

DIE VERÄNDERUNGEN VON KLIMA UND UMWELT IN DER REGION ATACAMA (NORDCHILE) SEIT DER LETZTEN KALTZEIT

Mit 11 Abbildungen und 3 Photos

BRUNO MESSERLI, MARTIN GROSJEAN, KURT GRAF, UELI SCHOTTERER,
HANS SCHREIER und MATHIAS VUILLE

Summary: Climate and environmental change in the Atacama region (northern Chile) since the Last Cold Maximum

The synergistic interaction between subsiding anticyclonic air masses, the drying effect of the cold Humboldt current, and the moisture blocking mountain chain generate extremely dry environmental conditions on the western slope of the Atacama Andes. Even the highest peaks (Volcan Llullaillaco 6739 m) in the continuous permafrost belt above 5600 m are currently free of glaciers. The vegetation between 3100 to 4800 m is too scarce to initiate any soil formation. The precipitation pattern in the Altiplano region can be investigated by monitoring the varying extent of the salar water bodies as seen from satellite data.

Terrestrial and limnic ecosystems show major changes since the Last Cold Maximum. Cold and dry conditions are followed by a distinct shift to cool and wet Late Glacial climate (about 400 mm/year) with extended lakes in the Altiplano. Warm and moist environments probably during the Pleistocene/Holocene transition and Early Holocene are indicated by palaeosoils, best developed near 4500 m a. s. l. The warm temperatures lasted during the Holocene, as shown by pollen, whereas present dry conditions were established after approximately 3000 B.P. The palaeoecological findings show that the tropical rainfall belt was reinforced during Late Glacial to Early Holocene from the Chungará-Sajama region (18° S) as far south as the Ojos del Salado (27° S). On the contrary, however, the westerlies were relatively stable. It seems that they had no strong influence in the past on the Ojos del Salado (27° S), not even during the Last Cold Maximum. But this clear separation in winter and summer precipitation becomes more and more critical. Too much precipitation is observed in the transitional seasons of spring and autumn. Collisions between drops of cold air from the westerlies and warm tropical humid air masses must be analysed more precisely in future research programmes.

Human activity, appearing for the first time around 10800 B.P., was always closely related to the environmental conditions, as shown in various archaeological sites. The new findings in the Río Purifica (5880 B.P.) show that the hypothesis of the "silencio arqueológico" has to be revised. The Atacama region, one of the most arid areas, shows an increasing conflict between a rapidly growing economic activity with expanding urbanization and the sensitive base of natural resources. Also a desert can be exposed to pollution and the groundwater recharge and the water storage capacity are still unknown. The past climatic conditions could be the key to understand the present day limited water resources.

1 Einleitung

Das „International Geosphere-Biosphere Programme“ hat 1990 sein erstes regionales Treffen in Südamerika abgehalten und 1991 darüber – frei übersetzt – folgende Leitideen publiziert (IGBP 1991): „Alle Fragen der Klimaveränderungen und der Modellierung sind auf bessere Kenntnisse der Vergangenheit angewiesen. Die ungenügende Auflösung der heute verfügbaren Modelle für Südamerika geht auf eine mangelhafte Datenlage zurück und verlangt zusätzliche Sequenzen von Informationen über Klima- und Umweltveränderungen aus dem Bereich verschiedenster Disziplinen. Ein faszinierendes Ziel wäre der Vergleich von paläoklimatischen Ereignissen auf der Nord- und Südhemisphäre.“ Dazu kam die Anforderung des „Past Global Changes Programme“ (PAGES), vermehrt „hochauflösende, kalibrierte Proxy-Datensätze für interessante Zeitfenster in empfindlichen Räumen“ zu erarbeiten (IGBP 1992). In diesem Sinne ist die Atacama-Region im Grenzbereich Chile-Argentinien-Bolivien an der Scharnierstelle zwischen tropischer und außertropischer Zirkulation zweifellos ein „empfindlicher Raum“ mit einem reichen Archiv an Paläodaten, die sich in interessante Zeitfenster auflösen lassen. Nach einer ersten dreijährigen Forschungsphase lassen sich noch keine umfassenden Resultate vorlegen, doch zeichnen sich einige interessante Fragen und Ergebnisse ab, die wir im folgenden zur Diskussion stellen möchten*).

In unserem Arbeitsgebiet (Abb. 1) quert die Trockendiagonale den Andenkamm. Der Llullaillaco (6739 m), der zweithöchste Gipfel Chiles, liegt wohl zentral in der Trockenachse und widerspiegelt mit seinen obersten Stockwerken, die thermisch in Glazialbereich liegen und doch keine Gletscher tragen, die enorme Aridität selbst in großen Höhen.

*1) Wir danken dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung für die Unterstützung dieses Projektes. Im weiteren sind wir den Herren Prof. HUGO ROMERO und WILLY EGLI in Santiago, Chile, für ihre Hilfe und Begleitung zu großem Dank verpflichtet.

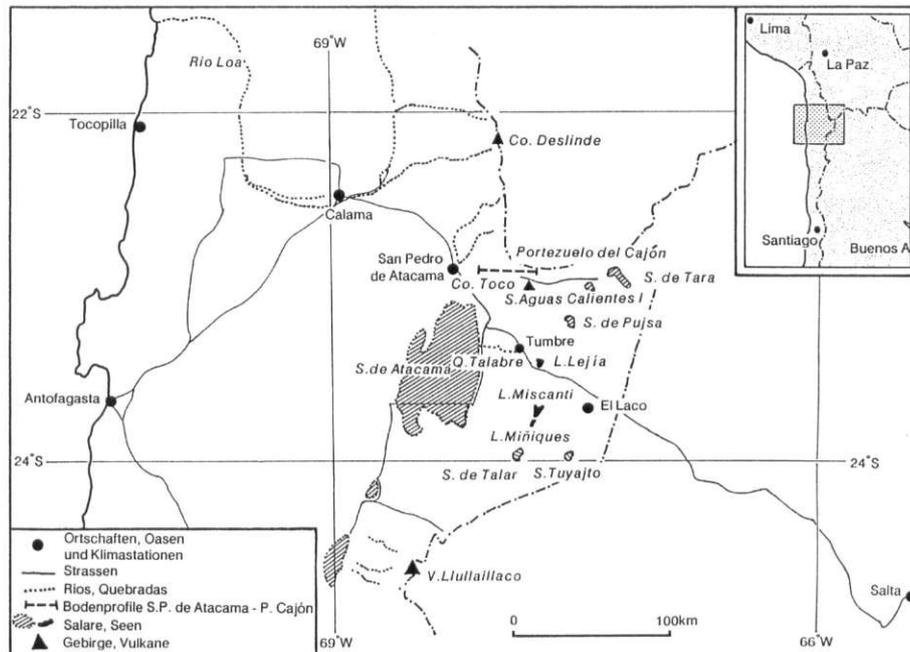


Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes
Map of the research area

Die interessante dreidimensionale Darstellung der ökologischen Bedingungen (KALIN ARROYA et al. 1988), in Abb. 2 gibt wertvolle Hinweise auf die variierenden Klimabedingungen zwischen 18° S und 28° S. Sowohl der Bedeckungsgrad wie auch die Artenzahl der Vegetation zeigen das Wechselspiel zwischen unterer hygrischer und oberer thermischer Limitierung. Nördlich 23° S liegen die günstigsten Bedingungen heute auf zirka 4000 m, südlich 25° S sinkt die Gunstzone rasch ab und liegt bei 28° S auf 2000–3000 m. Die deutliche Reduktion von Artenzahl und Bedeckungsgrad bei 23° S– 24° S zeigt die ungünstigen Wachstumsbedingungen im Bereich der Trockendiagonale, wo sich unterhalb 3200 m auf freier Oberfläche ohne Wasserzufuhr überhaupt keine Vegetation mehr entwickeln kann. Zusätzlich spielt aber auch die Höhe der Küstenkordillere und die Topographie der hohen Anden eine große Rolle. Nördlich 28° S öffnet sich der Andenkamm von einer 50 km breiten Vulkankette zu einem 200–300 km breiten Gebirgsraum mit Altiplano und Gipfeln um 6000 m, was die Aridität auf der Westabdachung zusätzlich verstärkt.

Wir konzentrieren uns im folgenden auf den Altiplano und die Westseite, auch wenn das Querprofil

bis nach Salta interessante Vergleichsdaten aufzuweisen hätte (siehe auch FOX u. STRECKER 1991).

2 Die aktuellen Klima- und Umweltbedingungen

Abb. 3 zeigt die heutigen Niederschlagsverhältnisse im Bereich der Atacamawüste und des nordchilenischen Altiplano. Entsprechend dem Wechselspiel zwischen der tropischen Zirkulation im Norden und der außertropischen Westwindzirkulation im Süden sind hier sowohl tropisch-konvektiv geprägte Sommerniederschläge zwischen Januar und März („Invierno Boliviano“) als auch außertropisch-advective Winterniederschläge von Juni bis September („Invierno Chileno“) möglich. Offenbar treten aber auch in den Übergangsjahreszeiten immer wieder niederschlagsreiche Situationen auf, wenn kalte südliche Luftpakete mit warmfeuchten tropischen Luftmassen zusammenprallen. Generell wird das Klima aber durch die Interaktion von absinkenden Luftmassen im stabilen südostpazifischen Hoch mit dem Austrocknungseffekt des kalten Humboldtstromes und der blockierenden Wirkung des Andenkammes für feuchte Luftmassen aus Nordosten ge-

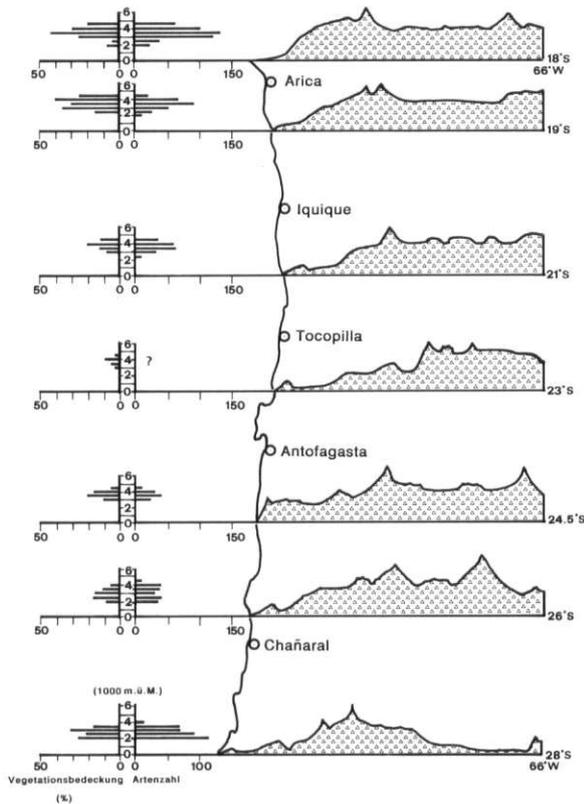


Abb. 2: Vegetationsbedeckung und Pflanzenartenzahl in Abhängigkeit von Höhenstufe und geographischer Breite
Quelle: nach KALIN ARROYO et al. 1988

Vegetation cover and number of species as a function of elevation and latitude

prägt. Entsprechend gering sind die Niederschlagsmengen, welche erst auf über 4000 m ü. M. gegen 200 mm/Jahr hin ansteigen (siehe Abb. 3). Die Trockenachse überquert denn auch im Bereich der Atacamawüste die Anden und als Folge dieser Aridität ist die Variabilität der Niederschläge entsprechend groß.

Salzarflächen als Indikator der räumlich-zeitlichen Niederschlagsverteilung

Einen ausgezeichneten Anhaltspunkt für das Wechselspiel der klimatischen Einflußgrößen im nordchilenischen Altiplano bildet die Untersuchung der Salare mit Hilfe von Satellitenbildern. Ohne auf die methodischen Aspekte der digitalen Bildverarbeitung (Geometrische Korrektur, Bildnormierung und -klassierung) und die weiteren hydrologischen Auswertungen (Berechnung der Wasserleitfähigkeit und der Wassertiefe; VUILLE 1991) einzugehen, seien hier

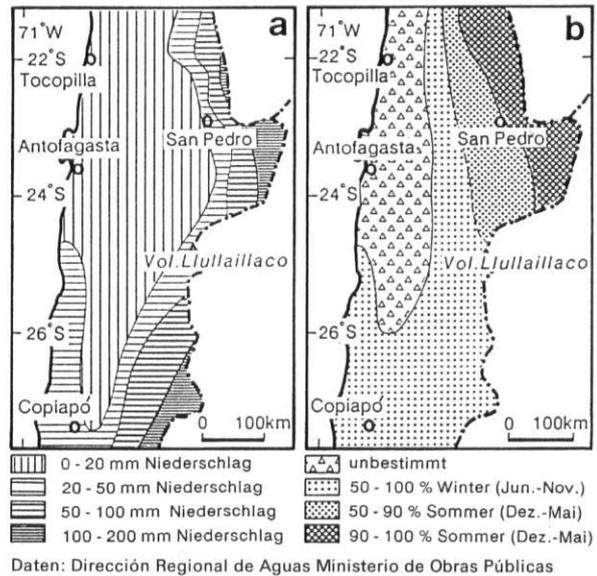


Abb. 3: Mittlerer Jahresniederschlag (a) und seine saisonale Verteilung (b)

Mean annual precipitation (a) and its seasonal distribution (b)

nur die klimatisch relevanten Resultate kurz diskutiert.

Anhand einer Sequenz digitaler Landsat/MSS-Szenen wurde die Ausdehnung der wasserbedeckten Salarflächen zwischen 23° S und 24° S im Zeitraum November 1983–August 1984 untersucht (VUILLE u. GROSJEAN 1991). Die Wahl fiel auf diese Zeitperiode, da 1984 das niederschlagsreichste Jahr im Altiplano seit Beginn der Satellitenaufzeichnungen darstellt und so die maximal mögliche Reaktion der Salare auf Niederschläge untersucht werden konnte. Die Bildsequenz beginnt mit einer Aufnahme vom 28. November 1983. Vor dem Einsetzen der Sommerniederschläge haben die offenen Wasserflächen der Salare eine relativ geringe Ausdehnung. Die nachfolgenden Bilder belegen, daß die Salare bei starken Niederschlägen sehr rasch überflutet und die Wasseroberflächen entsprechend vergrößert werden.

Die untersuchten Salare wiesen aber kein synchrones Verhalten auf, wie aus Abb. 4 entnommen werden kann. Obwohl sie alle innerhalb eines Breitengrades liegen, reagierten nur die nördlichen Salare (Tara, Aguas Calientes I, Pujsa) auf die intensiven Sommerniederschläge im Januar 1984. Dieser Monat, mit über 150 mm Niederschlag auf dem Altiplano (VUILLE 1991), war einer der niederschlagsreichsten der letzten 20 Jahre. Offenbar haben diese Niederschläge aber die weiter südlich liegenden Ein-

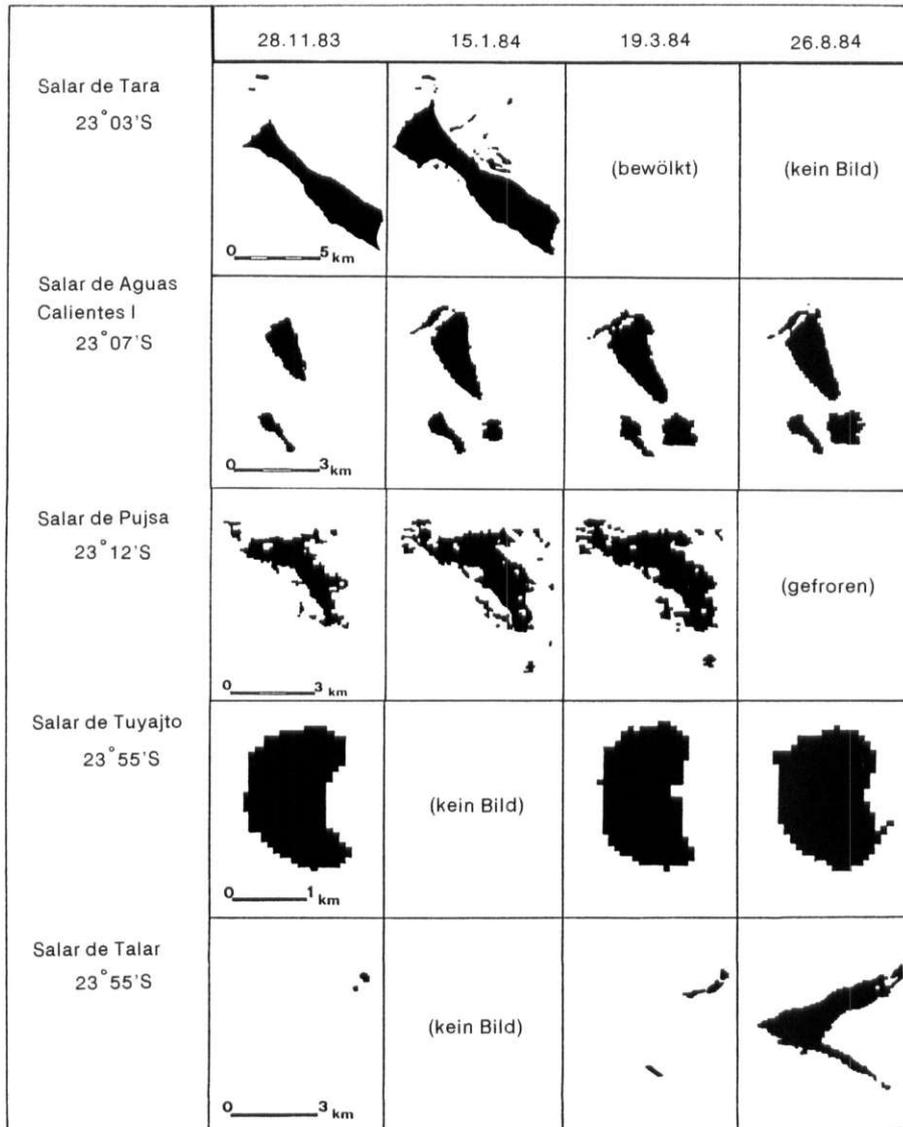


Abb. 4: Aus Landsat/MSS-Daten ermittelte Schwankungen der Wasserflächen in den Salaren zwischen November 1983 und August 1984

Quelle: VUILLE u. GROSJEAN 1991

Dynamics of water bodies from November 1983 to August 1984 as derived from Landsat/MSS

zugsgebiete nicht erreicht, sind die Wasserflächen der Salare Tuyajto und Talar bis März 1984 doch kaum angewachsen. Gerade umgekehrt präsentiert sich die Situation im Winter (Bild vom 26. August 1984). Die Wasserflächen der südlichen Salare haben sich nun ebenfalls stark vergrößert, die der nördlichen Salare bleiben, wie der Salar Aguas Calientes I zeigt, in etwa konstant. Dieses Anwachsen der überfluteten Fläche in den südlichen Salaren ist sehr wahrscheinlich auf winterliche Schneefälle zurückzuführen, wobei der

Anteil des Schmelzwassers an der Salarüberflutung und generell am regionalen Wasserhaushalt noch wenig geklärt ist. Die Landsat-Aufnahme vom 26. August 1984 zeigt jedenfalls einen völlig verschneiten Altiplano. Der Fragenkomplex Schneefall-Schneeschnmelze - Beitrag zum regionalen Wasserhaushalt soll in einer nächsten Feldphase im Südwinter 1993 näher untersucht werden.

Das hier skizzierte Bild der saisonal variierenden Wasserflächen ist ein Hinweis auf die Lage im Über-

gangsbereich zweier unterschiedlicher Zirkulationssysteme. Es gilt aber festzuhalten, daß es sich hierbei um eine Momentaufnahme handelt, die, um gesicherte Aussagen zu erhalten, zeitlich und räumlich noch ausgedehnt werden sollte. Zudem war das Jahr 1984 außerordentlich feucht und in keiner Weise repräsentativ. Untersuchungen zur Herkunft der Niederschläge anhand der Isotopenzusammensetzung (ARAVENA et al. 1989) und durch Berechnung der Trajektorien in verschiedenen Höhenniveaus (FUENZALIDA u. RUTLLANT 1986) zeigen übereinstimmend, daß sowohl die Sommer- wie auch die Winter-niederschläge 1984 ihren Ursprung im Amazonasbecken hatten. Die winterlichen Schneefälle wurden aber erst durch den Zusammenprall dieser warmfeuchten tropischen Luftmassen mit einer kalten Westwindströmung im Bereich des Altiplano ausgelöst.

Der Hinweis, daß zwischen Juni und September im Altiplano oftmals Schnee fällt, ist insofern überraschend, als dies aus den Niederschlagsstatistiken der Region keineswegs ersichtlich wird. Darin dominieren ganz klar die Sommerniederschläge zwischen Januar und März. Eigene Aufzeichnungen bei der 1990 in El Laco (23° 45' S, 67° 20' W, 4500 m ü. M.) installierten Klimastation lassen aber keine Zweifel offen: 1990 fielen in El Laco während 6 Schneefällen insgesamt 380 cm Schnee, 1991 waren es, verteilt auf 3 Ereignisse, 300 cm (GROSJEAN 1992). Im Jahr 1992 schließlich fielen bereits Ende Mai auf einer Höhe von 3200 m 120 cm Schnee (El Mercurio 3. 6. 1992). Diese Probleme werden in unserem Untersuchungsgebiet, in der Scharnierstelle zwischen verschiedenen Zirkulationstypen, in den nächsten Jahren weiterverfolgt.

Der Temperaturverlauf im Altiplano

In Abb. 5 ist der Jahresgang einiger in El Laco gemessenen meteorologischen Größen für das Meßjahr 1991 aufgezeichnet. Dargestellt sind die Tagesmittelwerte für die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur, sowie die Bodentemperaturen in 5 cm und 100 cm Tiefe. Da in El Laco nur alle 4 Stunden eine Registrierung erfolgt, wurden die Mittelwerte aus den Aufzeichnungen von 05.00 h (min.) und 13.00 h (max.) gebildet. Bei den Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe wurde als Minimum die Messung von 09.00 h verwendet, da infolge zeitlicher Verzögerung das Minimum gegenüber der Lufttemperatur erst später erreicht wird. In 100 cm Tiefe ist kein Tagesgang mehr festzustellen, wodurch die Frage nach der korrekten Mittelbildung entfällt.

Die Amplitude der jährlichen Temperaturschwankungen ist erwartungsgemäß in 5 cm Bodentiefe größer als in 100 cm Tiefe. Der Unterschied zwischen 5 cm und 100 cm Tiefe ist im Jahresverlauf aber viel weniger deutlich als etwa während eines einzelnen Tages. So läßt sich in 100 cm Tiefe noch ein klarer Jahresgang mit einer Amplitude von 11 °C erkennen. Die Minimaltemperaturen werden erst Ende Juli bis Anfang August erreicht; etwa einen Monat später als in 5 cm Tiefe und in der Luft. Diese Tiefsttemperaturen sinken aber nicht unter 0 °C. Demgegenüber liegen die Werte in den obersten Bodenhorizonten in den Wintermonaten im Mittel deutlich unter dem Gefrierpunkt.

In 5 cm Tiefe wurde ein Jahresmittelwert von 4,65 °C registriert, der auf die hohe Lage der Untergrenze des kontinuierlichen Permafrostgürtels (5600 m) hinweist. In Seesedimenten mit hoher Albedo sind inselhafte Permafrostvorkommen aber schon in der Höhe der 0 °C-Jahresisotherme (unter 5000 m) möglich (HURLBERT u. CHANG 1988). Es bleibt aber zur Zeit noch offen, ob diese Eisinseln erhalten und sogar weitergebildet werden oder ob es sich dabei um fossile Permafrostkörper handelt, die dank der günstigen Bedingungen erhalten geblieben oder nur langsam zurückgebildet worden sind.

Die Bodentemperaturen folgen, wie das Beispiel El Laco zeigt, generell dem Gang der Lufttemperaturen. Diese sind aber durchschnittlich um ca. 2–3 °C tiefer als die entsprechende Bodentemperatur in 5 cm. Auch die Lufttemperaturen zeigen jenen Jahresgang mit höchsten Temperaturen im Sommer (Dezember–März) und Tiefstwerten im Winter (Juni–August). Allerdings treten innerhalb kurzer Zeitperioden relativ starke Schwankungen der Tagesmittel auf. Das Jahresmittel der gemessenen Lufttemperatur lag 1991 in El Laco bei 2,29 °C.

Schnee und Firn anstelle der Gletscher

Einen der Schwerpunkte unserer momentanen Forschungsarbeit bildet der Themenkomplex Schnee, Firn, fehlende Vergletscherung und Lage der Schneegrenze im Umfeld der Trockenachse (siehe auch FOX u. STRECKER 1991). Ein sehr instruktives Forschungsobjekt stellt der Vulkan Lullaillaco (6739 m, 24° 43' S) dar, der trotz seiner Höhe keine aktuelle Vergletscherung aufweist (siehe auch Abb. 6 und Photo 1). Dabei würden die thermischen Voraussetzungen hierfür bei weitem ausreichen (0 °C-Jahresisotherme unter 5000 m). Die aktuelle Schneegrenze, wenn man den Begriff in diesem ariden Raum überhaupt verwenden will, ist aber im Bereich der Trok-

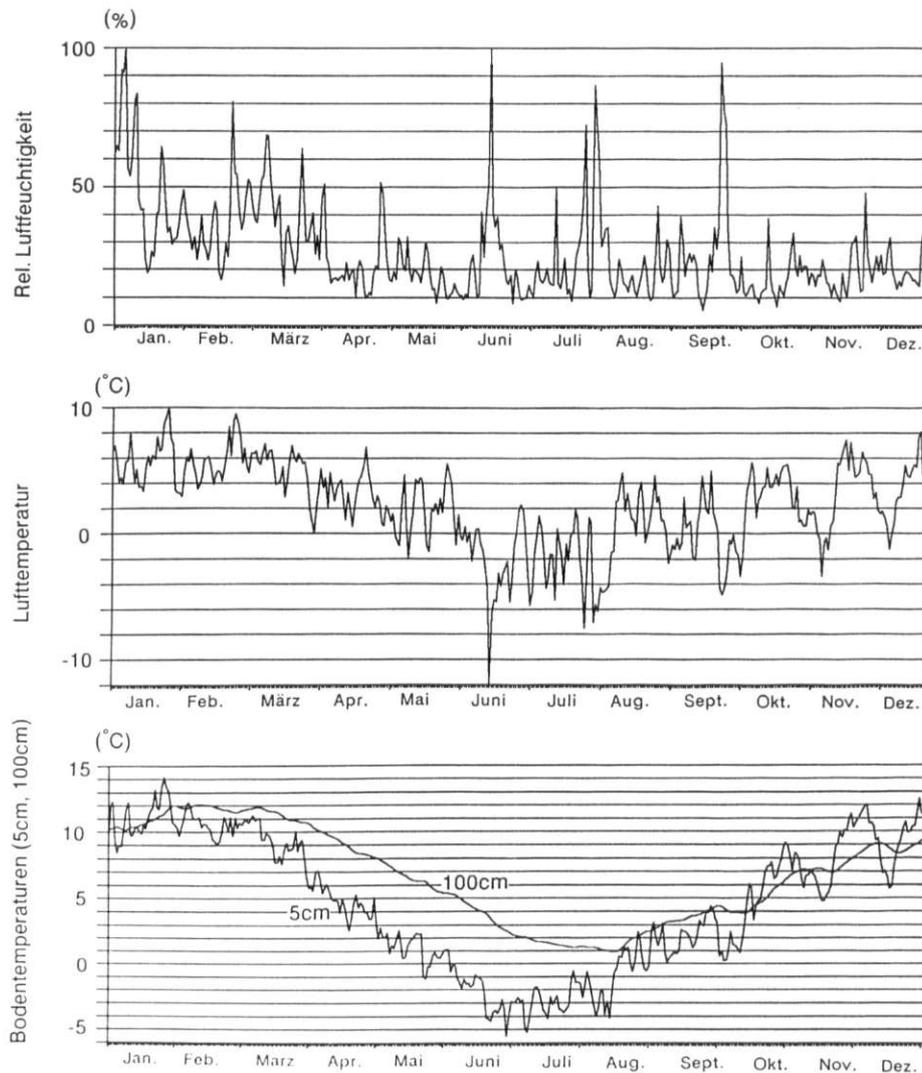


Abb. 5: Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Bodentemperatur (5 cm und 100 cm) in El Laco (4500 m, 23° 45' S) im Jahr 1991

Daily means of relative humidity, air temperature and soil temperature (5 cm and 100 cm) in El Laco (4500 m, 23° 45' S) in 1991

kenachse aufgelöst und setzt erst südlich des Ojos del Salado (28°S) wieder ein (siehe auch Abb. 11). Zwar besitzt der Vulkan Llullaillaco ein mehrere Meter mächtiges Schnee- und Firnfeld (Abb. 6), aber von einem Gletscher kann hier nicht gesprochen werden. Das Firnfeld weist weder Fließstrukturen auf, noch ist eine Unterteilung in ein Nähr- und Zehrgebiet möglich. Der Grund für das Fehlen eines Gletschers ist ganz klar bei der mangelnden Feuchte zu suchen. Zwar fällt am Llullaillaco in den Winter- und wohl auch in den Übergangsmonaten durchaus Schnee, dieser kann sich aber infolge der meist fehlenden

Wolkenbedeckung, der hohen Einstrahlungsrate und der geringen Luftfeuchtigkeit kaum längere Zeit halten. Der Schnee schmilzt und sublimiert sehr schnell wieder weg. Von entscheidender Bedeutung dürfte dabei der generell sehr niedrige Feuchtegehalt der Luft sein, deren Sättigungsdefizit zum raschen Abbau der Schneedecke beiträgt. Die Registrierung der relativen Luftfeuchtigkeit in El Laco im Jahr 1991 zeigt durchschnittliche Werte von bloß 10–30 % (Abb. 5). Nur während der Niederschlagsperioden läßt sich kurzfristig ein massiver Anstieg der Luftfeuchtigkeit feststellen, so etwa bei den 3 Schneefällen

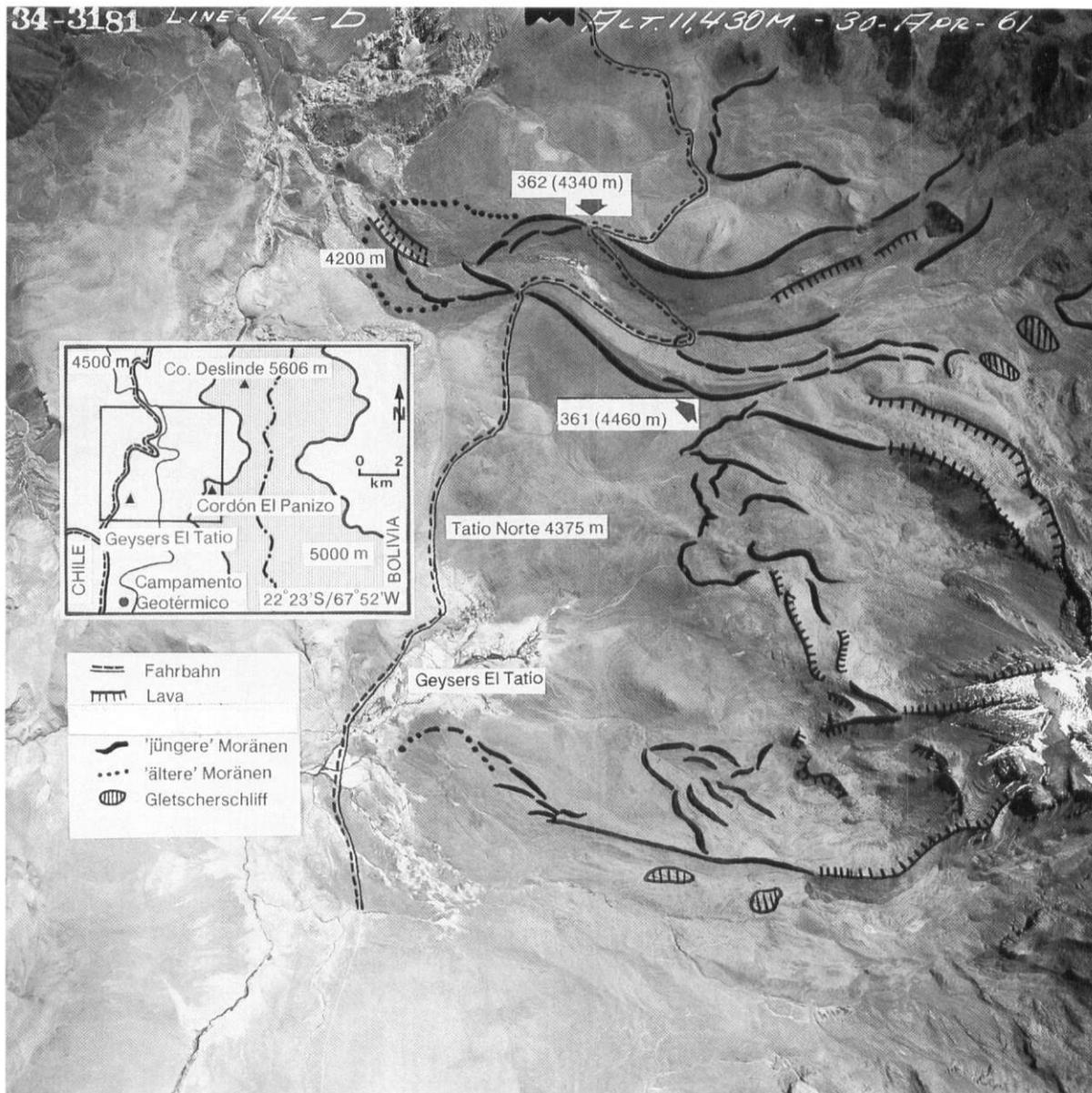


Photo 2: Cerro Deslinde mit Moränen und Probestellen der Thermolumineszenz-Datierung (361, 362)
Cerro Deslinde showing moraines and sites for thermoluminescence dating (361, 362)

unterschiedlichsten paläoklimatischen Archive zu bearbeiten. So werden im folgenden die bis heute vorliegenden Befunde aus der Kartierung von Moränen, aus der Analyse und Datierung von Seesedimenten, Paläoböden und Pollenproben diskutiert und miteinander verglichen. Erst das Zusammenspiel der verschiedenen Resultate wird ein ganzheitliches Bild der Klima- und Umweltveränderungen und ihrer dominierenden Prozesse von der Vergangenheit bis zur Gegenwart ergeben.

Vergletscherungen und glaziale Ablagerungen

Im nordchilenischen Altiplano lassen sich vielerorts Zeugen einer ehemaligen Vergletscherung nachweisen. So konnten beispielsweise am Vulkan Lullailaco ($24^{\circ} 43' S$, 6739 m), unabhängig von der Exposition, mindestens drei verschiedene Moränenstadien kartiert werden (Abb. 6). Sie befinden sich auf 4900 m (Photo 1), 5100 m und auf 5500 m (GROSJEAN et al. 1991). Die in Abb. 6 in tiefere Lagen bis

4000 m hinabreichenden Moränen sind stark ausgewaschen und sehr wahrscheinlich einem älteren Stadium zuzuweisen.

Die Moränenuntergrenze sinkt gegen Norden hin kontinuierlich ab und erreicht beim Cerro Toco ($22^{\circ} 56' S$) (siehe Abb. 1) Höhen von 4500 m–4800 m (ABELE 1987, 1988). Am Cerro Deslinde ($22^{\circ} 23' S$) liegt die Grenze bereits bei 4200 m (siehe Photo 2). Dieses Absinken der Moränenuntergrenze von Süden gegen Norden und das Fehlen einer Vergletscherung am Ojos del Salado (6893 m) bei $27^{\circ} S$, soweit das bei einer ersten Begehung auf der Nordseite festgestellt werden konnte, weisen auf eine Südwärtsverlagerung der tropischen Zirkulation hin. Verstärkte Sommerniederschläge dürften die Folge dieser Verschiebung und die Ursache für die jüngste maximale Ausdehnung der Gletscher gewesen sein, was auf ein spätglaziales Alter hindeutet. Leider sind bisher alle Datierungsversuche an Moränen gescheitert. Die mit Hilfe der Thermolumineszenz-Feinkorn-technik ermittelten Alter liegen alle zwischen 7400 B.P. und 3900 B.P. (BÜRGI 1992), was wir mit einer Verjüngung durch nachträglich eingeschwemmtes Material interpretieren.

Die Rekonstruktion der Verhältnisse zur Zeit des letzten Kältemaximums um 18 000 B.P. ist relativ problematisch, da bis heute keine Datierungen vorliegen. Die weiter südlich nachgewiesene Talvergletscherung (CLAPPERTON 1990) dürfte aber nördlich von $30^{\circ} S$ infolge der zu ariden Bedingungen gefehlt haben (siehe auch Abb. 11d). Der Temperatur- und Niederschlagsgradient zwischen der Westwindzirkulation südlich von $30^{\circ} S$ und der nördlich anschließenden Zone war im Vergleich zu heute wohl verstärkt (GARLEFF et al. 1991). Dies zeigt sich im

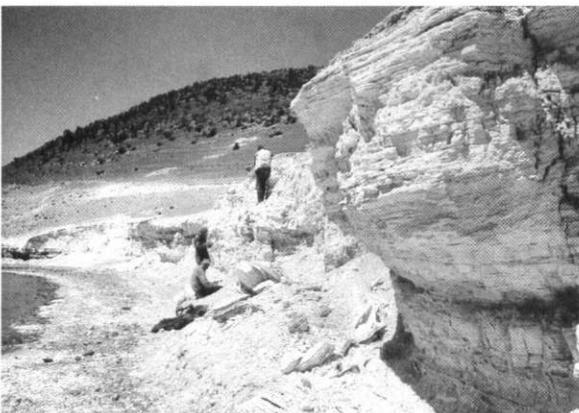


Photo 3: Seesedimente am Südufer der Laguna Lejia
Lake sediments at the southern shore of Lake Lejia

rapiden polwärtigen Absinken der glazialen Formen auf der Westseite der Anden bei $30^{\circ} S$ (VEIT 1991).

Seen-Hochstände und Seesedimente

Neben den Spuren einer früheren Vergletscherung lassen sich im Altiplano auch Phasen verschiedener Seenhochstände nachweisen. Am besten kann dies anhand der Sedimentstratigraphie der Laguna Lejia ($23^{\circ} 47' S$, 4300 m) gezeigt werden (Abb. 7 und Photo 3). Dieselbe Sedimentabfolge findet sich aber auch in weiteren kleinen, geschlossenen Einzugsgebieten oberhalb 4000 m (Salar Tuyajto, Salar Aguas Calientes I, Laguna Miñiques, Laguna Miscanti). Im Gegensatz zu den Moränen war in verschiedenen Sedimentlagen eine absolute Datierung (Thermolumineszenz-Feinkorn-technik und Radiokarbondatierung) möglich. Die Alter der datierten Sedimente sind in Abb. 7 enthalten.

Zwischen 17 000 und 15 000 B.P. herrschte eine rege vulkanische Aktivität, welche in der Laguna Lejia zur Ablagerung von Asche und zur Bildung von Bentonitlagen führte. Diese Sedimente gehören zu einem gegenüber heute um 5–10 m erhöhten Wasserspiegel. Die in den Bentoniten abgelagerten Pollen (*Alnus*, *Podocarpus*) deuten auf verstärkten tropischen Zirkulationseinfluß hin. Ein für das ganze Einzugsgebiet erstelltes Wasserhaushaltsmodell (GROSJEAN 1992) zeigt, daß 300 mm Sommerniederschlag (heute: 180 mm) zur Bildung und Erhaltung eines um ca. 5 m höheren Wasserspiegels ausgereicht haben dürften. Dieses Modell benötigt als Inputgrößen je nach Klimaszenarium variierende, monatliche Werte für Niederschlag, Bewölkung, Globalstrahlung, Temperatur und Dampfdruck. Daraus resultiert – auch unter Berücksichtigung einiger schwer abschätzbarer Größen, wie z. B. der Bewölkung – ein bestimmtes Wasservolumen, welches mittels eines digitalen Geländemodells (1 m-Höhenkurven) die Berechnung der zugehörigen Wasseroberfläche und des Seespiegelanstiegs erlaubt.

Nach 15 000 B.P. stieg dieser Wasserspiegel auf 10–15 m über das heutige Niveau, was auf feuchtere Klimabedingungen hinweist. Diese Phase wird durch fein laminierte Sedimente mit einer hohen Anzahl von Diatomeen und Ostrakoden repräsentiert. Zwischenzeitlich stieg der Wasserspiegel auf max. 25 m über das heutige Niveau, was einer Flächenvergrößerung von heute 1,9 km² auf 10,8 km² gleichkommt. Um den See in dieser Größe zu erhalten, waren 400–500 mm jährlicher Niederschlag (vorwiegend im Sommer) erforderlich (GROSJEAN 1992). Diese maximale Ausdehnung der Seen in unserem Untersuchungs-

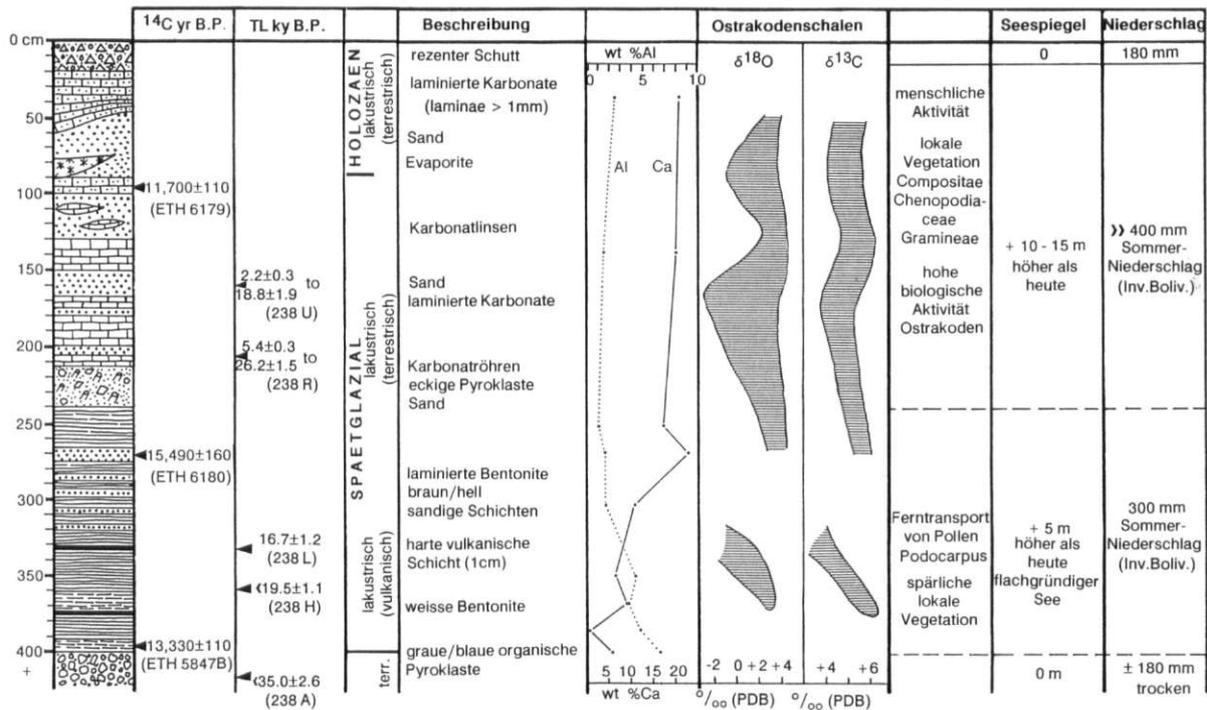


Abb. 7: Stratigraphie der Seesedimente bei der Laguna Lejia
Section at Lake Lejia showing the stratigraphic sequence of lake sediments

gebiet dürfte zeitgleich mit dem Taucasee im Uyuni-becken entstanden sein. Auch dort ist der verstärkte Einfluß sommerlicher Niederschläge betont worden (KESSLER 1985, 1991). Zur Zeit dieser maximalen Seenausdehnung muß infolge der erhöhten Feuchtezufuhr auch die lokale Vegetation zugenommen haben. Das läßt sich anhand der Pollen in den Seesedimenten nachweisen. Das Fehlen klastischer Sedimente deutet ebenfalls auf eine dichtere Vegetation und verminderte Hangerosion und Einspülung hin.

Nach 10 000 B.P. fehlen uns bis jetzt die Daten zur Rekonstruktion der Seespiegelschwankungen, doch hoffen wir, durch Bohrungen die holozäne Geschichte dieser wenigen offenen Wasserflächen in arider Umgebung genauer zu verstehen.

Bodenbildungen und Vegetationsbedeckung

Entlang einem Transekt von San Pedro de Atacama (2500 m) bis zum Portezuelo del Cajón (4800 m) (siehe Abb. 1) wurden zahlreiche fossile Bodenprofile untersucht (Abb. 8). Dabei wurde darauf geachtet, die bodenbildenden Faktoren Exposition, Hangneigung und geologisches Ausgangsmaterial konstant zu halten.

Bei den untersuchten Böden handelt es sich eindeutig um fossile Bildungen, da unter aktuellen Bedingungen mit einer Vegetationsbedeckung von max. 10% keine Bodenbildung stattfindet und die A- und B-Horizonte durch äolische Sande überdeckt sind. Die Bodenproben wurden alle auf ihren Gehalt an mobilem Eisen (CBD), Kationenaustauschkapazität, Anteil an organischem Material und Karbonatgehalt untersucht. Die am besten entwickelten Böden befinden sich auf 4500 m, also 500 m über dem aktuellen Vegetationsmaximum. Dieses Phänomen konnte entlang von 2 anderen Transekten bestätigt und erhärtet werden. Wenn wir den am besten entwickelten Böden auch eine bestentwickelte Vegetation zuordnen, ergibt sich bei einem möglichen Temperaturgradienten von ca. 0,7 °C/100 m eine Erhöhung der für das Pflanzenwachstum relevanten Sommertemperaturen um ca. 3,5 °C gegenüber heute. Leider ist die absolute Datierung der Böden bisher nicht geglückt. Wie weit die Bodenbildung bereits im Spätglazial eingesetzt hat, können wir heute noch nicht beurteilen. Verschiedene Hinweise deuten aber eher auf eine frühholozäne Bildung hin. So liegen die Böden in 4600 m Höhe auf Moränenmaterial, was die Bildung des IIA_{hb}-Horizontes nach dem jüngsten

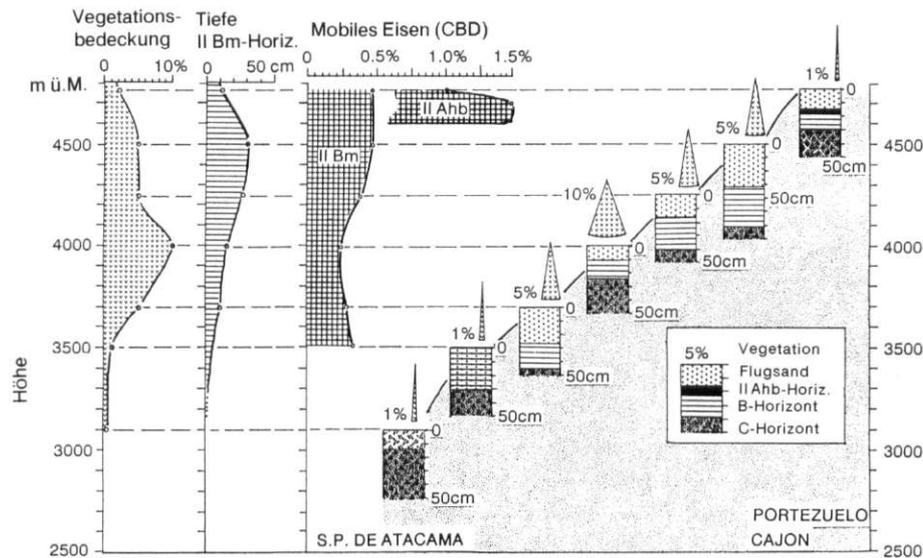


Abb. 8: Heutige Vegetationsbedeckung und Paläoböden entlang dem Transekt San Pedro–Portezuelo del Cajón

Present vegetation cover and paleosoils along the western slope of the Altiplano between San Pedro and Portezuelo del Cajón

Gletscherrückzug im Spätglazial beweist. Andererseits dürften die Böden älter als 7400 Jahre sein. Mit diesem Alter wurde der Stillstand eines periglazialen Wanderblocks datiert, dessen Kriechspuren frei von jeglicher Bodenbildung sind. Diese Hinweise lassen auf ein spätglaziales bis frühholozänes Alter der Bodenbildung schließen, welche unter feuchteren und wärmeren Bedingungen ablief. Die hier skizzierten, relativ vorteilhaften Umweltbedingungen korrelieren zudem gut mit dem Auftreten erster Sammler- und Jägerkulturen zwischen 10 800 und 8500 vor heute (NUÑEZ 1983). Die hohen Seespiegel dürften unter diesen Bedingungen ebenfalls noch angedauert haben; eine Datierung frühholozäner Seesedimente ist bisher allerdings nicht gelungen.

Die weitere Entwicklung der klimatischen Verhältnisse nach 7500 B.P. läßt sich am besten anhand von Pollenprofilen rekonstruieren (siehe auch GRAF 1986 und MARKGRAF 1989). In Abb. 9 ist als repräsentatives Beispiel das Pollenprofil von Tumbre ($23^{\circ} 18' S$, 3880 m) wiedergegeben. Es läßt sich darin eine Gliederung in 3 Hauptphasen erkennen (244-I–244-III). In Phase 244-I (ca. 7500 B.P.–6000 B.P.) herrschten relativ kühle und feuchte Bedingungen vor. Nach 6000 B.P. stiegen die Temperaturen an (Phase 244-II, ca. 6000 B.P.–3000 B.P.). Gewisse Widersprüche zu den Befunden im Titicacabecken, wo WIRRMANN und DE OLIVEIRA ALMEIDA (1987) zwischen 7700 und 3650 B.P. niedrige Seespiegel rekonstruierten, können wir mit den heute verfügbaren Daten noch nicht ge-

nügend klären. Eine Phase günstiger Umweltbedingungen nach 6000 B.P. stand bisher im Widerspruch zum Fehlen jeglicher Spuren menschlicher Aktivität („silencio arqueológico“). Erst neueste Entdeckungen im Río Purifica ($22^{\circ} 45' S$, 3500 m) scheinen hier mögliche Antwort zu liefern (siehe Kap. 4). Nach 2200 B.P. läßt sich im Pollenprofil von Tumbre ein markanter Wechsel der Klimaverhältnisse feststellen (Phase 244-III). Der rapide Rückgang der Vegetationsbedeckung (*Graminae*) weist auf kühlere und aridere Verhältnisse hin. Allerdings ist unklar, inwieweit sich hier bereits der Einfluß einer intensiven Weidenutzung bemerkbar macht, wie das für benachbarte Gebiete in Bolivien und Argentinien nachgewiesen werden konnte (RUTHSATZ u. FISEL 1984).

4 Klimageschichte und Atacamena-Kultur

Die Erfassung der Zusammenhänge zwischen Klima und Kulturgeschichte im Raum der Atacama steht erst am Anfang. Das Auftauchen der ersten Menschen wird nach heutigen Kenntnissen mit 10 800 B.P. datiert, wobei zwischen Siedlungen an der Küste, basierend auf marinen Ressourcen (LLAGOSTERA 1979) und andinen Funden mit jahreszeitlich wechselnden und vertikal differenzierten Umweltbedingungen deutlich zu unterscheiden ist. Die heutigen Kenntnisse erlauben die folgende zeitliche Gliederung (siehe auch Abb. 10):

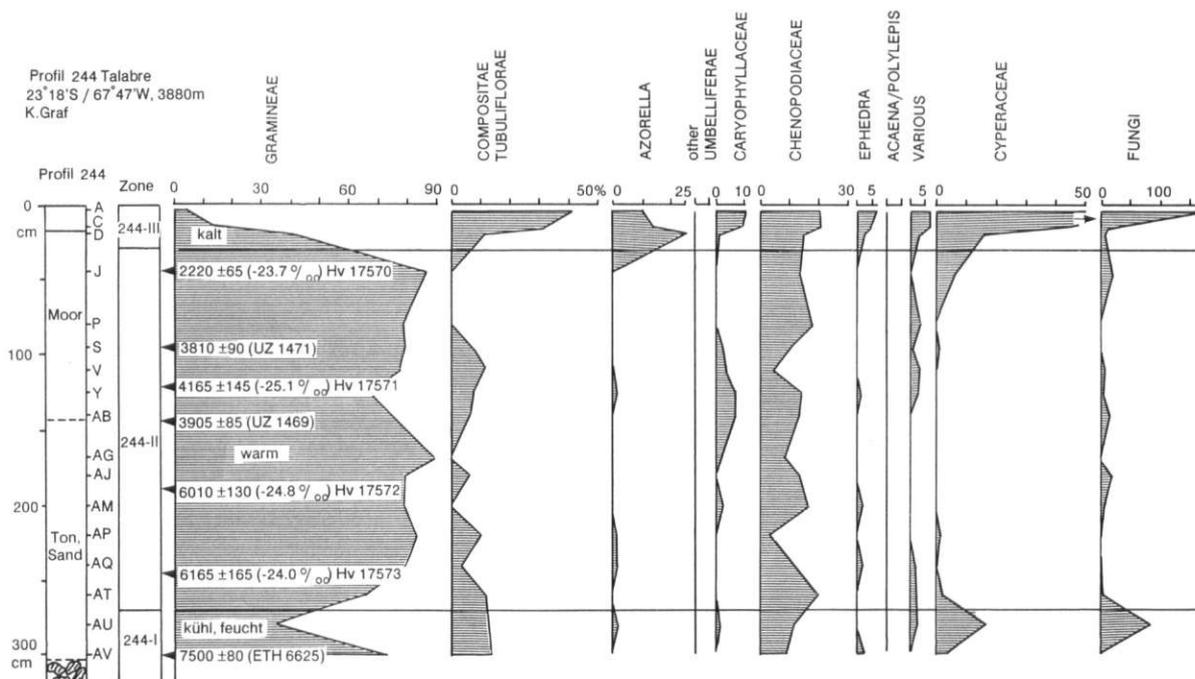


Abb. 9: Pollendiagramm von Tumbre
Pollen diagram of Tumbre

Für das Ende des Pleistozäns (paleoindian period, 12 000–11 000 B.P.) fehlen in unserem Arbeitsgebiet bis jetzt jegliche Spuren von Jägern einer eiszeitlichen Megafauna. Diese Tatsache ist um so erstaunlicher, als während der spätglazialen Seenphase (vgl. Kap. 3) im Altiplano eigentlich genügend Wasser vorhanden war und sowohl in Bolivien wie in Zentral- und Südchile für diese Zeit eindeutig menschliche Aktivitäten nachgewiesen sind (Nuñez u. Santoro 1990). Die Gründe für das Ausbleiben menschlicher Aktivitäten sind bislang unklar.

Die frühesten Funde im Altiplano tauchen erst nach 11 000 B.P. auf (early archaic period, 11 000–8 500 B.P.). Im Übergang Spätglazial/Holozän waren die Aktivitäten einer Jäger- und Sammlerkultur im Altiplano und seiner Fußzone weit verbreitet. Obschon bisher keine Datierung aus dem Altiplano vorliegt, zeigt die Assoziation der Artefakte mit den fossilen Strandlinien der Seen und Salare eindeutig, daß die menschlichen Aktivitäten an die immer noch großen frühholozänen Wasserflächen gebunden waren. Die damalige Vegetation, die sich heute noch im fossilen Boden zeigt, mochte die Basis für eine große Kamelidenpopulation gebildet haben, die nebst den Vögeln und Nagern primäre Jagdobjekte waren. Die Verbreitung der Siedlungskomplexe

unterstützt die naturräumlichen Befunde, wonach die Feuchtphase nur die oberen Höhenstufen erfaßt hat, während die Gebiete unterhalb 2 500 m fortwährend trockenen Bedingungen ausgesetzt waren.

Auf Grund der heute vorliegenden Daten folgern wir, daß nach 8 500–7 000 B.P. die Seenphase und die Bodenbildung abgeschlossen waren und das Klima gegen das Temperaturoptimum (nach 6 000 B.P., siehe auch Abb. 9) hin immer trockener wurde. Parallel dazu wurden zwischen 8 500 und ca. 5 000 B.P. (middle archaic period) die meisten Siedlungen am Altiplanofuß aufgegeben, was als „silencio arqueológico“ bekannt wurde. Neueste Funde zeigen aber, daß der Raum während dieser Zeit doch besiedelt war. Mit unseren Untersuchungen im Tal des Río Purifica (NE San Pedro de Atacama) konnte erstmals ein temporärer Siedlungskomplex am Altiplanofuß aus der middle archaic period belegt werden (5 880 ± 100 ¹⁴C yr B.P.). Die Feuerstelle, die mit Artefakten aus Obsidian und Basalt sowie mit Knochen assoziiert ist, ist in eine ca. 30 m mächtige Abfolge von klastischen Sedimenten, Karbonaten und weiteren Feuerstellen eingebettet. So folgern wir aus unseren ersten geoarchäologischen Untersuchungen, daß der „silencio arqueológico“ im strengen Sinn revidiert werden muß. Die Frage einer zunehmenden

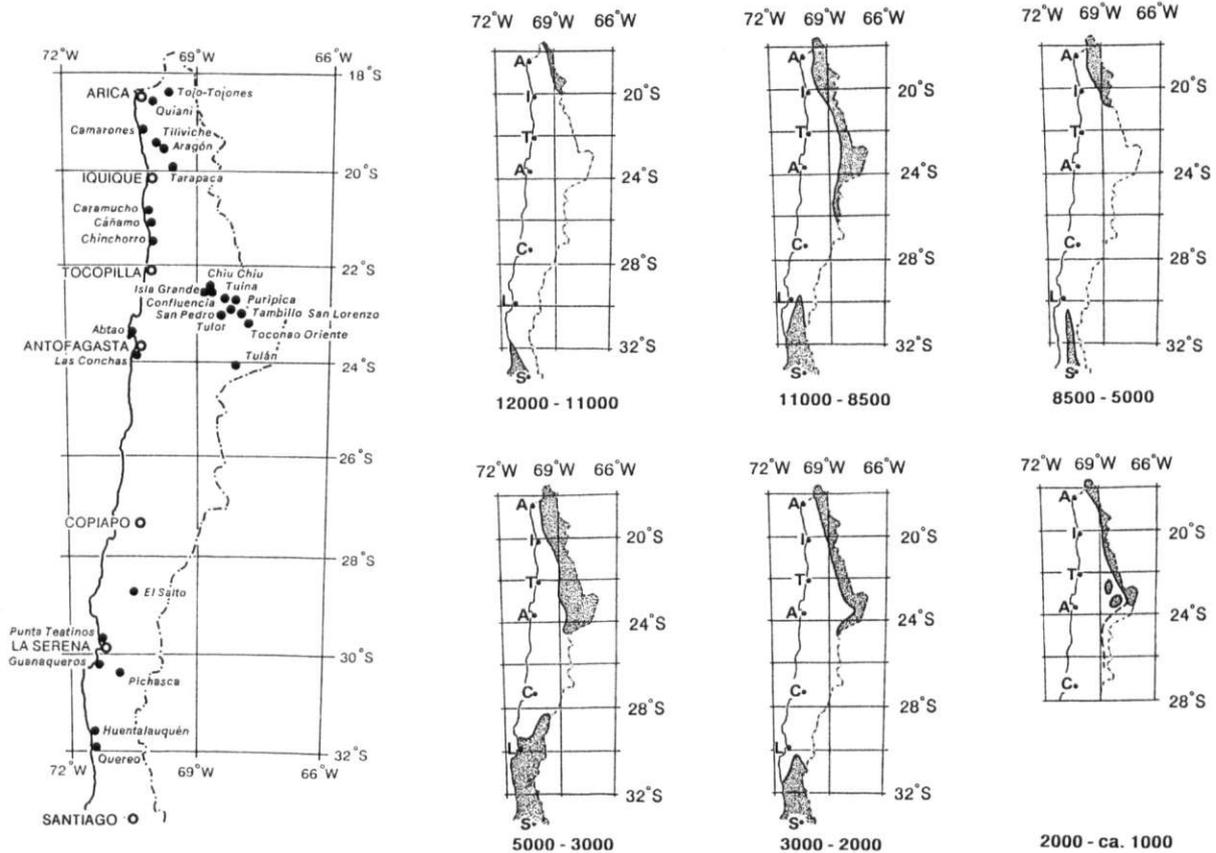


Abb. 10: Archäologische Hinweise (schraffierte Flächen) seit 12 000 B.P.

Quelle: nach NUÑEZ 1983

Archaeological evidence (shaded areas) since 12 000 BP

Aridität nach 8500 B.P. bleibt aber bestehen: Die zahlreichen klastischen Sedimentlagen sind Indizien für trockenes Klima mit dominanten Starkniederschlägen, während denen Schuttmassen in den Quebradas aktiviert wurden. Dies mag seinerseits zeitweilig zu einem Wasserstau im Haupttal geführt haben, was wiederum eine stabile Basis für Vegetation, Tiere und schließlich auch für die Menschen in einer generell lebensfeindlichen Umwelt war.

Während der zweiten ausgedehnten Siedlungsphase mit Beginn um 5000 B.P. (late archaic period 5000–4000 B.P., early agropastoralism 4000–3000 B.P.) konnte sich eine semistationäre Kultur entfalten. Die Ansichten über den Zusammenhang zwischen Umweltbedingungen und ersten Anzeichen der Lama-Domestikation (HESSE 1982) und Ackerbau (ab 4000 B.P.) sind kontrovers. Interessanterweise stammen die ersten Hinweise zur Domestikation aus dem Tal des Río Purifica, wo wir nachweisen konnten, daß die besonders günstigen Bedingungen

weiterhin andauert haben (4280 ± 70 ^{14}C yr. B.P., organischer Horizont in Stillwassersedimenten). Von großer Bedeutung ist, daß laterale und vertikale Transhumanz auf eine optimale raum-zeitliche Ressourcennutzung mit Lamazucht, Ackerbau und temporärer Jagd hindeuten (SANTORO u. NUÑEZ 1987). Verbindungen und Güteraustausch zwischen den Anden und der Küste sind belegt.

Nach 3000 B.P. wurde der Ackerbau dominant. Mit zunehmender Komplexität der menschlichen Gesellschaft wird aber eine rein naturdeterministische Sicht der Entwicklung problematischer. Trotzdem dürfte der Trend zu größerer Aridität wohl zuerst durch Domestikation und Irrigation in den Oasen kompensiert worden sein, doch das kleinere Wasserangebot in den Flüssen und eine Absenkung des Grundwasserspiegels im Salar de Atacama zwang die Menschen nach 2000 B.P. weniger stabile Oasen allmählich aufzugeben. Mit 2185 ± 65 ^{14}C yr. B.P. ist auch das Ende der besonderen Verhältnisse im Río

Purifica angezeigt, wobei neben klimaökologischen Gründen auch geologisch-tektonische Ursachen in Betracht gezogen werden könnten.

Inwiefern die speziellen Bedingungen in diesem Tal zum besseren Verständnis des Zusammenhanges Mensch-Umwelt während des „silencio arqueológico“, aber auch während der nachfolgenden Phase der Domestikation von Lamas und des Ackerbaus beigetragen haben, soll zusammen mit chilenischen Wissenschaftlern in einem geoarchäologischen Projekt weiter untersucht werden.

5 Folgerungen und Ausblick

Die paläoökologischen Befunde zeigen, daß die Trockendiagonale im Laufe der letzten 18 000 Jahre wesentliche Klima- und Umweltveränderungen erfahren hat (Abb. 11). Die größte Unsicherheit betrifft die Phase des Kaltzeit-Maximums. Mißerfolge mit verschiedenen Datierungsmethoden erlauben es uns bis heute nicht, Höhenstufen der glazialen und periglazialen Prozesse zu definieren und damit die Klimabedingungen dieser Zeit zu rekonstruieren. Erst nach 17 000 B.P. setzen Datierungen mit Seesedimenten ein, die bedeutend höhere Seespiegelstände auf dem Altiplano im Spätglazial belegen. Böden bilden sich im Übergang Spätglazial-Holozän, in höchsten Lagen auf jungem Moränenmaterial, eine deutliche Erwärmung bei günstigeren Feuchtigkeitsbedingungen aufzeigend. Die gesamten Befunde wei-

sen auf eine deutliche Südverlagerung wirksamer tropischer Niederschläge, wie wir sie heute in der Region Chungará-Sajama (18° S) kennen, bis in die Breite des Ojos del Salado (27° S) hin. Das bedeutet, daß das Gebiet der Laguna Chungará auf 18° S mit seinen vergletscherten Vulkanen, offenen Seen und intensiv genutzten Hochweiden – eindeutig dem tropischen Niederschlagsregime zugeordnet – ein mögliches Szenarium für die früheren Bedingungen in unserem extrem ariden Altiplano bilden könnte. Ein künftiger Vergleich von Wasserhaushalt, Böden, Seesedimenten, Moränen etc. ist geplant. Ein solcher Vergleich drängt sich auch deshalb auf, weil die Hochzone von Chungará unterhalb 3500 m bis zur Küste bei Arica in eine extreme Wüste übergeht, die genau gleiche Verhältnisse wie in unserem Untersuchungsgebiet im Spätglazial und frühen Holozän aufweist.

Vergleichen wir diese bedeutende Südverlagerung der tropischen Niederschläge mit den Westwinden, haben wir Mühe, eine ähnliche Aussage mit einer entsprechenden Nordverlagerung zu machen. Die winterlichen Westwindniederschläge zeigen von der letzten Kaltzeit hin zur Gegenwart keine größere Verschiebung, wenn die Vergletscherung nördlich des Ojos del Salado im wesentlichen ins Spätglazial gehört. Sollte sich dieser Sachverhalt bei weiteren Untersuchungen bewahrheiten, so wäre das im Vergleich mit der Nordhemisphäre, wo die Polarfront während der letzten Kaltzeit weit nach Süden vorstieß, ein interessantes Ergebnis. Diese klare Trennung in Sommer- und Winterniederschläge wird aber

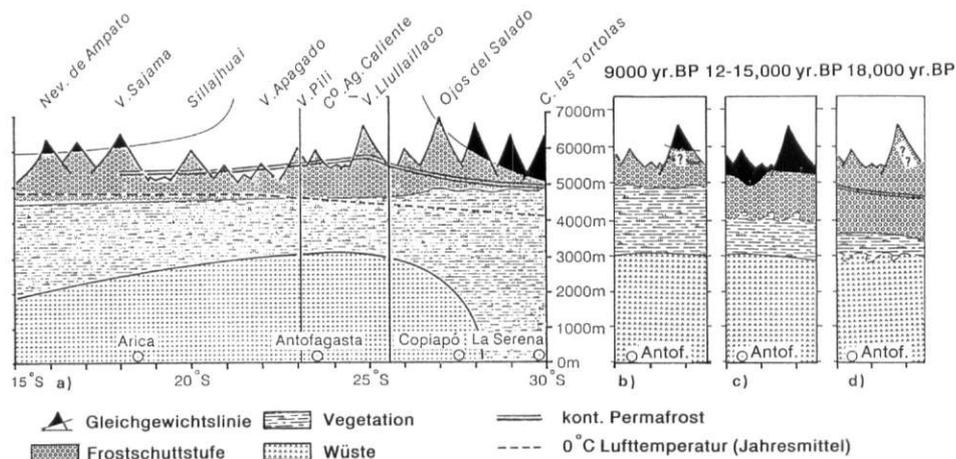


Abb. 11: Höhenstufen auf der Andenwestseite bei 23° S. Zeitliche Abfolge: (a) heute (15° – 30° S), (b) 9000 B.P., (c) 12–15 000 B.P. (siehe auch LAUER u. ERLNBACH 1987, LAUER 1988), (d) 18 000 B.P.

Altitudinal belts on the western slope of the Andes at 23° S. Cross-section showing the situation for: (a) present (15° – 30° S), (b) 9000 BP, (c) 12–15 000 BP, (d) 18 000 BP

zusehends fraglicher, wenn wir die Niederschläge in den Übergangsjahreszeiten zwischen Sommer und Winter analysieren. Kollisionen zwischen Kaltlufttropfen aus dem Westwindbereich und tropischerfeuchteren Luftmassen zeigen auf, daß die Zirkulationsstrukturen weit komplizierter sind und einer zukünftigen genaueren Untersuchung bedürfen.

Mit diesen paläoklimatischen Untersuchungen hoffen wir nicht nur einen Beitrag zur Besiedlungs- und Nutzungsgeschichte dieses Raumes zu leisten, sondern auch zur brisanten Frage der Wasserressourcen für den rasch wachsenden Bergbau mit all seinen Konsequenzen für Bevölkerung und Siedlung (siehe auch WEISCHET 1970). Wasserproben unterhalb 4000 m enthalten kein Tritium am Ende der Trockenmonate. Haben diese Oberflächengewässer (z. B. Río Loa) und Quellen einen so gewaltigen Speicher oder ist ihr Wasser fossil? Frühere Untersuchungen und Datierungen scheinen auf das letztere hinzuweisen (FRITZ et al. 1979). Diese Frage dürfte für die künftige ökonomische Entwicklung dieses Raumes und für die Menschen der rasch expandierenden Städte (Antofagasta, Calama) sehr bald zu einer Überlebensfrage werden. Antworten sind aber nur durch eine bessere Kenntnis der gegenwärtigen und früheren Klimabedingungen möglich.

Literatur

- ABELE, G.: Zur Frage nach dem Ausmaß der pleistozänen Vergletscherung auf der Westflanke der zentralen Anden. In: *Die Erde* 118, 1987, 142-147.
- : Geomorphological west-east-section through the north Chilean Andes near Antofagasta. In: *Lecture Notes in Earth Sciences* 17. Berlin 1988, 153-168.
- ARAVENA, R., PEÑA, H., GRILLI, A., SUZUKI, O. u. MORDECKAI, M.: Evolución isotópica de las lluvias y origen de las masas de aire en el Altiplano chileno. IAEA-TEDOC-502: Isotope Hydrology Investigations in Latin America, 1989, 129-142.
- BÜRGI, A.: Aufbau und Betrieb eines Thermolumineszenz-Labors zur Datierung quartärgeschichtlicher Proben. Dissertation Univ. Bern 1992.
- CLAPPERTON, C. M.: Quarternary Glaciations in the Southern Hemisphere. In: *Quaternary Science Reviews* 9, 1990, 121-304.
- El Mercurio: Nachricht in der Ausgabe vom 3. 6. 1992. Santiago, Chile, 1992.
- FOX, A. N. a. STRECKER, M. R.: Pleistocene and modern snowline in the Central Andes (24-28° S). In: *Bamberger Geographische Schriften*, Bd. 11, 1991, 169-182.
- FRITZ, P., SILVA HENNINGS, C., SUZUKI, O. a. SALATI, E.: Isotope hydrology in Northern Chile. IAEA-SM-228/26, 1979, 525-544.
- FUENZALIDA, H. a. RUTLLANT, J.: Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplánico. Informe final. Universidad de Chile 1986.
- GARLEFF, K., SCHÄBITZ, F., STINGL, H. u. VEIT, H.: Jungquartäre Landschaftsentwicklung und Klimageschichte beiderseits der Ariden Diagonale Südamerikas. In: *Bamberger Geographische Schriften*, Bd. 11, 1991, 359-394.
- GRAF, K.: Klima und Vegetationsgeographie der Anden. Grundzüge Südamerikas und Pollenanalytische Spezialuntersuchung Boliviens. Schriftenreihe Physische Geographie Universität Zürich, Vol. 19, 1986.
- GROSJEAN, M.: Zur Klimatologie und Paläoökologie des nordchilenischen Altiplano seit dem letzten Kaltzeitmaximum. Geographisches Institut, Universität Bern 1992 (unveröff.).
- GROSJEAN, M., MESSERLI, B. u. SCHREIER, H.: Seenhochstände, Bodenbildung und Vergletscherung im Altiplano Nordchiles: Ein interdisziplinärer Forschungsbeitrag zur Klimageschichte der Atacama. Erste Resultate. In: *Bamberger Geographische Schriften*, Bd. 11, 1991, 99-108.
- HESSE, B.: Archaeological evidence for camelid exploitation in the Chilean Andes. In: *Säugetierkundliche Mitteilungen* 30, 1982, 201-211.
- HURLBERT, S. H. a. CHANG, C. C. Y.: Ancient Ice Islands in Salt Lakes of the Central Andes. In: *Science* 224, No. 46, 1988, 299-302.
- IGBP: Global Change, Report from the IGBP-Meeting for South America. Stockholm, Report Nr. 16, 1991.
- : Past Global Changes Project, Proposed Implementation Plans for Research Activities. Stockholm, Report Nr. 19, 1992.
- KALIN ARROYO, M. T., SQUEO, F. A., ARMESTO, J. J. a. VILLAGRÁN, C.: Effects of aridity on plant diversity in the northern Chilean Andes: Result of a natural experiment. In: *Ann. Missouri Bot. Gard.* 75, 1988, 55-78.
- KESSLER, A.: Zur Rekonstruktion von spätglazialem Klima und Wasserhaushalt auf dem peruanisch-bolivianischen Altiplano. In: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 21, 1985, 107-114.
- : Zur Klimaentwicklung auf dem Altiplano seit dem letzten Pluvial. In: *Freiburger Geographische Hefte* 32, 1991, 141-148.
- LAUER, W.: Zum Wandel der Vegetationszonierung in den Lateinamerikanischen Tropen seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit. In: *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft zu Hannover* 1988, 1-45.
- LAUER, W. u. ERLNBACH, W.: Die tropischen Anden. Geoökologische Raumgliederung und ihre Bedeutung für den Menschen. In: *Geographische Rundschau* 39, 1986, 86-97.
- LLAGOSTERA, A. M.: 9700 years of maritime subsistence on the Pacific: An analysis by means of bioindicators in the North of Chile. In: *American Antiquity* 44, 1979, 309-324.
- MARKGRAF, V.: Paleoclimates in Central and South America since 18 000 B.P. based on pollen and lake level records. In: *Quaternary Science Reviews* 8, 1989, 1-24.

- NUÑEZ, L.: Paleoindian and Archaic Cultural Periods in the arid and semiarid regions of Northern Chile. Adv. In: *World Archeology* II, 1983, 161-203.
- NUÑEZ, L. A. u. SANTORO, C.: Primeros poblamientos en el cono sur de America (XII-IX milenio A.P.). In: *Revista de Arqueología Americana* 1, 1990, 91-139.
- RUTHSATZ, B. u. FISEL, U.: The utilization of natural resources by a small community on the Highlands of Bolivia and its effect on vegetation cover and site conditions. In: *Erdwissenschaftliche Forschung* 18, 1984, 211-234.
- SANTORO, C. M. a. NUÑEZ, L. A.: Hunters of the Dry Puna and Salt Puna in Northern Chile. In: *Andean Past* 1, 1987, 57-109.
- VEIT, M.: Jungquartäre Relief- und Bodenentwicklung in der Hochkordillere im Einzugsgebiet des Rio Elqui (Nordchile, 30° S). In: *Bamberger Geogr. Schriften* 1, 1991, 81-98.
- VUILLE, M.: Die Seen und Salare im nordchilenischen Altiplano. Eine hydrologische Untersuchung mit Landsat/TM- und Landsat/MSS-Daten. Geographisches Institut, Universität Bern 1991 (unveröff.).
- VUILLE, M. u. GROSJEAN, M.: Monitoreo de cambios recientes en el balance del agua en algunos lagos y salares del Altiplano chileno utilizando datos Landsat-MSS y -TM. III. Encuentro nacional en percepción remota, SELPER Chile, 1991, 118-132.
- WEISCHET, W.: Chile. Darmstadt 1970.
- WIRRMANN, D. a. DE OLIVEIRA ALMEIDA, L. F.: Low holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). In: *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.* 59, 1987, 315-323.