

# Klimaschwankungen und -trends des älteren Holozäns in den südlichen Niederen Tauern: multidisziplinäre Auswertung eines Sedimentkerns aus dem Oberen Landschitzsee (Lungau)

Schmidt R.<sup>1)</sup>, Kamenik C.<sup>2)</sup>, Kaiblinger C.<sup>1)</sup>, Tessadri R.<sup>3)</sup>

- <sup>1)</sup> Institut für Limnologie, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Mondsee, Österreich,
- <sup>2)</sup> Oeschger Center for Climate Research & Institut für Geographie, Universität Bern, Schweiz
- <sup>3)</sup> Institut für Mineralogie und Petrographie, Universität Innsbruck, Österreich

## *Abstract*

### **Early-Holocene climate changes and trends in the southern Niedere Tauern: a multi-proxy study of a lake sediment core from Oberer Landschitzsee (Lungau)**

Lake Oberer Landschitzsee (2.067 m a.s.l.) is a key site for the reconstruction of Holocene climate changes at the southern Austrian Central Alps (Niedere Tauern, Lungau). The lake is located in a climatically sensitive ecotone close to the alpine treeline. Its radiocarbon (AMS <sup>14</sup>C) dated sediments have been studied intensively using a multi-proxy approach. Local glaciers, which originated from the Younger Dryas cold period, have disappeared during the early Holocene warming. Subsequently, Oberer Landschitzsee was affected by two cold and wet periods. The first started about 10.5 kyrs before present (BP) and culminated at ca. 10.2 kyrs BP. The second occurred between ca. 9.5 and 9.2 kyrs BP. From ca. 9.2 to 8.7 kyrs BP a period of lake summer warming separated these older climate oscillations from younger climate deteriorations between ca. 8.7 to 7.6 kyrs BP. The latter coincided with glacier advances in the nearby Hohe Tauern (Venediger, Frosnitz), whereas in the Niedere Tauern perennial snowfields developed, which kept summer lake water temperatures low. Prolonged summer warming and late autumn mixing characterized the following three warm periods (Holocene optimum events) between ca. 7.5 to 5.3 kyrs BP, which were interrupted by two cold fluctuations. The snowfields and possibly permafrost in the catchment of the lake disappeared during the Holocene optimum events, resulting in distinct lake warming (principle of ultra-sensitive lakes). The interval between ca. 7 and 6 kyrs was more continental than the younger one from ca. 6 to 5.3 kyrs BP. The change in continentality could explain the lowering in timber/tree-line. During the following climate oscillation at ca. 5 kyrs BP, pronounced wet and snow-rich conditions altered with drier ones. The period from ca. 5 to 4 kyrs BP indicated strong seasonal divergence, most probably due to the increasing impact of the mediterranean winter-rain climate on the area south of the Alps. In sum, the time-window from ca. 11.5 to 4 kyrs BP indicated (i) increasing temperatures with a plateau between 7.5 and 5.3 kyrs BP, (ii) a

long-term trend of declining continentality, probably due to the increasing influence of the mediterranean winter-rain climate, (iii) climate oscillations with a periodicity of approximately 1000 years, (iv) two marked, well-known, acyclic, short-term cold fluctuations: the 8.2 kyrs cold event and the pre-boreal oscillation at about 11.3 kyrs BP.

### *Einleitung*

Alpenseen stellen wichtige Klimaarchive vor allem aus zweierlei Gründen dar: (1) schon geringe Temperaturveränderungen führen zu großen hydrochemischen, physikalischen und biologischen Veränderungen (Sommaruga-Wögerath et al. 1997, Psenner & Lackner 2006); (2) Klimaschwankungen sind in der alpinen Region deutlich ausgeprägt. So liegt die rezente Erwärmung in den Alpen deutlich über dem globalen Durchschnitt (u.a. Beniston et al. 1997, Auer et al. 2007). Die Informationen über Klima- und Umweltveränderungen bleiben in den Ablagerungen von Alpenseen gespeichert und sind für die Paläolimnologie zugänglich.

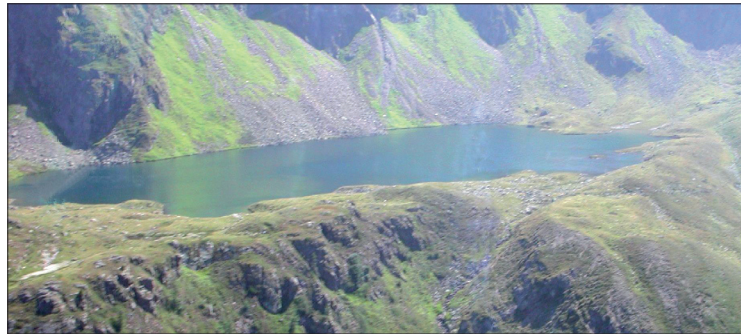
Die Niederen Tauern in den österreichischen Zentralalpen weisen auf engem Raum eine größere Zahl kleinerer Seen mit relativ kleinen Einzugsgebieten auf. In 45 dieser Seen zwischen ca. 1500 und 2300 m wurden über zwei Jahre (1998-1999) die oberflächennahen Wassertemperaturen mittels automatischer Temperaturmessgeräte gemessen. Diese Thermistor-Messdaten wurden für die Bestimmung der Temperaturoptima und -toleranzen von Kieselalgen (Diatomeen) verwendet (Schmidt et al. 2004a, b). Diese Algen bleiben aufgrund ihrer robusten silikatischen Zellwand zumeist gut in Seesedimenten erhalten. Für die Rekonstruktion von klimaabhängigen Variablen wurde mittels sogenannter Transferfunktionen, basierend auf der in der Paläolimnologie etablierten Methode gewichteter Mittel, Kalibration und Regression (Zusammenfassung bei Birks 1998), der Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Algenzusammensetzung modelliert. Unter diesen Modellen wies der „Zeitpunkt der Herbsdurchmischung“ die höchste Vorhersagequalität auf. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass der indirekte Einfluss der Temperatur auf Diatomeen über den Weg der Durchmischung, woran neben Temperatur noch andere Einflussgrößen wie Wind und Veränderungen im Chemismus beteiligt sein können, größer ist als der Temperatureinfluss alleine. Mit Hilfe dieser Transferfunktion wurde nun der Zeitpunkt der Herbsdurchmischung für den Zeitraum von ca. 11.500 bis 4000 Jahre v. h. aus den fossilen Kieselalgen eines Sedimentkerns des Oberen Landschitzsees berechnet (Schmidt et al. 2004a). Aus den Zeitpunkten der Herbsdurchmischung und dem höhenstufenabhängigen Temperaturgradienten in

den Kalibrationsseen der Niederen Tauern wurden letztlich die Temperatur-Anomalien geschätzt (zur genauen Methode siehe Schmidt et al. 2007).

Der Obere Landschitzsee ist ein kleiner (ca. 8,9 ha), 13,6 m tiefer, nährstoffarmer (oligotropher) See auf der Südabdachung der Niederen Tauern (Lungau) (Abb. 1).

*Abb. 1. Oberer Landschitzsee, Niedere Tauern, Lungau, aus der Luft, von Süden (Foto R. Schmidt).*

Fig. 1. Aerial view of Oberer Landschitzsee, Niedere Tauern, Lungau, from the south (Photograph R. Schmidt).



Der See liegt karartig auf 2.067 m Höhe etwas über der Baumgrenze, die von der Zirbe (*Pinus cembra*) gebildet wird. Der Sedimentkern (ObLAN) aus dem tiefsten Beckenbereich wurde mittels der Radiokarbonmethode (AMS  $^{14}\text{C}$ ) datiert. Aus den kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Daten wurde ein Tiefen-Altersmodell in Jahren vor heute (= v. h.) erstellt. Da bei der verwendeten  $^{14}\text{C}$ -Methode Datierungsunschärfen unvermeidlich sind ("floating chronology"), können diese nur Annäherungswerte sein. Neben der quantitativen Rekonstruktion des Zeitpunkts der Herstdurchmischung wurden noch Pollen, Mineralogie und Geochemie zu einem multidisziplinären Ansatz vereinigt (Schmidt et al. 2006). Ein solcher ist hilfreich, um die einzelnen Signale der Klimaindikatoren zu einem Gesamtbild zusammenzufügen und damit die Interpretation abzusichern. Die folgende Darstellung gibt eine Zusammenfassung der Ergebnisse von Schmidt et al. (2004a und 2006).

### *Klimarekonstruktion des älteren Holozäns*

Da nur holozäne Ablagerungen (letzten ca. 11.500 Jahre) im Sedimentkern erfasst wurden, dürfte der See noch während der Jüngeren Dryas, der letzten markanten Gletschervorstoßphase am Ende des Spätglazials, vom Gletschereis bedeckt gewesen sein. Die früh-Holozäne Warmphase fällt in die Pollenzone des sogenannten Präbo-reals. Der Temperaturanstieg und die wahrscheinlich kontinentalen (= warme

und trockene Sommer, kalte und niederschlagsarme Winter) Verhältnisse dürften, im Gegensatz zu den heute noch stark vergletscherten Hohen Tauern, zum Abschmelzen der letzten Gletscher im Untersuchungsgebiet geführt haben. Auf diese, mit Ausnahme einer kurzen Fluktuation (siehe unten), warme Periode folgte um ca. 10.500 v. h. eine kühle und niederschlagsreiche Phase, die um ca. 10.200 v. h. kulminierte. Auch in Folge bis ca. 9.200 v. h. verharrte der See auf einem niedrigen sommerlichen Temperaturniveau, wenn auch eine schwache Zweiteilung angedeutet ist. Sucht man nach bekannten Gletschervorstößen in den Ostalpen aus dieser Zeit (Nicolussi & Patzelt 2000), so bietet sich unter Berücksichtigung von Datierungunsicherheiten die Venediger Schwankung der Hohen Tauern an (Patzelt & Bortenschlager 1973). Schneereiche Verhältnisse dürften zu der Ausbildung ausdauernder Schneefelder im Einzugsgebiet des Oberen Landschitzsees geführt haben. Diese waren wahrscheinlich dafür verantwortlich, dass sich auch während der folgenden Warmphase zwischen ca. 9.200 und 8.600 v. h. der See nur mäßig erwärmte, wie aus den abgeleiteten Zeitpunkten der Herstdurchmischung und den daraus errechneten Temperaturanomalien geschlossen werden kann. Diese Hypothese wird durch die sedimentologischen Analysen des Kerns bestätigt (Schmidt et al. 2006). Erhöhte Quarz- und Sandanteile lassen auf Schmelzwässereinflüsse schließen. Auf diese Erwärmung zwischen ca. 9.200 und 8.700 v. h., die nach Nicolussi et al. (2005) zu einer hohen Waldgrenze, d.h. höher als 1980, führte, folgte wieder eine klimatisch instabile Periode, die bis ca. 7.600 v. h. andauerte. Diese schließt auch die kurzfristige Kälteschwankung um 8.200 v. h. ein. Diese Kälteschwankung lässt sich über weite Teile der Nordhemisphäre verfolgen, wie etwa in den Sauerstoff-Isotopen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) aus Eiskernen Grönlands (Alley et al. 2002) oder biogenen Karbonaten des Ammersees in Bayern (von Grafenstein et al. 1998). Da es sich um eine relativ kurzfristige Schwankung handelte (< 100 Jahre), ist jedoch für deren Nachweis eine entsprechende zeitliche Auflösung notwendig. Im Oberen Landschitzsee zeigt sich diese Schwankung u.a. in der Mineralzusammensetzung und im Pollenbild. Der auffallend geringe Quarzanteil und die verminderte Blühintensität der Grünerle (*Alnus viridis*) könnten auf eine erhöhte Schneeakkumulation und längere Schneedauer hinweisen, während es während der folgenden Erwärmung gerade umgekehrt war. Dies deckt sich mit Befunden aus anderen Gebieten (so u.a. auch der Pyrenäen, Pla & Catalan 2005), die ebenfalls auf einen raschen Wechsel zwischen kalt und warm hinweisen. Kurzfristige abrupte Fluktuationen der Strontium-Werte und anderer geogener Elemente wie z. B. Rubidium und Titan könnten, ähnlich wie während der sogenannten Präborealen Oszillation (ca. 11.300 v. h., Björck et al. 1997), durch einen raschen Wechsel zwischen Schneeakkumulation und Abschmelzen verursacht

sein. Diese Kälteschwankung scheint jedoch nur eine Episode innerhalb von zwei in ObLAN aufeinanderfolgenden Kälteperioden zwischen ca. 8.600 und 7.600 v. h. gewesen zu sein. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Magny (2004) aus dem nord-westlichen Randbereich der Alpen, der im vergleichbaren Zeitraum zwei nahe aneinander liegende kalte und feuchte Phasen (Phasen 11 und 12 nach Magny 2004) mit ausgeprägten Seespiegelhochständen nachweist. Inwieweit diese Serie von kalten und feuchten Klimaschwankungen mit der Frosnitz Schwankung (Patzelt & Bortenschlager 1973) übereinstimmt, die in den Hohen Tauern (Venediger Gruppe) zu markanten Gletscherhochständen geführt hat, ist aufgrund von Datierungsunschärfen noch fraglich (Nicolussi & Patzelt 2000). Auch im Adria-raum und nördlichen Mittelmeer gab es zwischen ca. 8.600 und 7.600 v. h. heute besonders feuchte, auch als Pluviale bezeichnete Phasen, die von kurzfristigen Trockenperioden unterbrochen wurden (u.a. Kallel et al. 1996, Wunsam et al. 1999, Aritztegui et al. 2000).

Abb. 2: Aus den fossilen Kieselalgen (Diatomeen) des Sedimentkerns Oberer Landschitzsee (südliche Zentralalpen) und einem Kalibrierdatensatz von 40 Seen der Niederen Tauern abgeleitete Zeitpunkte der Herstdurchmischung (in Kalendertagen) und die Temperatur-Anomalien gegenüber heute (1998/99). Die großen schwarzen Pfeile kennzeichnen die größeren Kälteschwankungen: 1 = Schwankungen von ca. 10.500 bis 9.200 v. h. (Venediger?), 2 = Schwankungen von ca. 8.600 bis 7.600 v. h. (Frosnitz?), 3 = Schwankungen um 5.000 v. h. (Rotmoos?). Die kleineren schwarzen Pfeile kennzeichnen zwei untergeordnete Schwankungen, die das „Holozäne Klimaoptimum“ unterteilen. Die weißen Pfeile kennzeichnen die Warmperioden: A = Früh-Holozäne Warmperiode; B = Warmperiode um 9.000 v. h., C = Warmperioden 1 – 3 (‘‘Holocene optimum events‘‘) zwischen ca. 7.500 und 5.300 v. h., zusammengefasst als sogenanntes ‘‘Holozänes Klimaoptimum‘‘ (nach Schmidt et al. 2004, verändert).

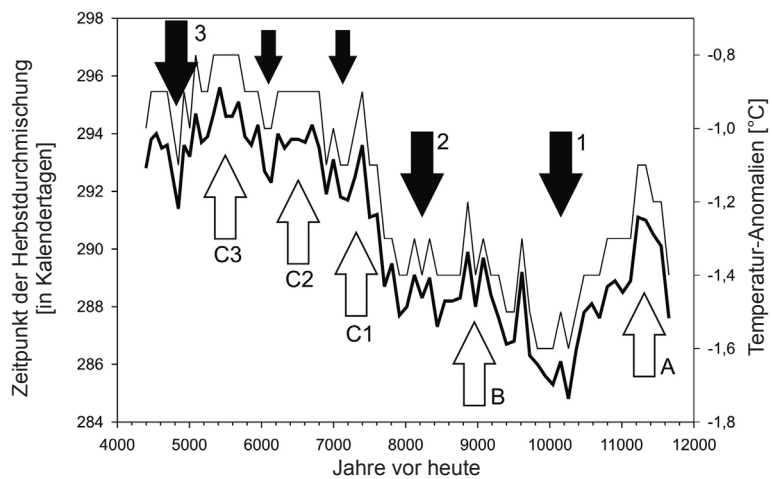


Fig. 2: Dates of autumn mixing (in Julian days) and temperature anomalies (reference 1998/99) in a sediment core of Oberer Landschitzsee (southern Central Alps) inferred from fossil calibrated diatoms (based on 40 training set lakes in the Niedere Tauern). The larger black arrows indicate the major cold periods 1 – 3, the smaller black arrows two cold climate fluctuations separating the so-called ‘‘Holocene climatic optimum’’ into three ‘‘Holocene optimum events’’. The white arrows indicate the major early-Holocene warm periods A – C.

Zwischen ca. 7.500 und 7.000 v. h. setzte eine, wahrscheinlich durch einen Rückschlag unterbrochene, markante Klimaerwärmung ein. Um die Vorgänge von damals besser verstehen zu können, stellten Thompson et al. (2005) die Wassertemperaturen der 45 Seen der Niederen Tauern in Relation zu der für die jeweilige Meereshöhe der Seen zu erwartenden Lufttemperatur. Dabei fielen einzelne Seen auf (besonders jedoch der Moaralmsee auf der Nordseite der Niederen Tauern im Ennstal), die deutlich unterkühlt sind. Mögliche Ursachen sind kalte Grundwasserströme und/oder ausdauernde Schneefelder im Einzugsgebiet dieser Seen. Thompson et al. (2005) sprechen von ultra-sensitiven Seen, da sich diese Seen nach Wegfall der kühlenden Einflüsse und in Angleichung an die Lufttemperatur, wie etwa im Zuge einer Klimaerwärmung, überproportional erwärmen würden. Analog führte das Verschwinden ausdauernder Schneefelder und damit verbundener Schmelzwässereinflüsse am Oberen Landschitzsee vor 7.000 Jahren zu einer deutlichen Erwärmung des Sees sowie späten Durchmischungszeiten im Herbst. Der Zeitraum zwischen ca. 7.500 und 5.300 v. h., der auch als „postglaziale Wärmezeit“ oder „holozänes bzw. postglaziales Klimaoptimum“ bezeichnet wurde, ist in den Alpen durch hohe Waldgrenzen und überwiegend geringe Gletscherausdehnung gekennzeichnet (u.a. Nicolussi & Patzelt 2000, Hormes et al. 2001, Tinner & Theurillat 2003). Im Kaunertal, Tirol, zeigen Holzuntersuchungen von Nicolussi et al. (2005), dass in diesem Zeitabschnitt auch die Baumgrenze von 2000 A.D. überschritten wurde. Da die Warmzeit aber von Kälterückschlägen unterbrochen wurde, wird auch von „Holocene optimum events“ gesprochen (Joerin et al. 2007). Im Oberen Landschitzsee ist dieser Abschnitt durch zwei kleinere Schwankungen dreigeteilt. Obwohl diese innerhalb der Schwankungsbreite des Modellfehlers liegen, stimmt jene um 6.000 v. h., die auch in einem Sedimentkern des Unteren Landschitzsees nachgewiesen wurde (Schmidt et al. 2002), gut mit den dendrochronologischen Ergebnissen überein (Nicolussi et al. 2005). Aufgrund der geochemisch/mineralogischen Befunde (Schmidt et al. 2006) war die Warmperiode zwischen 7.000 und der Klimaschwankung um ca. 6.000 v. h. wahrscheinlich kontinentaler (schneeärmer) als die jüngere Warmphase zwischen ca. 6.000 und 5.000 v. h. Möglicherweise führten die schneereicheren Bedingungen während der jüngeren Warmphase zu einem Absenken der Waldgrenze (Nicolussi et al. 2005). Aufgrund unterschiedlicher Bewertungen des Niederschlagseinflusses (von - 250 mm/Jahr bis + 250 mm/Jahr) schwanken dementsprechend auch die Temperaturschätzungen für das „Holozäne Klimaoptimum“ zwischen +1 °C und +2,5 °C (Joerin et al. 2007). Demzufolge würde das Maximum der abgeleiteten Temperatur-Anomalien des Oberen Landschitzsees für diese Zeit, das unter dem Referenzwert von 1998/99 liegt, den tatsächlichen Wert unterschätzen.

Um 5.000 v. h. deuten Fluktuationen einer Vielzahl geochemischer und mineralogischer Kenngrößen auf einen raschen Wechsel zwischen kühlen, schneereichen Abschnitten und wärmeren Phasen mit verstärktem Abschmelzen hin. Eine stärkere Erosionstätigkeit wird für diese Zeit auch aus den Hohen Tauern berichtet (Fritz & Uic 2001). In diese Zeit fallen die sogenannten Rotmoos Schwankungen in Tirol (Gams 1962, Bortenschlager 1970). Auch der Tiroler Eismann vom Hauslabjoch ist in diese Zeit um 5.300 v. h. datiert (Bortenschlager & Oegg 2000) und seine Erhaltung könnte mit diesen abrupten Kälteschüben in Zusammenhang stehen. Der Abschnitt von ca. 5.000 bis 4.000 Jahren v. h. deutet in ObLAN auf starke saisonale Unterschiede zwischen niederschlagsreichen Wintern (Herbst bis Frühling) und warmen und trockenen Sommern hin. Als Arbeitshypothese wurde eine Zunahme des Einflusses des mediterranen Winterregenklimas auf den südlichen Alpenraum postuliert, der möglicherweise mit der holozänen Transgression der Adria (Correggiari et al. 1996) im Zuge des globalen Meeresspiegelanstieges im Zusammenhang steht. Um ca. 4.000 v. h. erreichte jedenfalls die Steineiche (*Quercus ilex*), der Charakterbaum der Eu-Mediterranen Zone, auf ihrer Holozänen Ausbreitung in Europa von Süd nach Nord (u.a. Jahns 1991, Wunsam et al. 1999, Jalut et al. 2000, Drescher-Schneider et al. 2006) ihre heutige Nordgrenze im Adriaraum (Schmidt et al. 2000). Im Zuge dieser langfristigen Klimaänderung dürften die Winter, zumindest in den südlichen Alpen, schneereicher geworden sein.

### *Schlussfolgerungen*

Der Obere Landschitzsee auf der Südabdachung der Zentralalpen (Lungau) zeigt im Zeitfenster von ca. 11.500 bis 4.000 v. h.: (i) Längerfristige Wärmeperioden: zu Beginn des Holozäns, um ca. 9.000 v. h., sowie das mehrphasige („Holocene optimum events“) sogenannte „Holozäne Klimaoptimum“ zwischen ca. 7.500 und 5.300 v. h.; (ii) kalte Klimaschwankungen mit einer ungefähren Periodizität von 1000 Jahren (um  $\pm 10, 9, 8, 7, 6, 5000$  v. h.). Zwischen 8.600 und 7.600 und um 5.000 v.h. (Rotmoos?) scheinen diese Klimaschwankungen zudem besonders feucht gewesen zu sein. Eine Südverlagerung atlantischer Tiefdrucksysteme könnte sowohl die niederschlagsreichen Klimaschwankungen in den südlichen Alpen als auch die wahrscheinlich zeitgleichen pluvialen Abschnitte des Mittelmeerraumes zwischen ca. 8.600 und 7.600 v. h. erklären. Das Prinzip der geteilten Kälteschwankungen, wie für das Spätglazial postuliert, kann auch auf die großen (globalen?) Klimaschwankungen des älteren Holozäns übertragen werden; (iii) zwei markante, kurzfristige (azyklische),

Kältereignisse, bekannt als Präboreale Oszillation und 8.200er Kälte-Event; sowie (iv) einen langfristigen Wechsel von kontinentalen Klimaverhältnissen zu mediterranen, winterregen-beeinflussten Klimaten in den südlichen Alpen.

In der früh-Holozänen Warmphase dürften die Gletscher der Niederen Tauern, die sich in der ausklingenden Späteiszeit (Jüngere Dryas) gebildet haben, weitgehend abgeschmolzen sein. Während der folgenden kalten und niederschlagsreichen Klimaschwankungen des älteren Holozäns, die in den Hohen Tauern erneut zu Gletschervorstößen führten (Venediger, Frosnitz), dürften sich in Karen der Niederen Tauern, wie am Oberen Landschitzsee, ausdauernde Schneefelder gebildet haben. Schmelzwässer aus diesen Schneefeldern waren wahrscheinlich dafür verantwortlich, dass sich der See auch während dazwischenliegender Warmphasen nur mäßig erwärmte und damit nicht mit der Lufttemperatur im Gleichgewicht stand. Mit dem Verschwinden der Schneefelder zu Beginn des „Holozänen Klimaoptimums“ um ca. 7000 v. h. erwärmte sich der Obere Landschitzsee dagegen deutlich (Prinzip der ultra-sensitiven Seen). Dieser Abschnitt in der Entwicklungsgeschichte des Oberen Landschitzsees kann somit als Beispiel für sich neubildende Alpenseen im Zuge des Gletscherrückzuges unter der heutigen Klimaerwärmung dienen.

### *Dank*

Die Untersuchungen wurden durch Mittel des Österr. Wissenschaftsfonds (FWF, Projekt P14912-B06) und des IGBP-Global Change programme (IGBP-29/2003-2004) der Österr. Akademie der Wissenschaften und des Wissenschaftsministeriums gefördert. Wir danken weiters den in den einzelnen Publikationen benannten Personen.

### *Literatur:*

- Auer, I., R. Boehm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schoener, M. Ungersboeck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Mueller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majsstorovic, E. Nieplova, 2005: HISTALP Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region 2007, *International Journal of Climatology*, 17: 14-46
- Alley R.B., Watts W.A., McGee E., Huntley B. 2002. Holocene climate instability: a prominent, wide-spread event 8200 yrs ago. *Geology* 25: 483-486.



## Rekonstruktion von Klimaschwankungen: ein Sedimentkern aus dem Oberen Landschitzsee

- Aritztegui D., Asioli A., Low J.J., Trincardi F., Vigliotti L., Tamburini F., Chondrogianni C., Accorsi C.A., Bandini Mazzanti M., Mercuri A.M., de Kaars S., McKenzie J.A., Oldfield F. 2000. Palaeoclimate and the formation of sapropel S1: inferences from Late Quaternary lacustrine and marine sequences in the central Mediterranean region. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 158: 215-240.
- Beniston M., Diaz H.F., Bradley R.S. 1997. Climatic change at high elevation sites: An overview. In: Diaz H.F., Beniston M., Bradley R.S. (Eds.), *Climatic Change at high elevation sites*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1-16.
- Birks H.J.B. 1998. Numerical tools in palaeolimnology – Progress, potentialities, and problems. *J. Paleolimnol.* 20: 307-332.
- Björck S., Rundgren M., Ingolfsson O., Funder S. 1997. The Preboreal oscillation around the Nordic Seas: terrestrial and lacustrine responses. *J. Quat. Sci.* 12: 455-465.
- Bortenschlager S. 1970. Waldgrenz- und Klimaschwankungen im pollenanalytischen Bild des Gurgler Rotmooses. *Mitt. Ostalp.-dinar. Ges. Vegetationskde.* 11: 19-26.
- Bortenschlager S., Oeggel K. 2000. The man in the ice. IV the iceman and his natural environment. Springer Humanbiology, Vienna, Austria, pp 164.
- Correggiari A., Roveri M., Trincardi F. 1996. Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic Sea. *Il Quaternario* 9: 697-704.
- Drescher-Schneider R., Beaulieu J.-L., Magny M., Walter-Simonnet A.-V., Bossuet G., Millet L., Brugiapaglia E., Drescher A. 2006. Vegetation history, climate and human impact over the last 15,000 years at Lago dell'Accesa (Tuscany, Central Italy). *Veget. Hist. Archaeobot.* 16: 279-299.
- Fritz A., Ueick F.H. 2001. Klimageschichte der Hohen Tauern. Spätwürmzeitliche und postglaziale Klima- und Vegetationsentwicklung in den südlichen Hohen Tauern (Ostalpen, Kärnten). Nationalpark Hohe Tauern, Sonderband 3, Kärntner Nationalparkfonds, pp 99.
- Gams H. 1962. Das Gurgler Rotmoos und seine Stellung innerhalb der Gebirgsmoore. *Veröff. Geobot. Inst. Rübel, Zürich* 37: 74-82.
- Hormes A., Müller B.U., Schlüchter C. 2001. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *Holocene* 11: 255-265.
- Jahns S. 1991. Untersuchungen über die Vegetationsgeschichte von Süddalmatien und Südgriechenland. Diss. Cuvilier Verlag, Georg-August-Univ. Göttingen, ISBN 3-928815-06-7, pp 144.
- Jalut G., Esteban Amat A., Bonnet L., Gauquelin T., Fontugne M. 2000. Holocene climatic changes in the western Mediterranean from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 160: 255-290.
- Joerin U.E., Nicolussi K., Fischer A., Stocker T.F., Schlüchter C. 2007. Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierwa Glacier, Eastern Swiss Alps. *Quat. Sci. Rev.*, in press.
- Kallel N., Paterne M., Duplessy J.C., Vergnaud-Grazzini C., Pujol C., Labeyrie L., Arnold M., Fontugne M., Pierre C. 1996. Enhanced rainfall in the Mediterranean region during the last sapropel event. *Ocean. Acta* 20: 697-712.
- Magny M. 2004. Holocene climate variability as reflected by Mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on pre-historic human settlements. *Quat. Int.* 113: 65-79.
- Nicolussi K., Patzelt G. 2000. Untersuchungen zur Holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 36: 1-87.

- Nicolussi K., Kaufmann F., Patzelt G., van der Plicht J., Thurner A. 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Veget. Hist. Archaeobot.* 14: 221-234.
- Patzelt G., Bortenschlager S. 1973. Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). *Z. Gletscherkde. Glazialmorphol. N.F. Suppl.* 16: 25-72.
- Pla S., Catalan J. 2005. Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. *Clim. Dynam.* 24: 263-278.
- Psenner R., Lackner R. 2006. Die Alpen im Jahr 2020. alpine space – man & environment, Innsbruck University Press, 121 pp.
- Schmidt R., Müller J., Drescher-Schneider R., Krisai R., Szeroczynska K., Baric A. 2000. Changes in lake level and trophy at Lake Vrana, a large karstic lake on the Island of Cres (Croatia), with respect to palaeoclimate and anthropogenic impacts during the last approx. 16,000 years. *J. Limnol.* 59: 113-130.
- Schmidt R., Kamenik C., Kaiblinger C., Hetzel M. 2004a. **Tracking Holocene environmental changes** in an alpine lake sediment core: application of regional diatom calibration, geochemistry, and pollen. *J. Paleolimnol.* 32: 177-196.
- Schmidt R., Kamenik C., Lange-Bertalot H., Klee R. 2004b. *Fragilaria* and *Staurosira* (Bacillariophyceae) from sediment surfaces of 40 lakes in the Austrian Alps in relation to environmental variables, and their potential for palaeoclimatology. *J. Limnol.* 63: 171-189.
- Schmidt R., Kamenik C., Tessadri R., Koinig K.A. 2006. **Climatic changes from 12,000 to 4,000 years ago** in the Austrian Central Alps tracked by sedimentological and biological proxies of a lake sediment core. *J. Paleolimnol.* 35: 491-505.
- Schmidt R., Kamenik C., Roth M. 2007. **Siliceous algae-based seasonal temperature inference and indicator pollen tracking ca. 4,000 years of climate/land use dependency** in the southern Austrian Alps. *J. Paleolimnol.* 38: 541-554.
- Schmidt R., Koinig K.A., Thompson R., Kamenik C. 2002. A multi proxy core study of the last 7000 years of climate and alpine land-use impacts on an Austrian mountain lake (Unterer Landschitzsee, Niedere Tauern). *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 187: 101-120.
- Sommaruga-Wögrath S., Koinig K.A., Schmidt R., Sommaruga R., Tessadri R., Psenner R. 1997. Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* 387: 64-70.
- Tinner W., Theurillat J.P. 2003. Uppermost limit, extent, and fluctuations of the timberline and tree-line ecotone in the Swiss Central Alps during the past 11500 Years. *Arch. Alp. Res.* 35: 158-169.
- Thompson R., Kamenik C., Schmidt R. 2005. Ultra-sensitive Alpine lakes and climate change. *J. Limnol.* 64: 139-152.
- von Grafenstein U. 1998. The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. *Clim. Dynam.* 14: 73-81.
- Wunsam S., Schmidt R., Müller J. 1999. Holocene lake development of two Dalmatian lagoons (Malo and Veliko Jezero, Isle of Mljet) in respect to changes in Adriatic sea level and climate. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 146: 251-281.