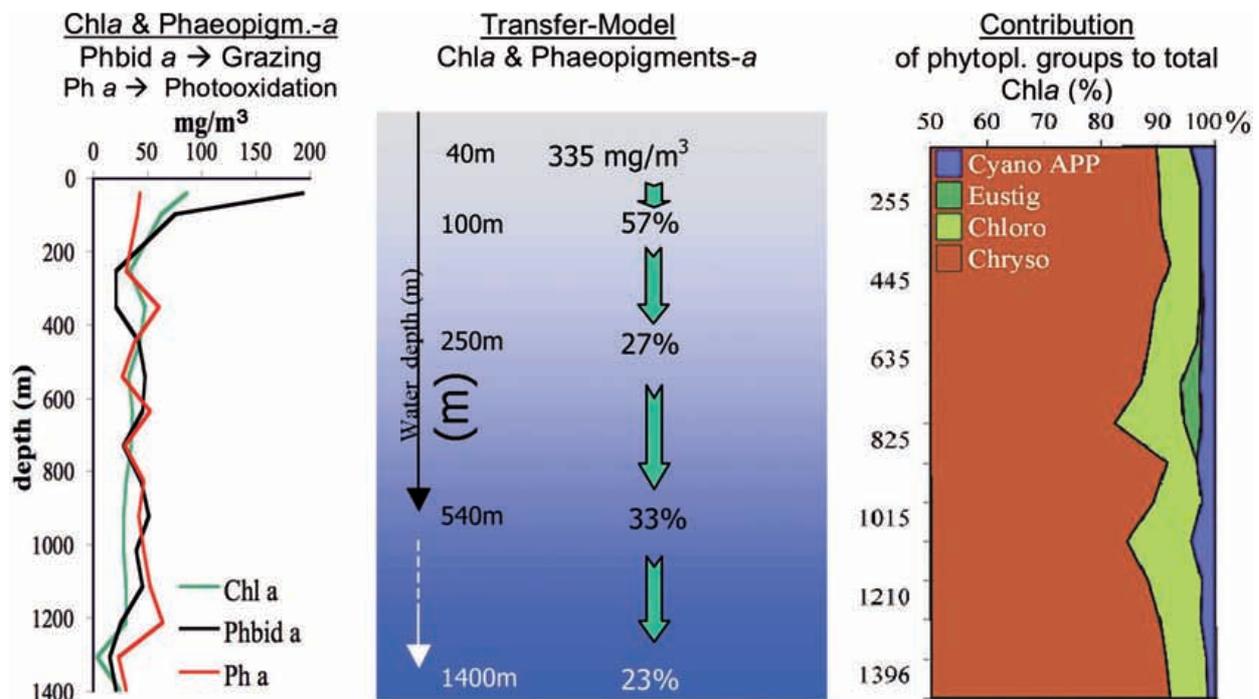
SPM (suspended particulate matter) presented on a SeaWiFS map for 19 /07/2001 (SPM concentrations are in mg/L). Selenga, and Barguzin Rivers and local mountain rivers bring the terrigenous input. It is intensified due to heavy rainfall-events that occurred up-stream two weeks earlier (B. Heim, 2006).

geeignete Transfermodelle erstellt werden. An zwei Beispielen wird gezeigt, warum die Suche nach den Transfermodellen so wichtig ist: (i) am Abbau der photosynthetischen Pigmente und (ii) an den Lösungsvorgängen an Diatomeen, die beide wichtige Proxygruppen darstellen.

Monitoring-Daten zeigten, dass Bakterien im Sommer und im Winter unabhängig von der Populationsdichte bis 30 % der täglichen Primärproduktion konsumieren. Der Abbau der photosynthetischen Pigmente in der Wassersäule wird zusätzlich zur bakteriellen Zersetzung auch über weitere Prozesse, wie Photooxidation und Zooplanktonabweidung kontrolliert. In zwei Tiefenprofilen von Sedimentfallen wurden die Abbauraten über 3 Jahre quantifiziert (Abb. 13). Der Baikalsee bildet insofern auch besondere Transfermodelle aus, da folgende Prozesse für ihn von großer Bedeutung sind: die euphotische Zone (> 1 % des Oberflächenlichtes) geht bis zu einer Tiefe von 50 m, und bis zum Boden des Sees in über 1000 m Tiefe ist reichlich Sauerstoff vorhanden. Besonders dominant scheint die Zooplanktonabweidung zu sein. Das vorherrschende Zersetzungsprodukt der photosynthetischen Pigmente sind Phaeopigmente, vor allem das Phaeophorbid-*a*, die sich im Verdauungssystem der Meso- und Mikrozooplankter (Carpenter und Bergquist, 1985) bilden. Da keine Phaeophorbide in unseren Wasserproben nachgewiesen werden konnten, verlassen die Phaeopigmente in den relativ großen Kotpillen der Mesozooplankter rasch den photischen Bereich der Wassersäule. Dies bestätigen auch frü-

here Beobachtungen am Baikalsee, in denen postuliert wurde, dass das Abweiden durch Zooplankton große Bedeutung im Nahrungsnetz hat (Koshov, 1963).

Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Abnahme von Chl-*a* und Phaeophorbid-*a* in den obersten Schichten exponentiell, aber unter 250 m Tiefe deutlich langsamer stattfindet. Setzt man die Konzentration von Chl-*a* und Phaeophorbid-*a* in einer Tiefe von 40 m als 100 %, finden wir in 100 m Wassertiefe nur noch 57 %, bei 250 m noch 27 %, und in Bodennähe auf 1400 m Tiefe noch 22 % der ursprünglichen Menge (Fietz et al., 2005) (Abb. 13). Für die anderen Chlorophylle und die Carotinoide gelten ähnliche Abbauraten. Unterschiedliche, größenabhängige Pigment-Abbauraten wurden vor allem bei den Bacillariophyceae und Chrysophyceae, der chemotaxonomischen Gruppe mit den höchsten Anteilen an der Phytoplanktervergesellschaftung, beobachtet (Fietz et al., 2005). Die generell geringeren Abbauraten in größeren Wassertiefen sind wahrscheinlich über die niedrigen Wassertemperaturen zu erklären. Alle unsere Geländebeobachtungen weisen darauf hin, dass die Ablagerung von photosynthetischen Pigmenten auf der Sedimentoberfläche im Baikalsee durch diese vielen Faktoren beeinflusst wird. Aber dank der gefundenen Transfermodelle, die aus den Beobachtungen abgeleitet wurden, können wir jetzt auf die ursprüngliche Phytoplanktervergesellschaftung schließen. Damit können die biotischen Sedimentproxies für ökologische Informationen und damit zur Rekonstruktion des Klimas genutzt werden.



**Abb. 13:** Häufigkeit des Chl-a, sowie des Abbauproduktes Pheophorbid-a und Pheophytin a in der Wassersäule (links) (Fietz, 2005). Das Abbau-Modell ist in der Mitte dargestellt. Rechts sind die prozentualen Anteile der einzelnen Phytoplankter am Chl-a abgebildet. Die prozentualen Veränderungen in der Tiefe zwischen 600 und 800 m und 1000 und 1200 m deuten auf horizontale Tiefenströmungen, denn dort befinden sich zum Zeitpunkt der Fallenbeprobung Wassermassen mit anderen Phytoplankterinhaltsstoffen.

Abundance of Chl-a, the decay product Pheophorbid-a and Pheophytin a in the water column (left) (Fietz, 2005). In the middle, the decay model for pigments is shown. Percentage of phytoplankton contributing to Chl-a is shown to the right. The variations in the abundance between 600 and 800 m, 1000 and 1200 m highlight levels of lateral water transport containing other phytoplankton assemblages then at the mooring station.

Die Auflösungsprozesse an den Diatomeen sind ein weiterer entscheidender Prozess, der mit einberechnet werden muss. Die im Baikalsee beobachteten Auflösungsraten sind speziesabhängig und damit leicht zu korrigieren. Für Rekonstruktionen früher lebender Diatomeen-Populationen wurden Korrekturfaktoren für die einzelnen Diatomeen-Arten errechnet. Dazu wurde die Zusammensetzung der lebenden Populationen mit den Vergesellschaftungen aus verschiedenen Sedimentfallentiefen und dem heutigen Oberflächensediment verglichen. Am aggressivsten sind die Lösungsvorgänge allerdings an der Sediment-Wasser-Grenzfläche (Battarbee et al., 2005). Obwohl die Lösungsresistenz selektiv ist und nur ca. 1 % der ursprünglichen Population erhalten bleibt, werden die meisten ökologisch informativen Arten im Sediment eingebettet und stehen uns heute für die Rekonstruktion des Klimas zur Verfügung.

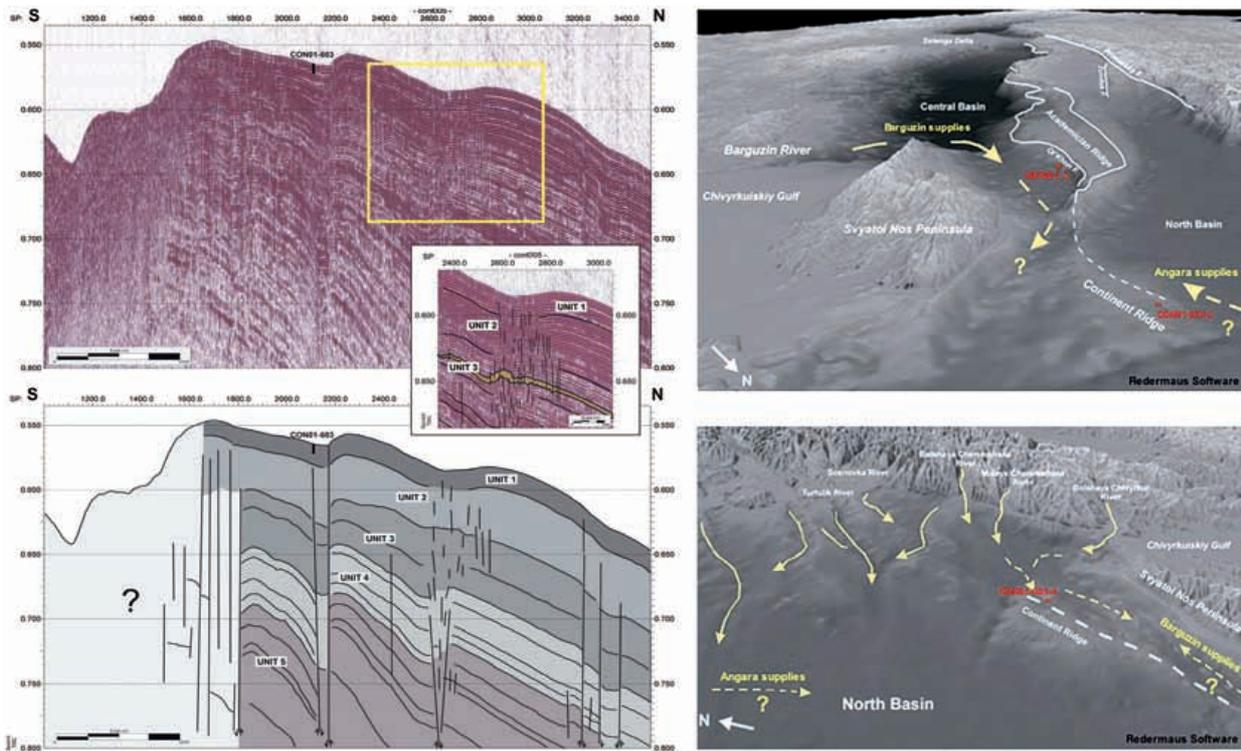
Diese dank langjährigem Monitoring gefundenen Transfermodelle sind nun Werkzeuge, die uns erlaubten, mit geringen Fehlern behaftete Rückschlüsse auf ursprüngliche Populationen zu machen und damit klimatische Veränderungen in der Vergangenheit zu quantifizieren.

### Einige Einblicke in Klimavariationen während der letzten beiden Warmzeiten

Für die zweite Aufgabe des Projektes CONTINENT, der Aufdeckung der charakteristischen Klimavariationen, standen uns Sedimentkerne von drei ausgewählten Sta-

tionen zur Verfügung. Dazu mussten wir geeignete Bohrstationen, an denen kontinuierliche und ungestörte Kerne geborgen werden konnten, auswählen. Die Suche nach solcherart geeigneten Bohrstationen wurde zuerst mit geophysikalischen Geländeaufnahmen an drei Punkten des Baikalsees vorangetrieben. Dazu wurde ein Subbottom-Profilier (3,5 kHz) sowie ein hochfrequenter Sparker (500 bis 1000 Hz) zur Charakterisierung des Untergrundes mit einer Auflösung von 10 bis 50 cm bis in eine Sedimenttiefe von mehreren 10 Metern eingesetzt. Diese Aufnahmen erlaubten ungestörte Seesedimentabfolgen zu lokalisieren und dadurch tektonikbedingte Versätze und bodenströmungsbedingte Hiaten (Lücken in Sedimentabfolgen) zu umgehen. Dann wurde in Kombination mit dem abbildenden Side-Scan-Sonar (SONIC-3) mit 100 bzw. 300 kHz-Auflösung überprüft, ob an den ausgewählten Stationen an der Sedimentwassergrenze Sedimentumlagerungen stattfinden (Abb. 14).

Mit der Kombination dieser drei Methoden konnten im Nord- und Südbecken und südlich des Selenga-Deltas drei Kernstationen ausgemacht werden (vgl. gelbe Punkte Abb. 4), die uns tatsächlich kontinuierliche und minimal gestörte Abfolgen lieferten. Mit einem Kullenberg-Kolbenlot (modifiziert durch Prof. Meischner, Göttingen) wurden vom Forschungsschiff VERESHAGIN an jeder ausgewählten Station drei Kerne mit 12 cm Durchmesser und jeweils einem Vorlot gezogen und geborgen (vgl. oben rechts Abb. 5). Die Kernlänge lag zwischen 9 und 13 m.

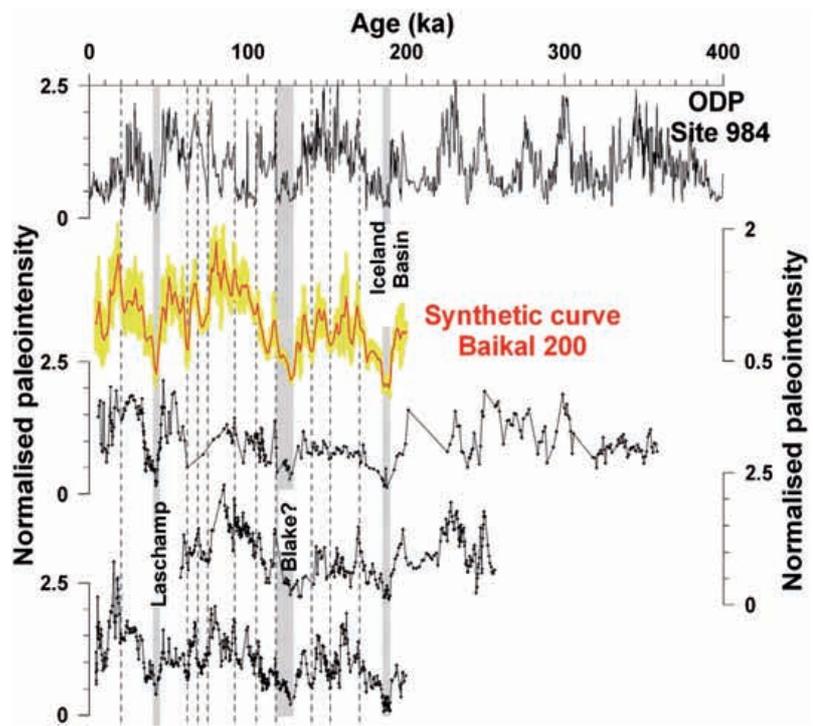


**Abb. 14:** Das seismische Profil, mit einem vergrößerten Ausschnitt aus dem hochauflösenden seismischen Profil, zeigt die wichtigsten Strukturen und die seismischen Einheiten, welche die wechselnde Sedimentologie am Kontinent-Rücken nachzeichnet (links). Eine perspektivische Ansicht auf den Kontinent-Rücken wurde auf der Basis der neuen bathymetrischen Karte (INTAS Project 99-1669, Debatist et al., 2002) konstruiert (rechts). Die gelben Pfeile zeigen Strömungs- und mögliche Sedimenttransportrichtungen an. Die Topographie wurde der öffentlich zugänglichen SRTM-Datenbank entnommen. Das Bild wurde mit der Software IVS Fledermaus® erstellt (Charlet et al., 2005).

Seismic profile (to the left) across the Continent Ridge, with a close-up of high-resolution reflection seismic data, clearly shows the main structural characteristics and the different seismic units making up the sedimentary cover. 3-D-view on the Continent Ridge coring site (to the right). Bathymetry from INTAS Project 99-1669, Debatist et al., (2002). The yellow arrows indicate current directions and reflect possible sediment transport tracks. Topography from public SRTM database. Image created with IVS Fledermaus® (Charlet et al., 2005).

**Abb. 15:** Die synthetische Paläointensitätskurve (Baikal 200), die aus allen gemessenen Baikalkernen zusammengesetzt wurde (Demory et al., 2005), ist der Referenzkurve von ODP Site 984 (Channell, 1999) gegenübergestellt. Für die Kompilation wurden die Daten vorgängig geglättet. Einige Korrelationen zwischen den beiden Kurven sind mit gestrichelten Linien hervorgehoben. Das Paläointensitätsminimum fällt wahrscheinlich in das Blake Event, eine Umpolung um ca. 119 ka (grau markiert).

Paleointensity variations versus age, a synthetic curve „Baikal 200“ resulting from compilation of available curves from Lake Baikal is compared with the reference curve from ODP Site 984 (Channell, 1999). For the compilation, data have been averaged using a sliding window of 2 ka (the variance is marked by the grey shadow). Dashed lines show some of the correlations. The grey lines show the location of the low paleointensities related to geomagnetic excursions. Note that the lowest paleointensities may fall into the Blake event at approx. 119 ka (Demory et al., 2005).



Am GFZ Potsdam wurden die Kerne gemeinsam mit den Projektpartnern geöffnet, beschrieben und in Auflösung von 0,5 bis 2 cm Sedimentproben entnommen (unten rechts Abb. 5). Die erste vorläufige Korrelation der Kerne beruhte auf den Porositäts- und auf magnetischen Suszeptibilitätswerten.

Dann musste eine für die klimatischen Rekonstruktionen zuverlässig anwendbare absolute Sedimentchronologie vorgelegt werden. Dieses Altersmodell für die vergangenen 150.000 Jahre erstellten wir mittels radiometrischer Analysen ( $^{210}\text{Pb}$ , AMS- $^{14}\text{C}$ ) und paläomagnetischer Messungen.

Besonders geeignet für die Chronologie, die absolute Altersbestimmung, ist die Intensität der Magnetisierung der Seesedimente (Abb. 15). Sie hängt von zwei Faktoren ab:

(i) von der Konzentration der magnetischen Partikel im Sediment. Diese ist von den Gesteinstypen im Einzugsgebiet, Verwitterungsprozessen, Transport- und damit verbundenen Fraktionierungsprozessen sowie den Redox-Verhältnissen im Ablagerungsmilieu, die über Erhalt oder Auflösung der magnetischen Partikel entscheiden, abhängig.

(ii) von der Stärke des Erdmagnetfeldes zur Zeit der Ablagerung. Die magnetischen Partikel richten sich relativ schnell in der Wassersäule parallel zum aktuellen Magnetfeld aus und werden während der Ablagerung entsprechend von der umgebenden Sedimentmatrix fixiert. Der Ausrichtungsgrad ist dabei von der Größe der Partikel, d. h. vom Verhältnis magnetischer Moment zur Masse des Partikels, sowie von der Stärke des Magnetfeldes abhängig. Somit können im Sediment nicht nur die Lage und Richtungsänderungen des Erdmagnetfeldes aufgezeichnet werden, sondern auch seine Intensitätsschwankungen. Zur Kalibrierung werden meist nur die normierten relativen Änderungen ausgewertet. Zu einer solchen relativen Paläointensitätsbestimmung wird die Intensität der natürlichen Magnetisierung mit der Intensität einer später künstlich aufgeprägten Magnetisierung normiert. Da zur Magnetisierung ein Magnetfeld konstanter Richtung und Stärke verwendet wird, ist die damit produzierte Magnetisierung nur noch von der Konzentration der magnetischen Partikel abhängig. Das Intensitäts-Verhältnis von natürlicher zu künstlicher Magnetisierung spiegelt daher die relativen Änderungen des Erdmagnetfeldes zur Zeit der Sedimentation wider. Dieses gilt jedoch nur, wenn die magnetischen Komponenten nicht bei und/oder nach der Ablagerung durch chemische Prozesse verändert oder gar weggelöst wurden. Im Rahmen von Paläointensitätsbestimmungen werden daher meist umfangreiche Begleitmessungen durchgeführt, um derartige Fälle auszuschließen. Paläointensitätsbestimmungen werden seit etwa 10 bis 15 Jahren systematisch durchgeführt.

Mit Hilfe der Radiokarbonmethode (AMS  $^{14}\text{C}$ ) oder anderen Techniken (z. B. Thermo-Lumineszenz oder Optisch-Stimulierte-Lumineszenz) datierte Datenreihen zeigen häufig weltweit korrelierbare, vergleichbare Amplituden-

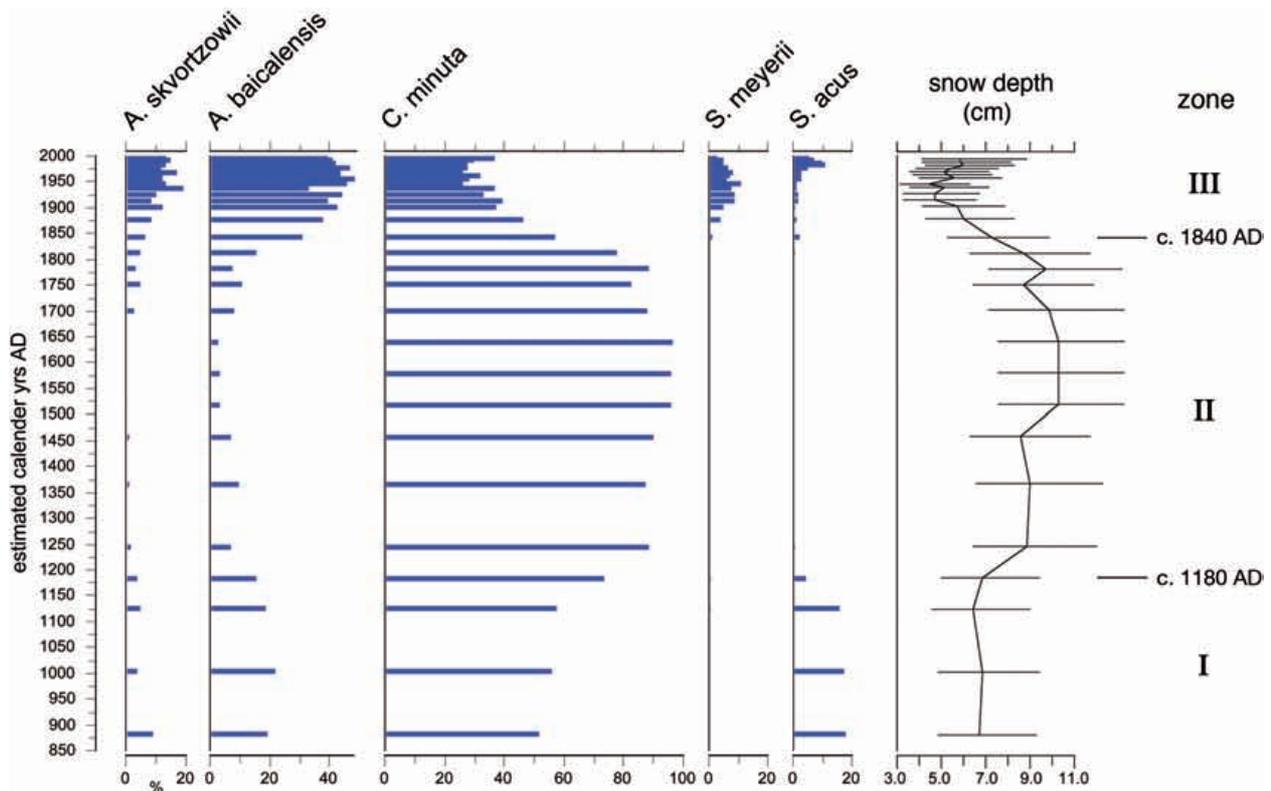
variationen der Paläointensität, mit Perioden in der Größenordnung von tausend bis zehntausend Jahren. Sie können somit zur Datierung von neu gewonnenen Bohrkerne, wie im Falle des Baikalsees herangezogen werden. Ausgeprägte Minima der Paläointensität sind zudem mit auffälligen Richtungsanomalien des Erdmagnetfeldes verbunden, die sich im Idealfall meist als kurzfristige, nur einige wenige tausend Jahre währende Umpolungen des Erdmagnetfeldes dokumentieren. Solche Ereignisse treten etwa alle 20.000 bis 50.000 Jahre auf. Sofern diese mit niedrigen Feldintensitäten verbundenen Richtungsänderungen im Sediment aufgezeichnet worden sind, können sie als weitere eindeutige Zeitmarkierung zur Datierung herangezogen werden. Für die Baikal-Chronologie liegt die Auflösung mittels charakteristischer Zeitmarken zwischen 2000 und 4000 Jahren.

*Welche Klimabedingungen herrschten während der letzten beiden Interglaziale (Warmzeiten) in Zentralsibirien?*

In der Folge soll anhand von zwei Beispielen die Bedeutung der Temperatur- und der Feuchtigkeitsänderungen im regionalen klimatischen Umfeld erläutert werden.

Einen tiefen Einblick in das Klimageschehen während historischer Zeit in Zentralsibirien erhielten wir durch die gezielte Untersuchung der wechselnden Diatomeenvergesellschaftungen (Mackay et al., 2005). Für diese Untersuchung wurde ein mit  $\text{Pb}^{210}$  und AMS- $^{14}\text{C}$  datierter Sedimentkurzkern aus dem Südbecken des Baikalsees verwendet. Zuerst wurden die Häufigkeiten der Diatomeenarten entsprechend ihrer Empfindlichkeit auf Lösungsvorgänge korrigiert. Nachdem die Diatomeenarten mittels einer Clusteranalyse gruppiert wurden, kristallisierten sich dabei drei Zeitzonen mit typischen Vergesellschaftungen heraus, nämlich aus den Zeiträumen 880 bis 1180 Anno Domini (AD) (I), 1180 bis 1840 AD (II), und 1840 bis 1994 AD (III). Das erste Zeitintervall, Zone I, entspricht der mittelalterlichen Warmzeit, gefolgt von der Kleinen Eiszeit, Zone II, und dem jüngsten Erwärmungstrend, Zone III (Abb. 16).

Die Schlüsselarten, die ökologische Bedingungen, wie unterschiedliche Schneebedeckung der Eisdecke im Winter, oder sommerliche Schichtung der Wasserkolonne anzeigen, sind uns aus rezenten Studien bekannt (Abb. 16). *Synedra acus*, die häufigste Art in Zone I, ist eine weit verbreitete Form, die, im Gegensatz zu den endemischen Diatomeenarten, besonders gut bei hohem Lichtangebot gedeiht. Dies konnte bei Laborversuchen getestet und bestätigt werden. Worauf kann also ein bevorzugtes Auftreten der Diatomee *Synedra acus* hindeuten? Ein verstärktes günstiges Lichtangebot konnte vorliegen, wenn die Wolkenbedeckung im Frühjahr/ Sommer geringer als z. B. heute und damit die Sonneneinstrahlung beträchtlich erhöht war. Meteorologisch müsste folgender Kontext erstellt werden: Aus Studien in Westmonsun-beeinflussten Gebieten (Indien) ist bekannt, dass in Zeitzone I das Sommertief über dem Tibetischen Plateau stärker ausgeprägt war als heute. Das wirkte sich auf die Trajektorien der mit Feuchtigkeit beladenen Westwinde aus, die sich in der



**Abb. 16:** Relative Häufigkeit von Diatomeen nach spezies-spezifischer Korrektur und Normierung auf 100 %. Das Schneeeakkumulationsmodell beruht auf Korrekturfaktoren und Trainingsdatensätzen mit fünf korrigierten Arten. Die Diatomeenverteilungen deuten hin auf eine Erwärmung ab ca. 1750 AD, deutlich früher, als aus vielen Datensätzen für Europa nachvollzogen werden kann (Mackay et al., 2005).

Relative percentages of diatoms after correcting for dissolution and recalculated to sum to 100 %. The snow-accumulation model is based on diatom data using correction factors and training sets with five corrected taxa. From the diatom abundance pattern it becomes evident that warming starts as early as c. 1750 AD, which is significantly earlier than reported previously for Europe (Mackay et al., 2005).

Folge räumlich verschoben; das Baikalseegebiet erhielt darüber geringere Wolkenbedeckung, aber höhere Sonneneinstrahlung während der Hauptproduktionszeit der Phytoplankter.

In Zone II, während der Kleinen Eiszeit, gewann die Diatomee *Cyclotella minuta* an Bedeutung. Diese Form ist eine typische Überlebenskünstlerin, wenn im Herbst und Winter aufgrund von Schneebedeckung auf der Eisdecke die Lichtverhältnisse minimal sind. Was bedeutet es also, wenn diese eher lichtfeindliche Diatomee zu den Klimabedingungen dieser Zeit ihre ökologisch besten Bedingungen hatte? In Zone II müsste die winterliche sibirische Hochdruckzelle sehr ausgeprägt gewesen sein. Wenn die Winddynamik minimal ist und die Winter sehr lang sind, kann dies eine erhöhte Schneeakkumulation in der Baikalseeregion bedeuten. Die Schneedicke in Abb. 16 wurde über ein Transfermodell errechnet (Mackay et al., 2003, 2006).

In Zone III treten Phytoplankter bevorzugt auf, die heutzutage am Baikalsee ihr Maximum an Produktionsaktivität im Frühjahr haben. Diese Diatomeen sind auch generell wenig an die lichtabschirmende Schneeschicht auf dem Eis angepasst. Deshalb zeigt diese Diatomeenvergesellschaftung an, dass der Eisaufbruch früher beginnt als in den Zonen I und II und weist über die erhöhte Produktionsaktivität der Phytoplankter im Frühjahr auf die begin-

nende globale Erwärmung hin. Interessant ist die Beobachtung, dass diese Erwärmung schon um 1750 und damit 50 bis 100 Jahre früher als in Europa einsetzte.

*Welche Klimabedingungen herrschten im vergangenen Interglazial (der Eem- oder Kasantzevo-Warmzeit) in Zentralsibirien?*

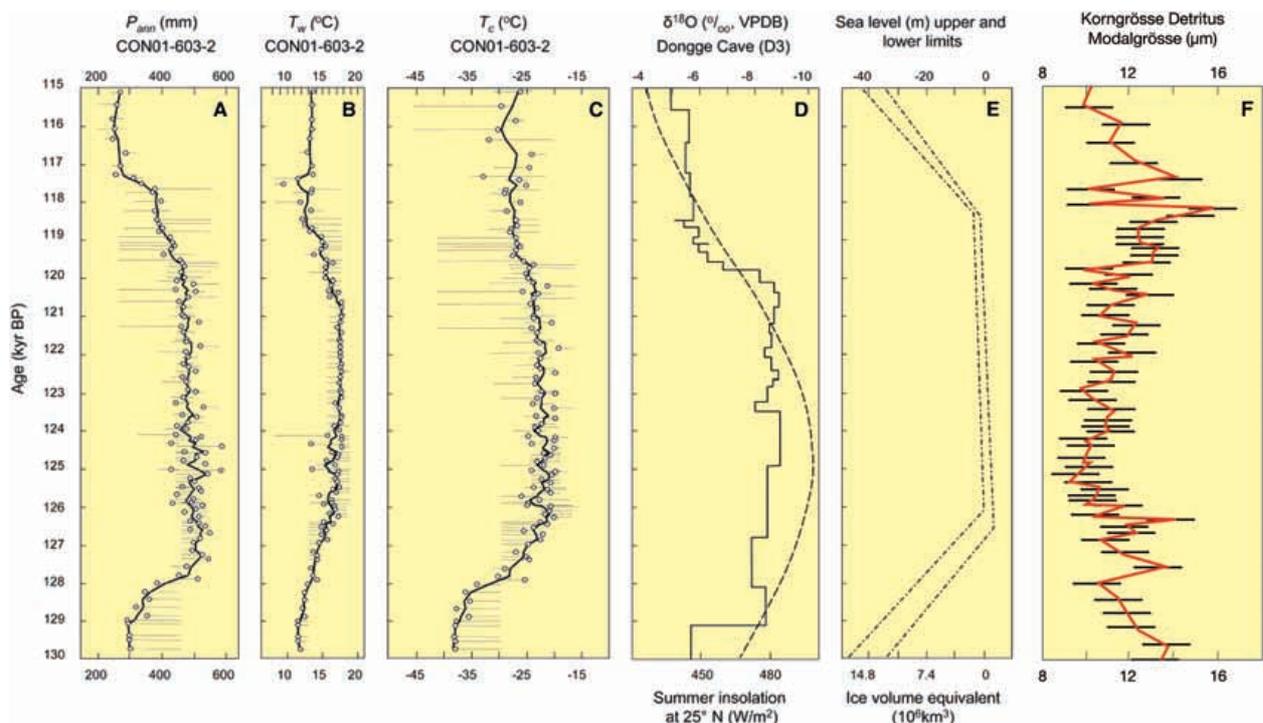
Das vergangene Interglazial, d. h. die Warmzeit zwischen den letzten beiden Glazialen (Eiszeiten), ist für uns im Hinblick auf seine Erwärmungsgeschichte sehr interessant. Es wurde in früheren Arbeiten häufig als Analog für zukünftige Entwicklungen herangezogen, was sich allerdings als nicht länger haltbar herausgestellt hat. Pollendaten belegen Veränderungen im saisonalen Niederschlags- und Temperaturmuster, denn die Vegetation reagiert innerhalb von wenigen Dekaden, falls einer der Klimaparameter oder beide sich ändern. Heute liegen die mittleren Temperaturen im Baikalseegebiet bei 14 bis 16 °C im Sommer und bei –22 bis –26 °C im Winter. Mittlere Niederschlagsraten über dem See sind 160 bis 400 mm/Jahr, die in den umliegenden Gebirgen auf über 700 mm/Jahr ansteigen. Das Maximum der Niederschläge konzentriert sich in unserer Zeit auf die Sommerzeit.

Aus den Pollendaten in den Seesedimentkernen wurden über Transfermodelle ehemalige Vegetationsbestände

(Biome) evaluiert (Prentice et al., 1996; Tarasov et al., 2005) und unter Verwendung der *Best Modern Analog*-Methode die klimatischen Faktoren des vorherigen Interglazials bestimmt (Guiot et al. 1989; Tarasov et al., 2005). Die quantitative Rekonstruktion für saisonale Temperaturen und Niederschläge ist in der Abb. 17 zu sehen. Am Übergang vom Glazial zum Interglazial (ca. 130 bis 128 ka BP) lagen die Temperaturen des kältesten Monats noch bei  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , während die Temperaturen des wärmsten Monats 11 bis  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  betragen. Die jährlichen Niederschläge wurden mit  $300\text{ mm}$  veranschlagt. Diese Bedingungen waren ideal für Taigabestände. Durch einen Wechsel zu Tundravegetation manifestiert sich der Übergang zum Interglazial. Die Niederschläge nahmen deutlich zu ( $500$  bis  $600\text{ mm/Jahr}$ ) und die Wintertemperaturen erreichten Werte wärmer als  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , während die Sommertemperaturen bei  $16$  bis  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  lagen, wärmer als die heutigen Temperaturwerte. Dann folgte eine rasche Abkühlung vor  $118.000$  Jahren, begleitet durch einen drastischen Feuchtigkeitsrückgang. In der Folge verschwanden die Wälder und wurden durch Buschgras-Vergesellschaftungen ersetzt ( $118$  bis  $115\text{ ka BP}$ ). Minimale und maximale Temperaturen waren deutlich zurückgegangen (Durchschnittstemperaturen im Winter bei  $-28$  bis  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , im Sommer bei  $14$  bis  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ebenso gingen die jährlichen Niederschläge bis  $250\text{ mm}$  zurück.

Zusammen mit der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung ist in Abb. 17 das Profil der globalen Insolation und der Meeresspiegelhöhe, die auf die Änderungen des Eiskappenvolumens zurückgeht, abgebildet. Der generelle Verlauf der Sommertemperaturkurve folgt der Insolationskurve für mittlere Breiten. Erkennbar ist eine parallele Absenkung des Meeresspiegels und Zunahme des Eiskappenvolumens. Die Eismasse kontrolliert die klimatische Kontinentalität in Zentralasien (ein höherer Meeresspiegel resultierte aus reduzierten Eismassen, die sich in einer geringeren Kontinentalität auswirken). Nach Schätzungen von Lambeck und Chappell (2001) lag der Meeresspiegel vor  $126.500$  Jahren am höchsten. Zu Zeiten des Meeresspiegelhochstandes beobachten wir im Baikalsedimentkern die wärmsten Wintertemperaturen ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Vor  $126.000$  Jahren begannen die Wintertemperaturen wieder zu sinken und die Korrelation zwischen der Temperaturentwicklung und der Meeresspiegelabsenkung zusammen mit der parallelen Zunahme des Eisvolumens wird vor  $118.000$  Jahren besonders deutlich.

Generell können wir aussagen, dass ein reduziertes Pol-eis-Volumen ausschlaggebende Folgen auf die atmosphärische Zirkulation hatte, da zu Zeiten maximaler Meeresspiegelstände die Winter in Sibirien wärmer als heute waren. Diese klimatischen Folgen in Sibirien zeigen sich



**Abb. 17:** Klimatische Parameter ( $T_{\text{cold months}}$ ,  $T_{\text{warm months}}$ ,  $P_{\text{annual}}$ ) für den Pollendatensatz vom Continent-Rücken (Granoszewski et al., 2005). Diese wurden mit der „Modern Analogue Method“ errechnet für das letzte Interglazial, Termination II und den Übergang zum frühen Weichselglazial. Mittelwerte (offene Kreise) sind zusammen mit Standardabweichungen aufgetragen (Tarasov et al., 2005). Die klimatischen Parameter sind Meeresspiegeländerungen (Lambeck und Chappell, 2001) und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten aus Stalagmiten der Dongge-Höhle (China) (Yuan et al., 2004) sowie der Modalkorngröße aus den Sedimenten vom Continent-Rücken zum Vergleich gegenübergestellt.

Climate variables ( $T_{\text{cold months}}$ ,  $T_{\text{warm months}}$ ,  $P_{\text{annual}}$ ) reconstructed from Continent Ridge pollen record (Granoszewski et al., 2005) using the modern analogue approach for the last Interglazial, Termination II and transition into the cold interval following Kasantzevo. Mean values (open circles) with standard deviations are shown (Tarasov et al., 2005). For comparison we show sea level changes (Lambeck und Chappell, 2001),  $\delta^{18}\text{O}$  values from stalagmites of Dongge cave (China) (Yuan et al., 2004) and modal grain sizes values from sediments of Continent Ridge.

deutlich in der Vegetationsentwicklung. Die sehr niedrige Winterinsolation, die aufgrund der veränderten Lage der Erdachse damals in Sibirien sogar niedriger war als heute, scheint dagegen keine übergeordneten direkten Effekte zu zeigen. Diese bedeutend wärmeren Winter als heute, die sich in Zeiten von Meeresspiegelhochständen entwickelten, können durch eine Kombination von Faktoren erklärt werden: z. B. durch höhere zyklonische Aktivität entlang der Polarfront, durch Zunahme des Einflusses der wärmenden Westwinde, durch generell wärmere atmosphärische Strömungen.

Wir können annehmen, dass Veränderungen dieser Art, bedingt durch die Abschwächung der Sibirischen Hochdruckzelle, die winterliche Winddynamik im Baikalseegebiet reduzierte. Einsicht in die atmosphärische Dynamik in der Baikalseeregion haben wir über die Korngrößenverteilung der windverfrachteten Partikel im Sediment erhalten. Ein geeigneter Parameter ist die Modalgröße der Partikelfraktion zwischen 2 und 63  $\mu\text{m}$ . Vergleicht man deren Größenverteilung in den Seesedimentkernen mit den Änderungen des Polareisvolumens, fällt folgendes auf: Bei Zunahme der Polareismasse steigt der Modalwert der Korngrößen, bei einer Reduzierung der Polvereisung liegt parallel ein Rückgang der Korngrößen vor (Abb. 17). Damit wird offensichtlich, dass während des interglazialen Wärmeoptimums die atmosphärische Dynamik, nicht aber unbedingt die Intensität, in der Baikalseeregion deutlich geringer war als während der kühleren Intervalle. Dies kann mit der meridionalen Verlagerung gekoppelt mit der Abschwächung der Sibirischen Hochdruckzelle erklärt werden. Wir nehmen an, dass die Korngrößenabnahme einem Anstieg der distalen (= weiter entfernten und daher feineren) Staubkomponente entspricht. Wir können allerdings nicht ausschließen, dass ein Teil des Staubeintrags auch auf vermehrten distalen Sommereintrag zurückzuführen ist, wie das auch Modellberechnungen für zukünftige Erwärmungen voraussagen. Zeitgleiche Wechsel zeigen sich auch im Sommer in den Zirkulationsänderungen im monsunbeeinflussten Südostasien. Isotopenuntersuchungen an Stalagmiten in China (Dongge-Höhle, signal (Yuan et al. 2004); (Abb. 17)) belegen eine  $\delta^{18}\text{O}$ -Zunahme vor 120.000 Jahren, was auf eine Abschwächung des monsunalen Einflusses deutet.

## Ausblick

Nachdem es über viel Monitoring im Projekt gelungen war, die klimatischen Parameter, die Klimaproxies, für dieses große lakustrine System mit ozeanähnlichen boundary conditions zu kalibrieren, stand den ersten Rekonstruktionen der klimatischen Variationen für Sibirien in den Warmzeiten nichts mehr im Wege. Es zeigte sich, dass Feuchtigkeit neben Temperaturänderungen der entscheidende Faktor für die klimatische Signalbildung im Sediment ist. Aber noch sind nicht alle Daten ausgewertet. Aus heutigen Untersuchungen wissen wir, dass das Geschehen im Nordatlantik über die Nordatlantische Oszillation (NAO) die Wintertemperaturen der Nordhemisphäre weitestgehend bestimmt. Unsere Daten, die wir derzeit daraufhin untersuchen, scheinen auf ähnliche Weise auf Ein-

flüsse aus dem Nordatlantik in der Eem/Kasanzeevo-Warmzeit hinzuweisen. Aber jetzt schon wurde klar, dass ein Archiv nicht allein aus dem Punkt heraus verstanden werden kann, seine Geschichte muss auch im Raumbezug gewertet werden. Dazu werden wir in Zukunft „strategisch wichtige“ Archive untersuchen, die Aussagen zur longitudinalen und meridionalen Bewegung von Trajektorien und Hochdruck- und Tiefdrucksystemen über tausende Jahre zurück zulassen.

## Literatur:

- Channell J.E.T., 1999. Geomagnetic paleointensity and directional secular variation at Ocean Drilling Program (ODP) site 984 (Bjorn Drift) since 500 ka: comparison with ODP site 983 (Gardar drift). *J Geophys Res* 104:22937-22951
- Charlet F., Fagel N., De Batist M., Hauregard F., Minnebo B., Meischner D. and the SONIC Team. 2005. Sedimentary dynamics on isolated highs in Lake Baikal: evidence from detailed high-resolution geophysical data and sediment cores. *Global Planet. Change*, 46, 125-143.
- Demory F., Nowaczyk N.R., Witt A. and Oberhänsli H. 2005. High-resolution magnetostratigraphy of late Quaternary sediments from Lake Baikal, Siberia: timing of intracontinental paleoclimatic responses. *Global Planet. Change*, 46, 167-186.
- Fietz, S., Nicklisch, A., 2004. An HPLC analysis of the summer phytoplankton assemblage in Lake Baikal. *Freshwater Biology* 49, 332-345.
- Fietz, S. 2005. Recent and fossil phytoplankton pigments in Lake Baikal as markers for community structure and environmental changes. Dissertation Humboldt Universität Berlin, 2005.
- Granoszewski W., D. Demske, M. Nita, G. Heumann, A.A. Andreev, (2005) Vegetation and climate variability during the last interglacial evidenced in the pollen record from Lake Baikal. *Global Planetary Change*, 46 (1-4), 187-198.
- Guiot J., A. Pons, J.-L. de Beaulieu, M. Reille, 1989. A 140,000 year climatic reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 338, 309-313.
- Heim, B., Magnussen, S., Oberhänsli, H., Kaufmann, H., 2003. Case 2 Lake Baikal: analyses of SeaWiFS data within the scope of the paleoclimate project CONTINENT. *EARSel eProceedings* 3, 127- 135.
- Heim, B., Oberhänsli, H., Fietz, S., Kaufmann, H., 2005. Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data. *Glob. Planet. Change* 46, 9 -27.
- Heim, B., 2006. Quantitative and qualitative analyses of Lake Baikal's surface waters using Ocean Colour Satellite Data (SeaWiFS). Dissertation Universität Potsdam, 2006.
- INTAS Project 99-1669 Team, 2002. A new bathymetric map of Lake Baikal. Open-File Report on CD-ROM.
- IPCC 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Working Group 1 contribution to the IPCC Third Assessment Report (Summary for Policy Makers) (<http://www.ipcc.ch>).
- Kashiwaya, K.S., 2003. Long Continental Records from Lake Baikal. Springer Verlag, Berlin, 370 pp.
- Kozhov, M., 1963. Lake Baikal and its life. *Monogr. Biol.* 11.,
- Kozhova O.M. and Izmet's'eva L.R., 1998. Lake Baikal: Evolution and biodiversity. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 447 pp.
- Lambeck K., J. Chappell, 2001. Sea level change through the Last Glacial cycle. *Science*, 292, 679-685.
- Mackay, A.W., Battarbee, R.W., Flower, R.J., Granin, N.G., Jewson, D.H., Ryves, D.B., Sturm, M., 2003. Assessing the potential for developing internal diatom-based inference models in Lake Baikal. *Limnol. Oceanogr.* 48, 1183- 1192.
- Mackay, A.W., Jewson, D.H., Morley, D.H., Rioual, D.W., Ryves, D.B., 2006, in review. Assessing the vulnerability of endemic diatom species and primary production in Lake Baikal to predictions of future climate change: a multivariate approach.
- Mackay, A.W., Ryves, D.B., Battarbee, R.W., Flower, R.J., Jewson, D., Rioual, P., Sturm, M., 2005. 1000 years of climate variability in central Asia: assessing the evidence using Lake Baikal (Russia) diatom assemblages and the application of a diatom-inferred model of snow cover on the lake. *Glob. Planet. Change* 46, 281-297.

- Maerki, M., Müller, B., Wehrli, B., 2005 submitted for publication. New perspectives to assess mineralization pathways in surface sediments. *Limnol. Oceanogr.*
- Müller, B., Maerki, M., Schmid, M., Vologina, E.G., Wehrli, B., West, A., Sturm, M., 2005. Internal carbon and nutrient cycling in Lake Baikal: sedimentation, upwelling and early diagenesis. *Glob. Planet. Change* 46, 101- 124.
- Prentice I, W. Cramer, S.P. Harrison, R. Leemans, R.A. Monserud, A.m. Solomon, 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J Biogeogr.*, 19,117-134.
- Oberhänsli H. and Mackay A. 2005. Progress towards reconstructing past climate in Central Eurasia, with special emphasis on Lake Baikal. *Global Planet. Change*, 46, 1-7.
- O'Reilly, J.E., et al. (22 co-authors), 2000. SeaWiFS Post Launch Calibration and Validation Analyses: Part 3. Hooker, S.B., Firestone, E.R. NASA Tech. Memo. 11, 2000-206892. NASA Goddard Space Flight Center.
- O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Mitchell, B.G., Siegel, D.A., Carder, K.L., Garver, S.A., Kahru, M., and McClain, C.R., 1998, Ocean colour chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.* 103, 24937-24953.
- Williams, D.F., Peck, J., Karabanov, E.B., Prokopenko, A.A., Kravchinsky, V., King, J., Kuzmin, M.I., 1997. Lake Baikal record of continental climate response to orbital insolation during the past 5 million years. *Science* 278, 1114- 1117.
- P. Tarasov, W. Granoszewski, E. Bezrukova, S. Brewer, M. Nita, A. Abzaeva, and H. Oberhänsli, 2005. Quantitative reconstruction of the last interglacial vegetation and climate based on the pollen record from Lake Baikal, Russia. *Climate Dynamics*, 25, 625-637.
- Todd, M.C., Mackay, A.W., 2003. Large-scale climate controls on Lake Baikal ice cover. *J. Clim.* 16, 3186- 3199.
- Wüest, A., Ravens, T.M., Kocsis, O., Schurter, M., Sturm, M., Granin, N., 2005. Cold intrusions in Lake Baikal-direct observational evidence for deep water renewal. *Limnol. Oceanogr.* 50 (1), 184-196.
- Yuan, D., H. Cheng, R.L. Edwards, C.A. Dykovski, M.J. Kelly, M. Zhang, J. Qing, Y. Lin, Y. Wang, J. Wu, J.A. Dorale, Z. An, and Y. Cai, 2004. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science*, 304, 575-578.

