

Klimaforschung am Lullaillaco (Nordchile) : zwischen Pollenkörnern und globaler Zirkulation

Autor(en): **Grosjean, Martin / Ammann, Caspar / Egli, Willi**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern**

Band (Jahr): **59 (1996)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-960432>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Klimaforschung am Lullaillaco (Nordchile) – zwischen Pollenkörnern und globaler Zirkulation

Martin Grosjean, Caspar Ammann, Willi Egli, Mebus A. Geyh, Bettina Jenny,
Klaus Kammer, Christoph Kull, Ulrich Schotterer und Mathias Vuille

Zusammenfassung

Das Konzept der *thermal readiness* (MESSERLI, 1973) besagt, dass eine Zunahme der Niederschläge zur Erklärung eiszeitlicher Vergletscherungen in ariden Hochgebirgen zwingend notwendig ist. Eine Temperaturdepression alleine genügt dazu nicht. Dieses Konzept soll in den ariden Anden Nordchiles getestet werden.

Klimageschichtliche Indikatoren in Seesedimenten, Pollenspectra in Mooren, glaziale Formen, fossile Böden und Grundwässer zeigen, dass die Jahresniederschläge im Altiplano der Atacamawüste während des Spätglazials auf >500 mm (heute <200 mm) zugenommen haben, und dass das Klima während mehr als 1000 Jahren bezüglich Feuchte relativ stabil war. Die Feuchtphase dauerte bis ins Frühholozän und ist am besten mit einer Verstärkung der tropischen Sommerniederschläge in Verbindung zu bringen.

Obschon bisher keine direkte Datierung gelungen ist, folgern die Autoren aus ihren Untersuchungen, dass die maximalen Gletschervorstösse in den ariden Anden Nordchiles nicht zeitgleich zum globalen Vereisungsmaximum (Kaltzeitmaximum LGM) stattfanden, sondern dem feuchten Spätglazial zuzuordnen sind. Das Klima während des LGM war in den randtropischen Anden für Gletscher zu trocken.

Im Hinblick auf das Verständnis der globalen Klimadynamik im Jungquartär sind Hinweise auf Feuchteschwankungen in den tropisch-randtropischen Gebieten eine wichtige Ergänzung zu den Resultaten aus den meist temperatursensitiven Archiven der mittleren und hohen Breiten.

Am Anfang war die *thermal readiness*

«Gäbe es wohl Gletscher im extremen Trockengürtel der Sahara, wenn die Gebirge hoch genug und die Temperaturen entsprechend tief genug wären?» Zu dieser Frage wurde Bruno MESSERLI während seinen Tibesti-Arbeiten um 1970 inspiriert. Leider ist der Emi Koussi, mit 3415 m der höchste Berg der Sahara, zu wenig hoch, um diese Frage zu beantworten. Aus seinen klimaökologischen Arbeiten in den ariden Hochgebirgen Afrikas schloss Bruno MESSERLI aber, dass es in extrem trockenen Gebieten theoretisch eine Höhenstufe geben muss, in der aus Mangel an Feuchtigkeit trotz kontinuierlichem Permafrost keine Gletscher vorhanden sind. Der Begriff der *thermal readiness* oder der *thermischen Bereitschaft* für (nicht existierende) Glet-

scher war geboren (MESSERLI, 1973). Daraus leitete er Folgerungen ab, die bis heute seine Forschung prägen:

Hochgebirge in Trockenräumen sind äusserst sensible Zeiger für Klimaänderungen, weil sie bereits auf geringste Schwankungen im Feuchtehaushalt mit einem veränderten (geomorphologischen) Formenschatz reagieren. Die dramatischen Feuchteschwankungen in tropisch-subtropischen Gebieten während des Jungquartärs sind von zentraler Bedeutung, denn sie modifizieren das Bild des «stabilen» Klimas im Holozän – ein Bild, das hauptsächlich durch die Analyse der temperatursensitiven Archive der mittleren und hohen Breiten entstanden ist (BLUNIER et al., 1995). Ausserdem liegen derartige Gebirge, wie beispielsweise die Anden der Atacamawüste,

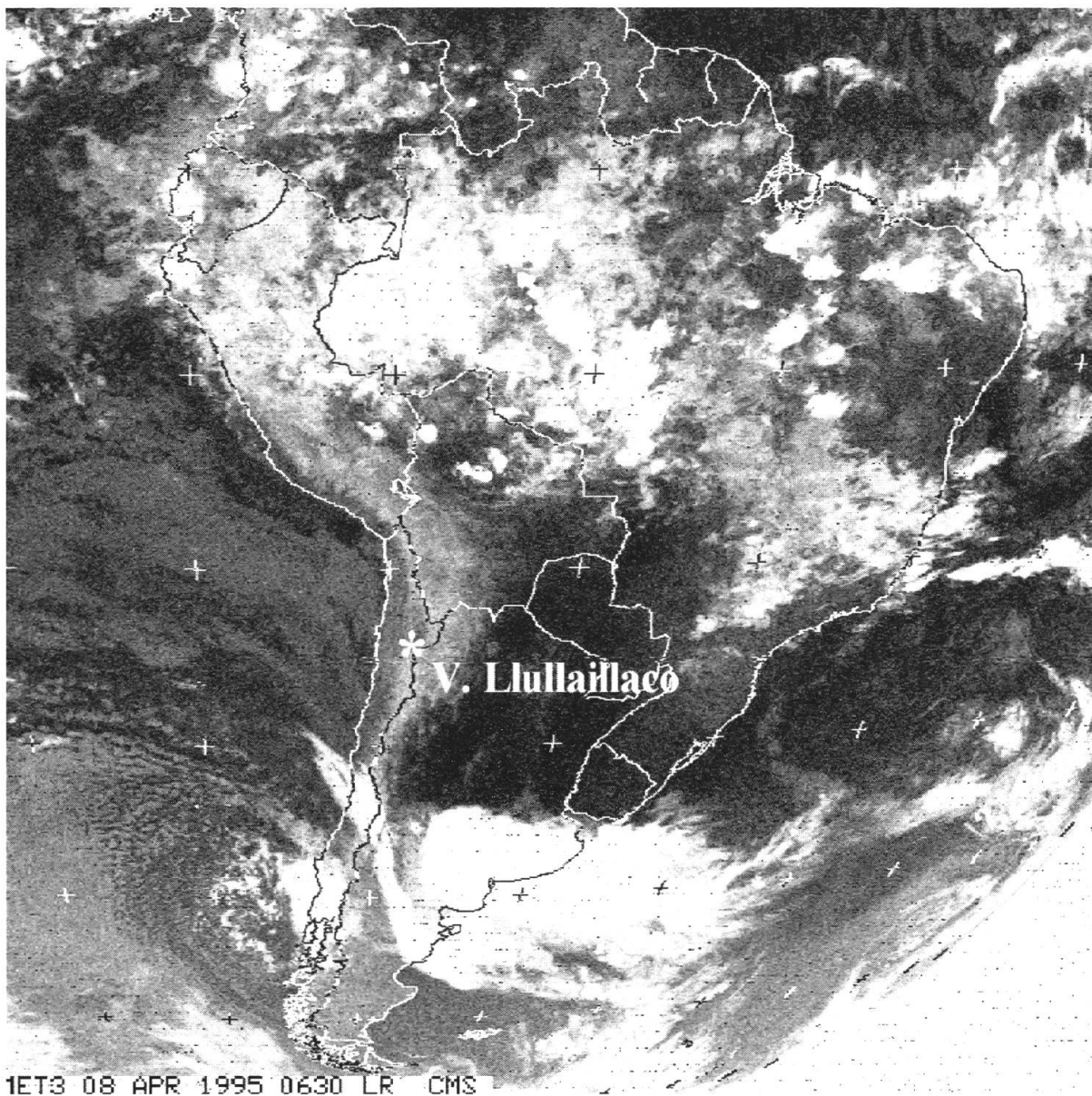


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes und des Vulkans Lullailaco (Meteosat-Aufnahme vom 8. April 1995), eingebettet zwischen der tropischen und aussertropischen Zirkulation. Die aride Trockendiagonale Südamerikas quert in diesem Bereich die Anden.



Abb. 2: NW-Flanke des Vulkans Llullaillaco. Trotz einer Höhe von 6739 m trägt dieser Vulkan keine Gletscher, sondern nur das hier sichtbare Firnfeld.

mitten im Überlappungsbereich der Gürtel mit tropischen Sommer- und ausertropischen Winterniederschlägen (Abb. 1). Sie müssen also auf Veränderungen der Lage und/oder Intensität beider Niederschlagsregimes reagiert haben. So lassen sich Informationen über das Klima und letztlich auch über die atmosphärische Zirkulation gewinnen.

Der Vulkan Llullaillaco liegt in der Atacama-Wüste in den Anden Nordchiles. Er ist mit einer Höhe von 6739 m einer der ganz wenigen Berge der Welt, die alle Anforderungen zum Testen der Frage nach der *thermal readiness* erfüllen (Abb. 1 und 2). Als wir am 21. November 1988 im Firnfeld auf 6100 m Höhe unser Zelt aufschlugen, gedachten wir bei einem Linsengericht aus zwei Porzellantellern den «20 Jahren *thermal readiness*». Das von LLIBOUTRY (1956) beschriebene «Eisfeld» existiert tatsächlich als Firnfeld, allerdings nur in einer ausgesprochenen Akkumulationslage zwischen 5900 und 6300 m. Das übrige Gebiet im kontinuierlichen Permafrost oberhalb 5600 m ist frei von Gletschern und gibt somit Einblick in die rezente Höhenstufe mit thermaler Bereitschaft für Gletscher. Das Konzept der *thermal readiness* in Hochgebirgen der ariden Zone ist bestätigt.

Spuren früherer Vergletscherungen ziehen am Llullaillaco aber – unabhängig der Exposition – bis mindestens 4900 m hinunter. An diesem Beispiel lassen sich die weitreichenden Folgen des Konzeptes der *thermal readiness* zeigen. Eine Temperaturabsenkung allein reicht nicht aus, um Gletscher in ariden Gebieten entstehen

und vorstossen zu lassen. Erforderlich ist eine signifikante Niederschlagszunahme. Im Gegensatz zu den Gletschern der mittleren und hohen Breiten waren also die ehemaligen Gletscher in der Atacama primär Feuchtezeiger und nicht Temperaturindikatoren.

Entgegen früherer Resultate (CLIMAP, 1976) zeigen neuere Ergebnisse aus dem tropischen Südamerika deutlich, dass während des letzten Kaltzeitmaximums (LGM) sowohl die Anden (SELTZER et al., 1995), als auch die Tiefländer (STUTE et al., 1995) eine Temperaturabsenkung im Bereich von 5–6 °C erfahren haben. Gleichzeitig sind jedoch im tropischen Südamerika während des LGM wesentlich trockenere Bedingungen relativ gut belegt (LEDRU, 1993; MARKGRAF, 1993). Nach dem Konzept der *thermal readiness* ist aber ein derartig trocken-kaltes Klima im Einflussbereich der Tropen für eine Vergletscherung am Lullaillaco ungeeignet, weil die notwendige Feuchtezufuhr zur Bildung von Eismassen fehlt.

Daraus folgt, dass die maximale Vereisung in den subtropischen Anden nicht zeitgleich mit dem globalen Vereisungsmaximum (in den mittleren und hohen Breiten) sein kann, sondern dass die Vergletscherung der trockenen Anden eher mit einer spätglazialen Feuchtphase und wahrscheinlichen Vorstössen der tropischen Niederschläge in Verbindung zu bringen ist.

Mit den Konzept der *thermal readiness* spitzt sich das Problem schliesslich auf die Frage nach Zeitpunkt und -spanne der Feuchtphasen in der Wüste Atacama zu, die den notwendigen klimatischen Rahmen für eine Vergletscherung am Lullaillaco geben können. Welches waren mögliche zirkulationsbedingte Ursachen in der Atmosphäre?

Wir werden in der Folge einige methodische Besonderheiten skizzieren, die sich uns bei den klimageschichtlichen Arbeiten in der Hochgebirgswüste der Atacama stellen. Später wollen wir ein paar ausgewählte Resultate diskutieren und schliesslich zeigen, welchen Beitrag wir zu einigen grundsätzlichen Fragen der Klimaforschung leisten können.

Die Rekonstruktion des Klimas im Trockengürtel

Die Rekonstruktion von Klima- und Umweltbedingungen in ariden Gebieten ist in zweierlei Hinsicht eine Herausforderung:

Zum einen ist das Wüstenklima ein Klima der Extreme, ein Klima der Singularitäten. Hier reagieren die verschiedenen Archive (Wasserhaushalt, Vegetation, Seesedimente, geomorphologische Formen, usw.) mit ihren Indikatoren äusserst verschieden auf ein und dasselbe klimatische Extremereignis: Alluviale Fächer sind Zeugen kurzlebiger Ereignisse mit extrem starken Niederschlägen, während beispielsweise die Entwicklung eines Bodens auf dieselben Ereignisse kaum reagiert und eher das durchschnittliche Klimageschehen widerspiegelt. Falls wir also das frühere Klima in seiner vielfältigen Natur besser erfassen wollen, müssen wir möglichst verschiedene Archive mit einer grossen Zahl von Indikatoren mit unterschiedlichen Sensitivitäten untersuchen. Ein interdisziplinärer Forschungsansatz mit Spezialisten ist für jedes Archiv eine unabdingbare Voraussetzung.

Die andere Herausforderung der klimageschichtlichen Arbeit in Wüstengebieten liegt in der Natur der Archive selbst. Gerade weil diese derart sensibel auf Verän-

derungen der Umwelt reagieren, sind sie, zeitlich begrenzt, jeweils nur während bestimmten Klimaphasen vorhanden. So wurden beispielsweise in den Anden Nordchiles viele spätglaziale Seesedimente während der vollariden Klimaphase im Mittelholozän durch Winderosion zerstört. Wir haben bisher kein einziges Archiv gefunden, das lückenlos die Zeitspanne von der Gegenwart bis ins letzte Hochglazial LGM abdeckt.

Auch daraus ergibt sich die Notwendigkeit der interdisziplinären Arbeit, weil die klimageschichtliche Rekonstruktion zu einem sehr komplexen Zusammenspiel wird. Die Mosaiksteine sind dabei unterschiedlichster Art: Sie umfassen Punkt- und Flächenquellen, verschiedenes Material (von Pollenkörnern bis zu Moränen von mehreren Kilometern Länge), unterschiedliche Untersuchungsmethoden sowie unterschiedliche zeitliche Dimensionen. Dabei reicht die Skala von Ereignissen, die in Stunden ablaufen (Schlammströme während extremer Niederschlagsereignisse), über saisonale Ereignisse (jahreszeitlich laminierte Seesedimente) bis zu den konservativen Archiven mit einer Reaktionszeit von 10^2 bis 10^3 Jahren wie den Böden. Hochauflösende Baumring- und Eisarchive sind im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden. Ausserdem stellt sich beim Zusammensetzen dieser Mosaiksteine das Problem der zeitlichen Zuordnung, der Datierung von Proben aus dem Jungquartär (GROSJEAN et al., 1995). Geeignetes Material, insbesondere terrestrische organische Makroreste für die Radiokarbon-Methode, ist oft nicht vorhanden.

So ziehen sich zwei geographische Grundprobleme wie rote Fäden auch durch unsere Arbeiten in der Atacama. Beide tragen die Handschrift von Bruno MESSERLI: Die gelebte Interdisziplinarität der Forschergruppe als unabdingbare Voraussetzung sowie das Skalenproblem. Wie können Einzelbefunde aus einer Punktquelle auf eine Fläche und eine Region übertragen werden? Gelten Prozesse, die im Kleinen beobachtet werden, auch im grossen Massstab?

Die spätglaziale Feuchtphase

Mit Beispielen zur spätglazialen Feuchtphase wollen wir nun zeigen, wie diese Mosaiksteinchen zu einem vielseitigen Bild des Klimas in der Atacama zusammengesetzt werden können, um daraus mögliche Antworten zur Vergletscherung am Llullaillaco zu finden.

Die deutlichsten, datierbaren Spuren einer signifikanten Feuchtphase zwischen zirka 14000–8500 yr B.P. lassen sich in den Becken von späteiszeitlichen Seen im Altiplano finden. Unter dem heutigen Klima mit Niederschlägen unter 200 mm/Jahr sind die meisten Becken ausgetrocknet. Oftmals befinden sich kleine, saisonale bis mehrjährige Wasserkörper in Salzpflanzen (Salare). Die wenigen offenen Seen sind stark salzhaltig ($> 6.4 - 50 \text{ mS cm}^{-1}$). Bisher konnten wir in 15 geschlossenen Becken fossile Seen mit 25 bis 70 m höheren Wasserständen als heute nachweisen (Abb. 3). Die Seeflächen waren um den Faktor 6 – >10 grösser als heute.

Mit einem einfachen Wasser- und Energiehaushaltsmodell (GROSJEAN, 1994) konnten wir zeigen, dass ein Klima mit 500 mm Jahresniederschlag und entsprechend stärkerer Bewölkung ein mögliches Szenario ist, um Seen dieser Grösse über längere Zeit zu erhalten. In der Laguna Lejía konnten für die Zeit des Seehochstandes



Abb. 3: Strandlinien am Salar Carcote, Nordchile, zeigen die höheren Seespiegel während des Spätglazials.

saisonal laminierte Sedimente nachgewiesen werden. Dabei wurden im Sommerhalbjahr im See Kalzit und manchmal Gips abgelagert, während im Herbst und Winter die Algenpopulationen im See starben und feine Depositionen bildeten. Sie zeigen, dass der Seespiegel während mindestens 1000 Jahren auf dem hohen Niveau lag (Abb. 4). Damit ist eine Abfolge von kurzfristigen Niederschlagsereignissen oder das Abschmelzen der Gletscher als Ursache weitgehend ausgeschlossen. Wir folgern daraus, dass im Zuge einer generellen Klimaänderung eine nachhaltige Steigerung der Niederschlagsrate eingetreten ist.

In diesem Sedimentarchiv mit saisonaler Auflösung finden sich weitere Hinweise zum Klima: Spuren von Mg, Ba und Sr in Kalzitkristallen und in Schalen von Kleinkrebsen (Ostracoden) ermöglichen die Rekonstruktion der Salinität im See zur Zeit der Kristallbildung (CHIVAS et al., 1993). Mit dieser Methode wurden Kalzitkristalle in einzelnen Sommerschichten der spätglazialen Sedimente in der Laguna Lejía untersucht (GROSJEAN et al., 1995). Die Resultate zeigen, dass die hydrochemischen Verhältnisse im See über die Zeiträume von Dekaden bis Jahrhunderten sehr stabil waren. Dies wiederum lässt auf ein relativ ausgeglichenes Klima und regelmässige Niederschläge schliessen.

Wir müssen allerdings berücksichtigen, dass der nun grössere See weniger sensitiv auf kleine Klimaschwankungen reagiert als in Zeiten des Tiefstandes. Die Entwicklung des Salzgehaltes in der Laguna Lejía liess sich auch mit der Artenzusammensetzung von Diatomeen bestätigen. Kurz nach dem Seespiegelanstieg dominierten frischwasserliebende Arten. Dies wiederum zeigt, dass der Anstieg relativ rasch erfolgt sein muss, und letztlich die Erhöhung der Niederschlagsrate mit einer raschen Klimaänderung verbunden war. Salzwasserliebende Arten nehmen später als Folge der starken Evaporation langsam aber stetig wieder zu.

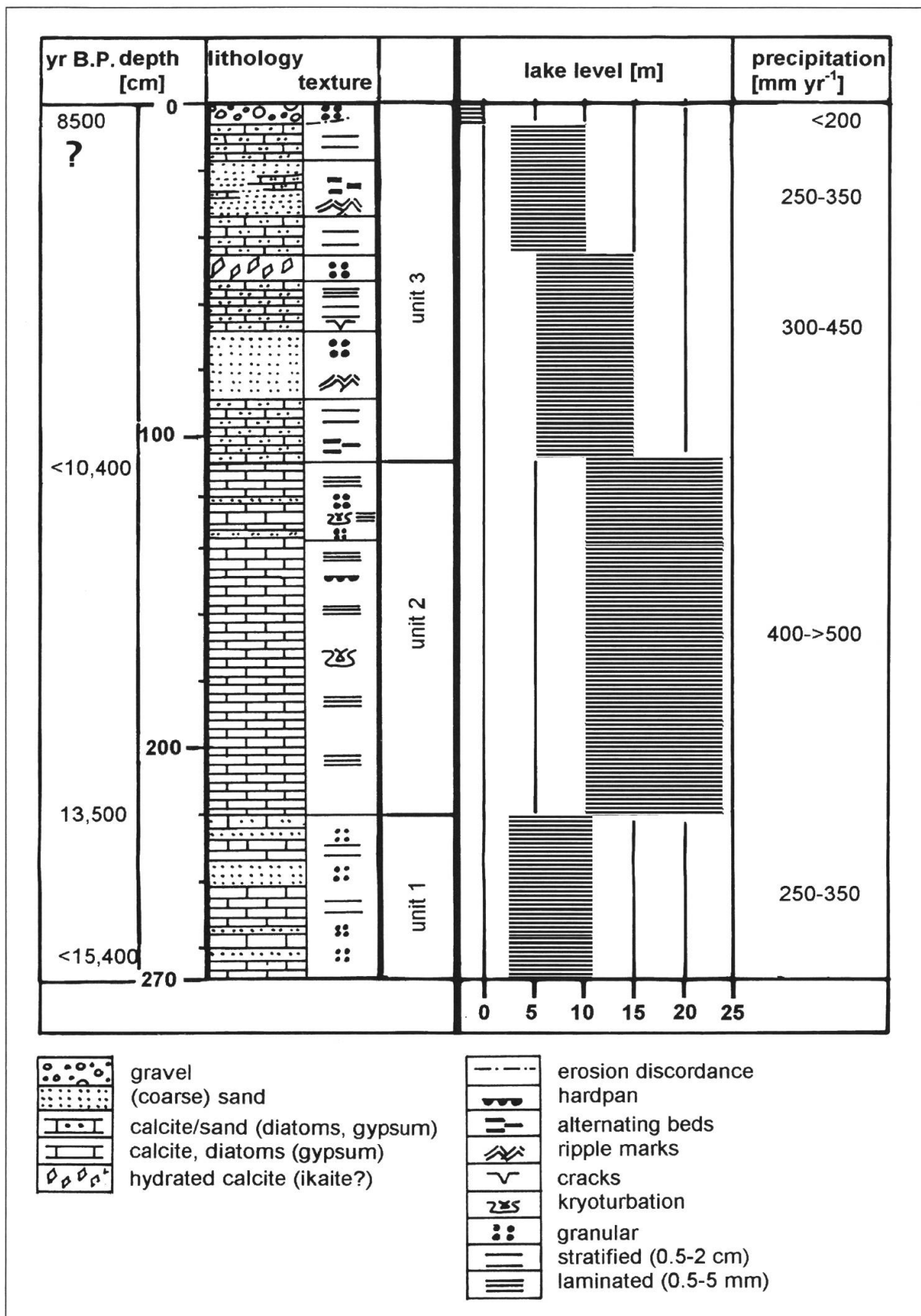


Abb. 4: Sedimentprofil der Laguna Lejía (Südufer) mit zugehörigen Seespiegelniveaus und Niederschlagsmengen. Zwischen 10000 B.P. und 13500 B.P. traten mind. 25 m höhere Seespiegelstände und doppelt so hohe Niederschlagsmengen auf.

In den spätglazialen Seesedimenten befindet sich ausserdem ferntransportierter Pollen von *alnus* und *podocarpus*, beides Zeiger für Winde aus dem feuchteren Ostabhang der Anden. An diesem Befund lässt sich aber auch die Problematik zeigen, dass wir nicht unterscheiden können, ob es sich dabei um ein generelles Zirkulationsmuster mit Ostströmungen oder allenfalls um ein sehr seltenes klimatisches Einzelereignis handelt.

Während der spätglazialen Feuchtphase lassen sich auch tiefgreifende Veränderungen im Wasserhaushalt, insbesondere in der Grundwasserbildung, feststellen. Unter dem heutigen, extrem trockenen Klima sind im Grundwasser nur geringe Spuren von modernem Wasser vorhanden, und es kann kaum eine Erneuerung der Grundwasserspeicher beobachtet werden. Als «modern» bezeichnen wir – im Zusammenhang mit der Altersbestimmung durch Tritium – Wasser, das vor weniger als 40 Jahren als Niederschlag fiel. Die Nachweisgrenze für den Anteil von modernem Wasser liegt im Grundwasser des Altiplano bei etwa 15%. Es finden sich zahlreiche Indizien, wonach ein beträchtlicher Teil fossiles Wasser im System vorhanden ist und mit früheren feuchteren Klimabedingungen in Verbindung gebracht werden kann (GROSJEAN et al., 1995). ARAVENA (1995) und FRITZ et al. (1979) haben gleiche Schlüsse aus ihren Untersuchungen in den tiefer gelegenen Becken des Salar de Atacama, des Rio Loa und der Pampa de Tamarugal gezogen. Klimatisch sind die Phasen der Grundwasserbildung insofern interessant, als sie sowohl mit dem feuchten Spätglazial mit 500 mm Jahresniederschlag als auch mit extrem starken, kurzzeitigen Niederschlagsereignissen während dem trockenen Mittelholozän (<< 150 mm/Jahr) in Verbindung gebracht werden können.

Seesedimente im Altiplano und ein detailliertes Archiv von Schlammströmen in der Schlucht von Puripica zeigen deutlich, wie die gegenüber heute noch wesentlich trockeneren Klimabedingungen zwischen 6000 und 3000 yr B.P. durch sehr seltene (ein Ereignis in 100–1000 Jahren), aber heftige Niederschlagsereignisse mit grossen Überschwemmungen unterbrochen wurden (GROSJEAN et al., in Vorb.). Vor dem Hintergrund dieser klimatischen Singularitäten ist es daher nicht unbedingt ein Widerspruch, wenn ARAVENA (1995) eine holozäne Grundwasserbildung in den tiefer gelegenen Becken der Atacama zu einer Zeit mit generell noch trockeneren Klimabedingungen als heute postuliert. Ausserdem streichen wir auch hier hervor, dass heftige klimatische Einzelereignisse durchaus die langjährige Mittelwertsklimatologie überprägen können.

Nach dem heutigen Kenntnisstand erstreckt sich die spätglaziale Feuchtphase mit mengenmässig ähnlichen Niederschlagszunahmen synchron über den ganzen Altiplano vom Titicacasee bis gegen 24°S (HASTENRATH & KUTZBACH, 1985; MARTIN et al., 1993; KESSLER, 1991; GROSJEAN, 1994). Auch der Salar Punta Negra am Fusse des Lullailaco zeigt deutliche Spuren verstärkter Feuchte mit höherem Abfluss aus den hohen Anden am Ende des Pleistozäns bis ins Holozän (zirka 11 000–9000 yr B.P.). Das Feuchtesignal wird gegen Süden zunehmend schwächer, lässt sich aber bis mindestens 25°30'S verfolgen (MESSERLI et al., in Vorb.). Der Vergleich mit heutigen Niederschlagsmustern zeigt, dass eine Intensivierung der tropischen Sommerniederschläge am besten mit den Paläodaten übereinstimmt (MESSERLI et al., in Vorb.).

Was bedeutet nun die spätglaziale Feuchtphase für die eiszeitlichen Gletscher auf dem Altiplano? Nach der klassischen Auffassung erfolgte während des Hochglazials

eine globale Senkung der Schneegrenze um ungefähr 900 m (Abb. 5). Dieses paläoklimatische *Credo* trägt aber zumindest zwei Problemen nicht genügend Rechnung. Beide liegen in der *thermal readiness* begründet: Erstens ist die moderne Schneegrenze im Gebiet des Lullaiacco nicht existent, und zweitens ist die Annahme der Gleichzeitigkeit der maximalen Gletschervorstösse auf dem ganzen Pol-Äquator-Pol Transekt nicht haltbar. Die Hauptvorstösse fanden in Südchile während der maximalen globalen Abkühlung *und* während des Spätglazials statt. In Nordchile, Süd-bolivien und Südperu war das LGM trotz einer Temperaturdepression jedoch zu trocken, um die maximale Ausdehnung der Gletscher zu provozieren. Im Gegenteil, die Gletscherstände im Altiplano besaßen im Spätglazial eine grössere Ausdehnung als im LGM und korrelieren eindeutig mit den Seehochständen der Tau-caphase in Bolivien (SELTZER et al., 1995; CLAPPERTON, pers. Mitteilung 1995).

Vergletscherungsspuren am Lullaiacco und an benachbarten Gebirgen lassen sich morphologisch mit den spätglazialen Ständen in Südbolivien korrelieren. Obschon bisher keine direkte Datierung der Moränen am Lullaiacco gelang, schliessen wir auf Grund

1. des Prinzips der *thermal readiness*,
 2. der Gleichzeitigkeit der Gletschervorstösse und der hohen Seespiegel in Bolivien, und
 3. der Evidenz der spätglazialen Feuchtphase am Fusse des Lullaiacco (Salar Punta Negra),
- dass die Ausdehnung der Vergletscherung am Lullaiacco im Spätglazial grösser als im LGM war.

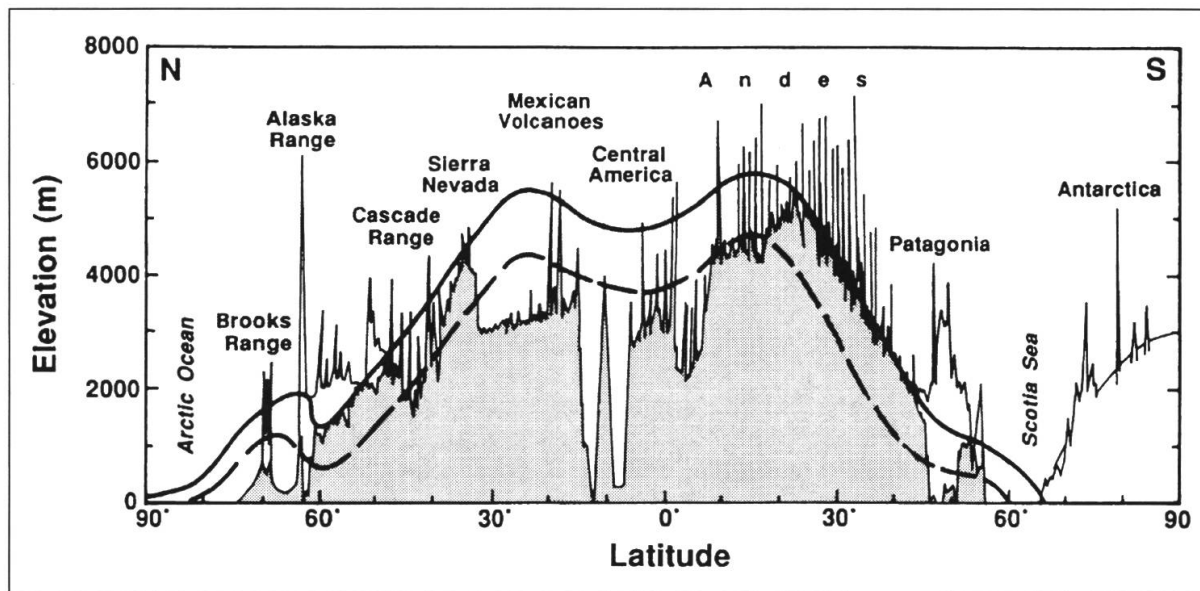


Abb. 5: Nord-Süd-Transekt entlang der nord- und südamerikanischen Kordillere. Die durchschnittliche Höhe der heutigen Schneelinie ist durch die dicke, durchgezogene Linie dargestellt. Die Schneelinie des LGM entspricht der gestrichelten Linie. Sie liegt um zirka 900 m unterhalb der heutigen Schneelinie, was für die Verhältnisse im Untersuchungsraum aber nicht zutrifft, denn hier erreichten die Gletscher erst im Spätglazial die entsprechende Ausdehnung. (Aus: Broecker, W. S. & Denton, G. H., 1989)

Schlussfolgerungen

Erst eine Betrachtung verschiedener räumlicher und zeitlicher Dimensionen in Archiven unterschiedlicher Sensitivität erlaubt die Charakterisierung des Klimas in der Vergangenheit. Mit der Vielfalt der Klimaarchive in verschiedenen Höhenstufen und Klimazonen bieten die Hochgebirgszüge der tropisch-subtropischen Anden die einzigartige Möglichkeit, klimatische Singularitäten, Kurzzeitereignisse sowie mittel- und langfristige Klimaänderungen zu erfassen. Trotz aller methodischer Schwierigkeiten sind terrestrische Ökosysteme doch eine wichtige Ergänzung zu Klimaarchiven wie marinen Sedimenten und polaren Eiskernen. Diese standen in den letzten Dekaden im Vordergrund, umfassen aber «nur» eine bestimmte Klimazone oder integrieren grosse räumliche und zeitliche Dimensionen.

Mit dem Konzept der *thermal readiness* lässt sich am Beispiel der ariden Anden zeigen, dass selbst globale Klimasignale wie die Temperaturdepression während des LGM regional unterschiedliche Auswirkungen haben. Qualitative Änderungen in Klimaarchiven, wie beispielsweise Gletschervorstösse, sind Ausdruck einer komplexen Wechselwirkung verschiedener Klimatelemente, die ihrerseits je nach Klimazone unterschiedliche Sensitivitäten besitzen. Die Gletscher im randtropischen Altiplano reagierten vor allem auf Feuchte und nicht auf Temperaturen allein. Die Niederschlagsänderungen im Altiplano betragen seit dem Spätglazial mindestens den Faktor 2,5. Die Gletscher erreichten folglich im regional feuchteren Spätglazial eine grössere Ausdehnung als zur Zeit der maximalen globalen Temperaturdepression im LGM.

Die Konsequenzen dieser Überlegungen sind weitreichend: Gewisse Klimasignale sind wohl global, werden aber entweder durch die Ozean-Atmosphärenzirkulation regional anders übersetzt, oder die Klimaarchive besitzen regional verschiedene Sensitivitäten und provozieren somit hemisphärisch oder zonal unterschiedliche Auswirkungen. Wir folgern daraus, dass die Klimaarchive in den Tropen einen zentralen Beitrag zum Verständnis des globalen Klimas im jüngsten Quartär leisten. Sie sind eine unabdingbare Ergänzung zu den Archiven der mittleren und hohen Breiten.

Literatur

- ARAVENA, R., 1995: Isotope hydrology and geochemistry of Northern Chile groundwaters. Seminario Internacional, La Paz, Junio 1995. Aguas, glaciares y cambios climaticos en los Andes tropicales, Orstom, Umsa, Senamhi, Conaphi: 109–119.
- BLUNIER, T., CHAPPELLAZ, J., SCHWANDER, J., STAUFFER, B., RAYNAUD, D., 1995: Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene epoch. *Nature*, Vol. 374: 46–49.
- BROECKER, W. S. & DENTON, G. H., 1989: The role of ocean-atmosphere reorganization in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53: 2465–2501.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P., CALI, J., CHAPMAN, A., KISS, E., SHELLY, J. M. G., 1993: Coupled stable isotope and trace element measurements of lacustrine carbonates as paleoclimatic indicators. In: Swart P. et al., (Eds.): *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophysical Monographs 78: 113–122.
- CLIMAP Project Members, 1976: The Surface of the Ice-Age Earth. *Science* 191: 1113–1137.
- FRITZ, P., SILVA, C.H., SUZUKI, O., SALATI, E., 1979: Isotope Hydrology in Northern Chile. *IAEA-SM-228/26*: 525–543.

- GROSJEAN, M., 1994: Paleohydrology of Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 109: 89–100.
- GROSJEAN, M., GEYH, M.A., MESSERLI, B., SCHOTTERER, U., 1995: Late-glacial and early Holocene lake sediments, groundwater formation and climate in the Atacama Altiplano 22–24°S. *Journal of Paleolimnology*, Vol. 14/3, 241–252.
- GROSJEAN, M., MESSERLI, B., AMMANN, C., GEYH, M.A., GRAF, K., JENNY, B., KAMMER, K., NUÑEZ, L., SCHOTTERER, U., SCHREIER, H., SCHWALB, A., VALERO-GARCES, B., VUILLE, M., in Vorb.: Holocene Environmental Changes in the Atacama Altiplano and Paleoclimatic Implications. *Bulletin de l' Institut Français des Etudes Andines*.
- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J.E., 1985: Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. *Quaternary Research*, 24: 99–108.
- KESSLER, A., 1991: Zur Klimaentwicklung auf dem Altiplano seit dem letzten Pluvial. *Freiburger Geographische Hefte*, Vol.32: 141–148.
- LEDRU, M.-P., 1993: Late Quaternary Environmental and Climatic Changes in Central Brazil. *Quaternary Research*, Vol.39: 90–98.
- LLIBOUTRY, L., 1956: Nieves y glaciares de Chile. *Fundamentos de Glaciología*. Universidad de Chile, 471S.
- MARKGRAF, V., 1993: Climate History of Central and South America since 18'000 yr. B.P.: Comparison of Pollen records and model simulations. In: Wright, H.E., Kutzbach, J.E., Webb, T., Ruddiman, W.F., Street-Perrott, F.A., Bartlein, P.J., 1993: *Global climates since the Last Glacial Maximum*. Univ. of Minnesota press, 357–385.
- MARTIN, L., FOURNIER, M., MOURGUIART, P., SIFEDDINE, A., TURCQ, B., ABSY, M.L., FLEXOR, J.-M., 1993: Southern Oscillation Signals in South American Paleoclimatic Data of the Last 7000 Years. *Quaternary Research*, Vol. 39: 338–346.
- MESSERLI, B., 1973: Problems of vertical and horizontal arrangement in the high mountains of the extreme arid zone (Central Sahara). *Arctic and Alpine Research*, Vol. 5(3): A139–A147.
- MESSERLI, B., AMMANN, C., GEYH, M.A., GROSJEAN, M., JENNY, B., KAMMER, K., VUILLE, M., in Vorb.: Current precipitation, late Pleistocene snow line, and lake level changes in the Atacama Altiplano (18°S – 28°30'S): the problem of the «Andean Dry Diagonal». *Bamberger Geographische Schriften*.
- SELTZER, G. O., RODBELL, D.T., ABBOTT M., 1995: Andean glacial lakes and climate variability since the last glacial. *Seminario Internacional, La Paz, Junio 1995. Aguas, glaciares y cambios climaticos en los Andes tropicales*, Orstom, Umsa, Senamhi, Conaphi: 133–134.
- STUTE, M., FORSTER, M., FRISCHKORN, H., SEREJO, A., CLARK, J.F., SCHLOSSER, P., BROECKER, W.S., BONANI, G., 1995: Cooling of Tropical Brazil (5°C) During the Last Glacial Maximum. *Science*, Vol. 269: 379–383.

Persönlich

Bruno, die Idee der thermal readiness hat 20 Jahre überdauert, ist aber moderner denn je, und die Konsequenzen zum Verständnis des globalen Klimas und seiner Dynamik sind weitreichend. Wir hoffen, dass diese Idee in Deinem wissenschaftlichen Gepäck auf der Reise ins PAGES Core Office ihren Platz findet. Die Autoren haben alle im Geographischen Institut Bern in Bruno Messerlis Projekt «Climate Change in the arid Andes» (NF 21-27 824.89 und 20-36382.92) gearbeitet. Wir haben uns von der Faszination des Vulkans Lhullaillaco und der Wüste anstecken lassen. Eine bedeutende Rolle spielt die Freundschaft zwischen Bruno und Willi Egli, die sich nach gemeinsamer Zeit im Gymnasium und an der Universität in Santiago de Chile wieder getroffen haben.

Adresse der Autoren: Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstr. 12, CH-3012 Bern

