

# **Die Zusammensetzung und morphologische Wirksamkeit der Salze in der ariden Höhenregion der Atacama (Chile)**

## **Erste Ergebnisse von Untersuchungen in der Quebrada de las Zorritas am Nordwestabfall des Llullaillaco (6739 m)**

VON

HILMAR SCHRÖDER, MOHSEN MAKKI UND MARIA CIUTURA

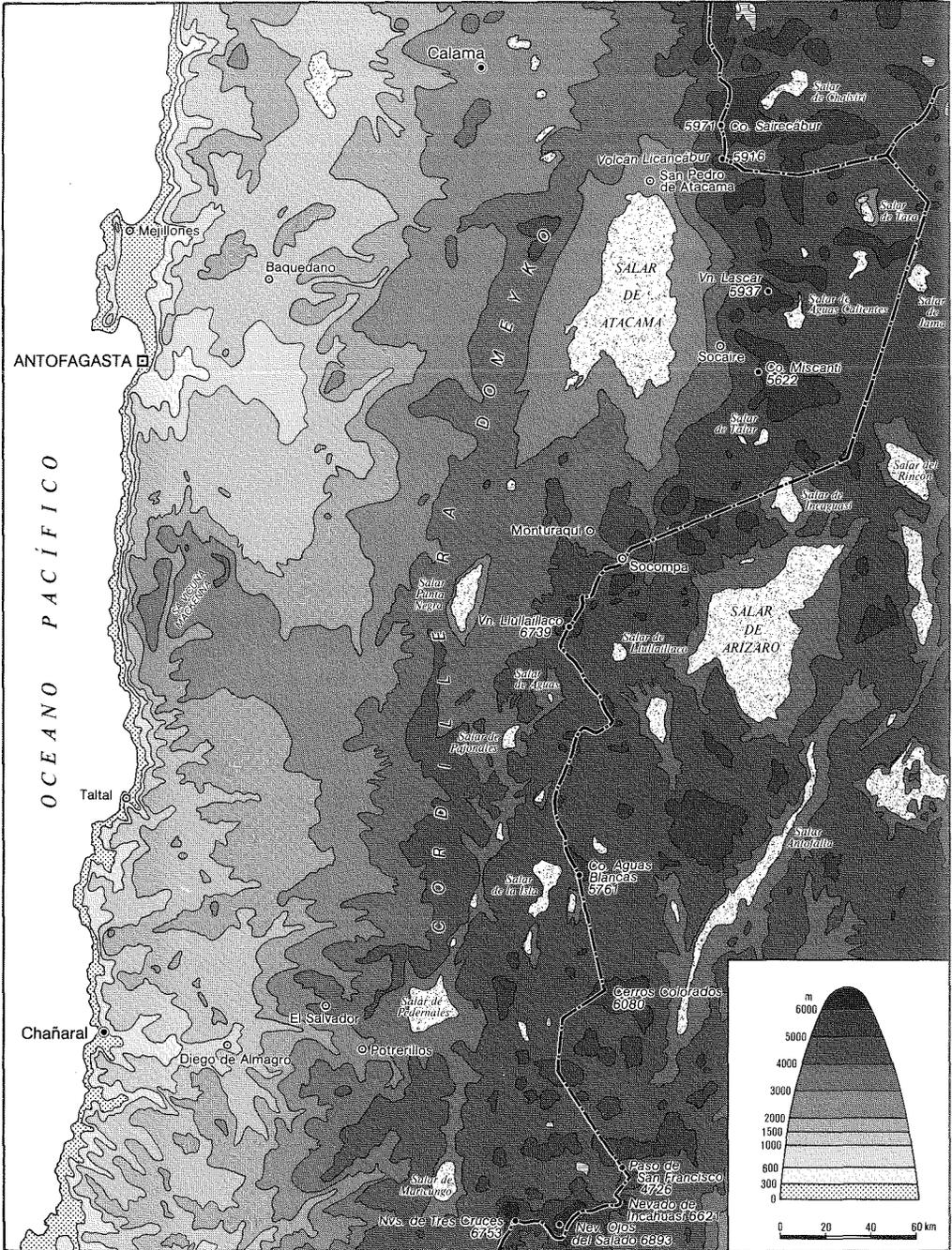
mit 11 Abbildungen, 2 Tabellen und 2 Photobeilagen

### **1 Einleitung**

Die wirtschaftliche Nutzung des Salpeters in der Atacama führte dazu, daß der Norden Chiles allgemein als Salpeterwüste verstanden wird. Deshalb war das wissenschaftliche Interesse auch überwiegend auf den Salpeterbildungsprozeß und damit auf die Nitrate gerichtet (GOUDIE & WATSON 1990). Auch blieben die Untersuchungen zur geomorphologischen Wirksamkeit der Salze auf die untere und mittlere Höhenstufe der Atacama bis ca. 4000 m begrenzt (ABELE 1984), so daß dem Zusammenspiel zwischen Frostwechsel und Salzsprengung bisher wenig Aufmerksamkeit gewidmet worden ist. Mit dem vorliegenden Artikel sollen nunmehr erste Ergebnisse zur Zusammensetzung und zur geomorphologischen Wirksamkeit der Salze in der ariden Höhenregion über 4000 m am Beispiel eines Tales nordwestlich des Llullaillaco (6739 m) vorgestellt werden.

Unter ariden Klimabedingungen, insbesondere in den heißen Trockengebieten unserer Erde, führt der kapillare Aufstieg der sich in Bodenlösungen befindlichen Salze zur sogenannten Tagwasserversalzung in Form von Salzanreicherung in den oberen Schichten der Verwitterungsprodukte. Die Menge der Salze in Oberflächennähe oder an der Oberfläche ist dabei von der Niederschlagsmenge, der Dauer der ariden Klimaverhältnisse, der Reliefposition, der Wasserdurchlässigkeit der Schichten, der geogenen Disposition der Ausgangsmaterialien der Verwitterung, der Zuflußmenge an salzhaltigem Grundwasser und der Menge der gelösten Salze im subterranean Wasser abhängig.

An der Oberfläche anstehende psamitische Sedimente sind dabei relativ salzarm. PACHUR & BRAUN (1982) sehen den Grund dafür einerseits in früher feuchteren Perioden, die selbst unter extrem ariden Bedingungen wie in der Atacama vorgekommen sind (MESSERLI u.a. 1992), und andererseits in den auch rezent auftretenden, wenn auch sehr seltenen kurzfristigen Starkregen. Aufgrund der Grobporigkeit



Nach Atlas de la Republica de Chile 1982

Abb. 1: Die Atacama in Nordchile zwischen Copiapo und Calama

kommt es zur Durchspülung und damit zur nennenswerten Verlagerung der Salze, die durch den fehlenden bzw. gehinderten kapillaren Aufstieg nicht ausgeglichen werden kann.

Die pelitischen Sedimente dagegen wirken z.T. direkt an der Oberfläche als Wasserstauer. Die Poren werden verschlämmt und der Salztransport in die Tiefe kann nicht in ausreichendem Maße stattfinden. Nach Trockenfallen der Flächen kristallisiert das Salz im wesentlichen wieder an der Oberfläche aus.

## **2 Das Arbeitsgebiet (Abb. 1)**

Der Vulkan Llullaillaco (6739 m), auf der chilenisch-argentinischen Grenze gelegen, ist der höchste unvergletscherte Gipfel der Erde. Die Ursache ist darin zu sehen, daß zwischen 24° und 25° südlicher Breite die Trockendiagonale der Atacama den Andenkamm quert. Dieses Phänomen wird von einer Vielzahl von Autoren (LAUER & ERLNBACH 1986, LAUER 1988, GROSJEAN, MESSERLI & SCHREIER 1991, RICHTER & SCHRÖDER 1996) anerkannt, obwohl keine oder nur sehr spärliche Klimadaten aus der Umgebung vorliegen. Der zweithöchste Gipfel Chiles dokumentiert in seinen oberen Stockwerken enorme Aridität. Die thermischen Verhältnisse würden zu großen Vergletscherungen führen; jedoch sind rezent nur kleinflächig Firnfelder vorhanden.

Die enorme Aridität ist einerseits Folge der sehr geringen Jahresniederschlagssummen, die MESSERLI u. a. (1992) mit 20-50 mm angibt – direkte Niederschlagsmessungen liegen bisher nicht vor –, andererseits Folge des wahrscheinlich höchsten Strahlungsgenusses unserer Erde überhaupt. SCHMIDT (1993) ermittelte bei den täglichen Globalstrahlungsmaxima am Sairecabur (22,5° südl. Br. - vgl. Abb. 1) eine außergewöhnlich hohe Einstrahlung – insbesondere in den Sommermonaten – als Folge der Übereinstimmung des sonnennächsten Punktes der Erdumlaufbahn (Perihel, 3. Januar) und dem Sonnenhöchststand (Solstitium, 21. Dezember) mit über 90 % der Solarkonstante (1 367 W/m<sup>2</sup>). SCHROTT (1994) bestätigt diese Größenordnung für den bei 30° südl. Br. gelegenen Sattel Agua Negra. Da der Llullaillaco mit ca. 24°45' südl. Br. zwischen beiden Meßpunkten im Bereich der Trockendiagonale liegt und beträchtlich höher ist, sind Werte der täglichen Globalstrahlungsmaxima von ca. 95 % der Solarkonstante zu erwarten.

Die außerordentliche Trockenheit führt dazu, daß auf der chilenischen Seite mit Ausnahme der Quebrada de las Zorritas (Abb. 2) nur Trockentäler existieren, die rezent lediglich unbedeutende fluvial-morphologische Überprägungen aufweisen.

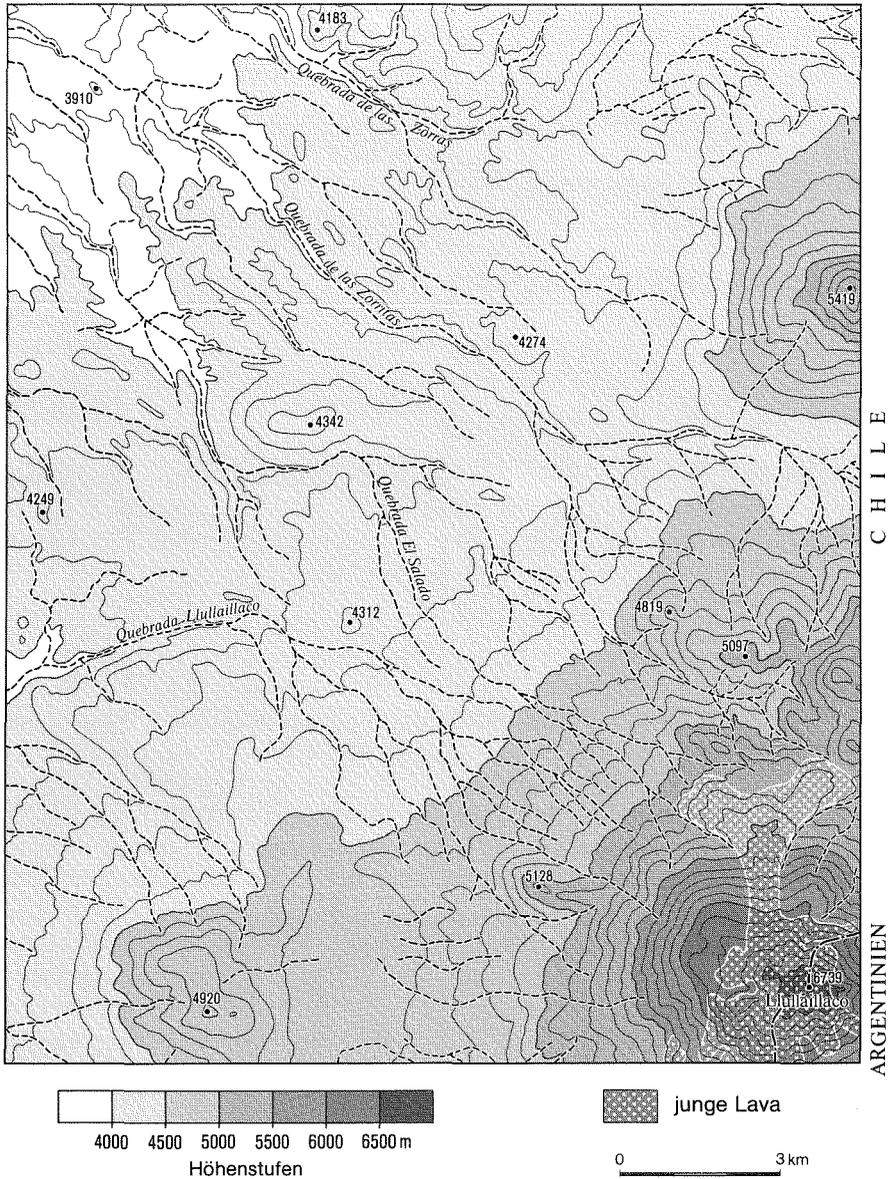


Abb. 2: Der Nordwestabfall des Vulkan Lullillaco (6739 m)

### 3 Geomorphologische Wirkungen der Salze unter extrem trockenen Klimabedingungen

Die hervorragendste Wirkung der Salze ist die Beteiligung an der mechanischen Verwitterung der Gesteine durch Salzsprengung. Die einzelnen Salze haben jedoch sehr stark unterschiedliche Wirkungen. Wie GOUDIE & WATSON (1990) zeigen konnten, sind es vor allem Natriumsulfat, Natriumcarbonat, Natriumnitrat und in abgeschwächter Form Kalziumchlorid, die stark gesteinszerstörend wirken (Abb. 3). Bei dem von ihnen vorgenommenen Laborexperiment wurden gleich große Steinwürfel (wobei sie leider keinerlei Angaben über die Gesteinsart machen) permanent den gleichen physikalischen Verwitterungsprozessen, wie Insolation, Frostsprengung, Durchfeuchtung, Austrocknung und in deren Folge Salzsprengung ausgesetzt. Da die einwirkenden Kräfte auf jeden Steinwürfel identisch waren, können nur die unterschiedlichen Salze für das differierende Ausmaß der Gesteinszerstörung verantwortlich sein. So hatten Natriumsulfat und Natriumcarbonat bereits nach fünf Tagen den gesamten Gesteinswürfel zerstört. Die vergleichbaren Werte für Natriumnitrat lagen bei 12 Tagen und von Kalziumchlorid bei 25 Tagen. Alle anderen Salze und auch Verwitterungsarten, an denen Salze nicht beteiligt waren, führten nur zur teilweisen Zerstörung in den insgesamt 44 Tagen des Experiments. Die anfänglich intensive Wirkung des Magnesiumsulfats endete nach 6-8 Tagen und

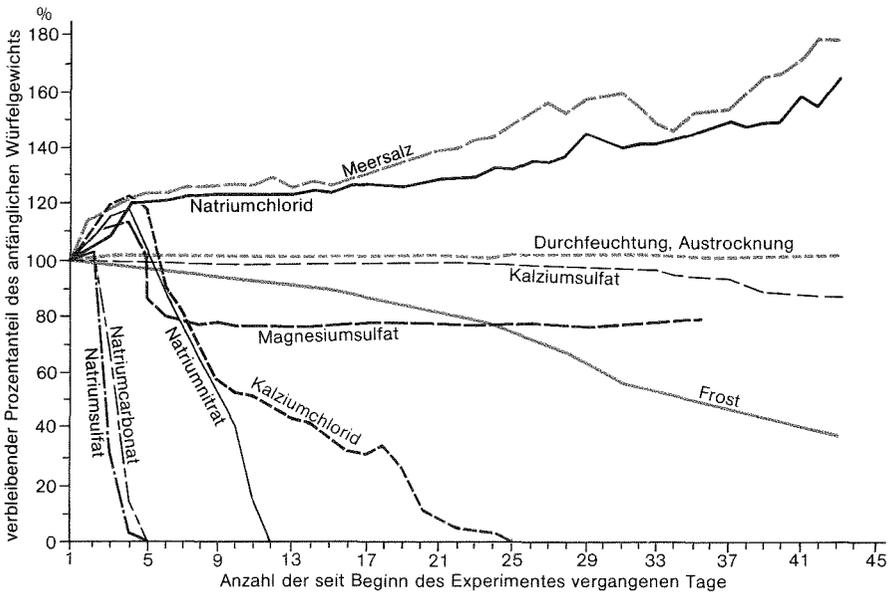


Abb. 3: Auswirkungen physikalischer Verwitterungsprozesse auf gleiche Steinwürfel bei Nutzung diverser Salze

fürhte dann zu einer Stabilisierung. Beim Natriumchlorid war sogar durch den Einbau des Salzes in das Kristallgitter des Gesteins eine Gewichtszunahme zu verzeichnen; trotzdem waren nach Abschluß des Experiments auch beim Natriumchlorid deutliche Verwitterungsspuren zu erkennen, die allerdings nicht zur Zerstörung des Gesteins geführt haben.

Eine zweite geomorphologisch relevante Eigenschaft der Salze ist die Tatsache, daß sie in gelöster Form mit aufsteigendem Kapillarwasser an die Oberfläche transportiert werden und dort auskristallisieren. Unter den extrem ariden Bedingungen in der Umgebung des Lullaillaco erreichen sie die stärksten Oberflächenanreicherungen im Grundwasseraufstiegsbereich der Quebrada de las Zorritas (Beilage, Foto 1). Die niedrigste Terrasse zeigte dabei intensive Polygonbodenbildungen, die auf allen höheren Terrassen nicht oder nur in Ansätzen beobachtet werden konnten. Trotz häufiger Frostwechsel in 4000 m Höhe sind auf grundwasserunbeeinflussten Standorten keine Polygone vorhanden, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Substratsortierung durch Salzkristallisationsprozesse unterstützt wird. Der Anteil der wasserlöslichen Salze am Aufbau der Polygone ist sehr unterschiedlich.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, haben wir im grundwasserbeeinflussten Bereich der Niederterrasse eine Vervielfachung des Salzanteils an der Oberfläche, der auch zur Kristallbildung führt (Beilage, Foto 2). Im grundwasserfreien Bereich der Mittelterrasse liegen die Salzanteile deutlich unter denen der Niederterrasse. Sie nähern sich dem geogenen Grundgehalt, wie er auf der extrem trockenen benachbarten Hochfläche existiert.

Die Salzgehalte zeigen nicht nur eine deutliche höhenwärtige Differenzierung, sondern auch eine Anpassung an die Korngrößenverhältnisse. Die Genese der Polygone führte zu einer Erhöhung der pelitischen Anteile an der Oberfläche und in Oberflächennähe (Tab. 2) bei gleichzeitig steigendem Gehalt an wasserlöslichen Salzen. Die Außenringe der Polygone sind psamitischer als das vergleichbare Polygonzentrum. Der Salzgehalt ist mit 6,13 g/kg im Außenring zwar höher als in den tieferliegenden Schichten des Polygonzentrums, liegt allerdings etwa nur bei einem Siebentel des Salzgehalts an der Oberfläche des Polygonzentrums.

Der kapillare Aufstieg der wasserlöslichen Salze führt in stärker pelitischen Materialien (Polygonzentrum) zu sehr hohen Salzgehalten. Durchspülung hält

Tab. 1: Anteil wasserlöslicher Salze (in g/kg) in Oberflächennähe der Niederterrasse, Mittelterrasse und der Hochfläche in 4000 m Höhe

Tiefe in cm	grundwasserbeeinflusste Niederterrasse	grundwasserfreie Mittelterrasse	Hochfläche
0 - 1	44,55	0,72	0,53
1 - 4	2,37	0,56	-
4 - 8	1,00	0,55	-

Tab. 2: Polygonal differenzierte Korngrößen im Bereich der grundwasserbeeinflussten Niederterrasse in 4000 m Höhe (Spalte 1 der Tabelle 1)

	Polygonzentrum 0 - 1 cm Tiefe	Polygonzentrum 1 - 4 cm Tiefe	Polygonuntergrund unbeeinflusst von Polygonbildung	Polygonaußenring 0 - 1 cm Tiefe
GS	15,1	16,2	31,3	30,5
MS	15,0	16,8	38,2	19,6
FS	14,1	15,6	21,3	15,1
GU	12,5	14,6	3,4	8,3
MU	12,0	8,8	0,9	7,9
FU	9,4	10,4	1,8	7,6
T	22,0	17,6	3,1	11,0

dagegen den Salzgehalt bei dem in Bachniveau liegenden Polygonen in den psamitischeren Außenringen relativ niedrig. Die Folge ist, daß nicht nur die häufigen Frostwechsel, sondern auch der Kristallisationsdruck der Salze die Polygonbildung unterstützen. Vergleichbare Materialien, bei denen kein oder nur ein unbedeutender kapillarer Grundwasseraufstieg beobachtet werden konnte, zeigten keinerlei Polygonbildung.

Eine zusätzliche Eigenschaft der Salze unterstützt das oben Gesagte. Salzminerale dehnen sich aus, wenn zu ihren Kristallstrukturen Wasser hinzugefügt wird. Da einige Salze bei bestimmten Temperaturen in nicht-hydratisierter Form vorliegen, kann also der starke Temperaturwechsel von der Nacht zum Tag zu Ausdehnungserscheinungen führen. Einige häufige Salze der Atacama (vgl. folgendes Kapitel) haben einen Temperaturexpansionskoeffizienten bis zu 300 %.

Die Salze besitzen eine für geomorphologische Prozesse weitere wichtige Eigenschaft. Mit der Zunahme des gelösten Anteils von Salzen im Schmelzwasser sinkt aufgrund der Gefrierpunktniedrigung beim Einsickern des Salzes auf den Permafrost die Bindungswahrscheinlichkeit des Wassers an den Permafrost. Dies bedeutet, daß eigentlich segregativ fixierbare Wässer neigungsbedingt wieder austreten können, so daß Bodenschliff entsteht. Zu diesem geomorphologischen Prozeß ist eine Versuchsreihe in Vorbereitung.

Die letzte erwähnenswerte Eigenschaft der Salze mit geomorphologischer Relevanz ist die hohe Disposition gegenüber äolischem Transport. Dazu wurden bisher keinerlei Untersuchungen durchgeführt.

#### 4 Die Arten der Salze und deren Verteilung im Bachlängsprofil

Bei terrestrischen Salzabscheidungen, wie sie die Bildungen in der Atacama darstellen, kann davon ausgegangen werden, daß es sich um Verwitterungslösungen der im Einzugsbereich (unter Vernachlässigung des äolischen wasserscheiden-

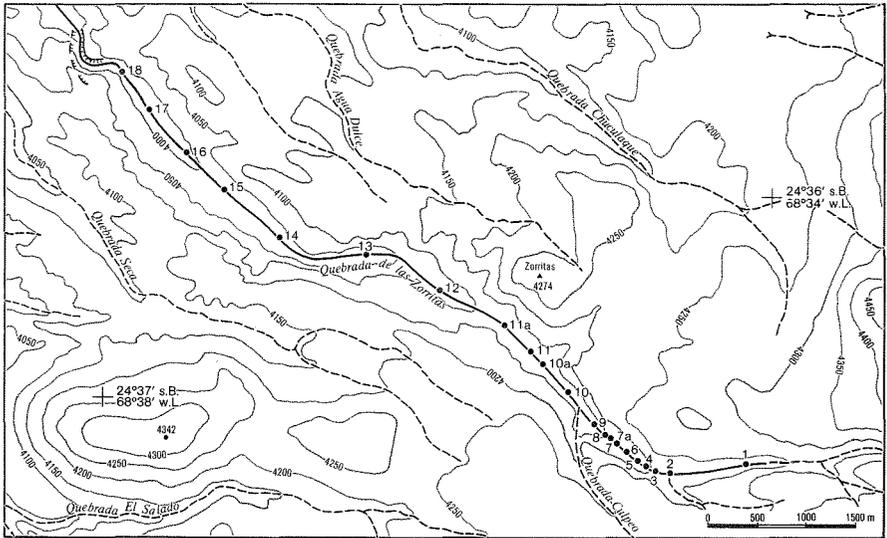


Abb. 4: Beprobungspunkte in der Quebrada de las Zorritas

übergreifenden Transports) anstehenden Gesteine handelt. Als evaporitisch-terrestrische Salzbildungen können sie als Salzausblühungen oder Salzkrusten, in Salzsümpfen oder Salzpfannen und in Salzseen auftreten. In dem untersuchten Bereich der Quebrada de las Zorritas (Abb. 4) treten alle Formen mit Ausnahme des Salzsees auf. Der zur Quebrada de las Zorritas gehörende Salzsee ist in 2 950 m Höhe der in ca. 35 km Entfernung befindliche Salar Punta Negra (vgl. Abb. 1).

Methoden der Salzbestimmung  
Röntgendiffraktometrie:<sup>\*)</sup>

Die Methode nutzt die Tatsache aus, daß die Beugung von Strahlung im Röntgenbereich für eine bestimmte kristalline Substanz typisch ist. Die Salze liegen in kristalliner Substanz vor und werden pulverisiert. Grundlage bildet die Erfahrung, daß das Röntgendiffraktionsmuster einer kristallinen Substanz im Sinne eines „finger prints“ einzigartig ist. Zur Aufnahme des Diffraktionsmusters wird die pulverisierte Probe einer monochromatischen Strahlung ausgesetzt und die Beugungsmuster werden registriert. Die Linienpositionen und die relativen Intensitäten dienen zur Identifizierung der Substanz. Der Diffraktionswinkel wird durch einen bestimmten Satz von Ebenen im Kristall bestimmt und die Abstände  $d$  aus der bekannten Wellenlänge und dem gemessenen Winkel berechnet. Die Identifizierung des Kristalls erfolgt dann nach dem Pulverdiffraktometrieschlüssel von CHEN (1977). Die Bestimmung des Gehalts an wasserlöslichen Salzen erfolgt nach SCHLICHTING & BLUME 1966, Methode 553, S. 105, sowohl bei Wasser- als auch bei Feststoffproben.

\* Die Verfasser danken Herrn Dr. Stefan Krumm, Geologisches Institut Erlangen, für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Röntgendiffraktometrie.

*Die Zusammensetzung und morphologische Wirksamkeit der Salze*

SULFATE:	Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$
	Anhydrit	$\text{CaSO}_4$
	Thenardit	$\text{NaSO}_4$
	Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{H}_2\text{O}$
	Epsomit	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$
CHLORIDE:	Steinsalz (Halit)	$\text{NaCl}$
KARBONATE:	Aragonit	$\text{CaCO}_3$
	Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Soda	$\text{NaCO}_3 \times 10 \text{H}_2\text{O}$
	Trona	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{NaHCO}_3 \times 2 \text{H}_2\text{O}$
NITRATE:	Natronsalpeter	$\text{NaNO}_3$
	Kalisalpeter	$\text{KNO}_3$
BORATE:	Kernit	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 4 \text{H}_2\text{O}$
	Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$
	Colemantit	$\text{Ca}_6\text{B}_6\text{O}_{11} \times 5 \text{H}_2\text{O}$
	Ulexit	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \times 8 \text{H}_2\text{O}$

*Abb. 5: Die wichtigsten terrestrischen Evaporite der Quebrada de Las Zorritas*

Von den nach MATTHES (1990) wichtigsten Mineralen der terrestrischen Evaporite (vgl. Abb. 5) treten nur vier ubiquitär in Mengen auf, die mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie quantifizierbar sind. Dies sind Thenardit  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Halit  $\text{NaCl}$ , Gips  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  und Trona  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Während Thenardit, Halit und Gips größeren Schwankungen unterliegen, verhält sich Trona im gesamten Verlauf der Quebrada de las Zorritas außerordentlich konstant. Die Werte liegen mit Ausnahme der Probe 14 immer zwischen 5 % und 6 %. In der Probe 14 werden anteilig 13 % erreicht, bei gleichzeitigem Ausfall von Thenardit und einem Maximum an Halit. Die Beprobung fand in der Nähe eines Grundwasseraustritts statt, der höchstwahrscheinlich durch die unmittelbar vor unserer Ankunft stattfindende Schneeschmelze gespeist wurde und deshalb von den anderen Proben stark abweicht. Die Gleichverteilung von Trona über den gesamten beprobten Teil zeigt, daß die Zusammenhänge mit den anderen drei Hauptvertretern der Salze unbedeutend sind oder sogar ausgeschlossen werden können. Thenardit ist das anteilig am stärksten vorkommende Salz in der Quebrada de las Zorritas (Abb. 6). Im oberen Teil konnten überwiegend zwischen 40 und 50 % gemessen werden. Der durchschnittliche Anteil fällt flußabwärts um etwa 10 %. Das entgegengesetzte Verhalten zeigt das Halit (Abb. 7). Während wir im oberen Teil mit Ausnahme der Proben 2, 8 und 9 fast immer Anteile unter 5 % vorfinden, liegen sie ab der Probe 11a deutlich darüber. Mit dieser Probe erreicht der Bach einen Salzsumpf, in dem die Fließbewegung deutlich reduziert ist und große Wassermengen sogar in pfannenartigen Hohlformen über unterschiedlich lange Zeiten zum Stillstand kommen.

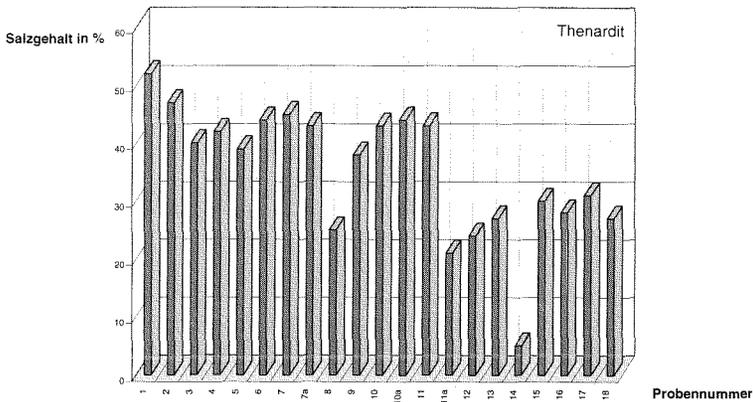


Abb. 6: Prozentualer Thenarditanteil in der Quebrada de las Zorritas

Diese Stillwasserverdunstungsbedingungen führen dazu, daß sich der Halitanteil in den Proben um das 3- bis 4-fache erhöht. Dies könnte auch die Ursache für das deutliche Abweichen der oben genannten drei Proben darstellen. Ein nicht in die Dynamik des Bachlaufes einzuordnendes Verhalten zeigt dagegen der Gips (Abb. 8). Er tritt nur in Abhängigkeit von Thenardit und Halit auf. Wenn eine der beiden Komponenten stark reduziert ist oder gar ausfällt, ist der Gips überdurchschnittlich stark repräsentiert.

Die restlichen bedeutenden Minerale terrestrischer Evaporite erreichen in allen Proben keine 5 %. Sie können zwar über die „finger prints“ angesprochen werden, jedoch ist eine quantitative Auswertung nicht möglich. In ihrer Summe erreichen sie jedoch beträchtliche Werte und liegen mit dem Minimum bei 13 % und dem Maxi-

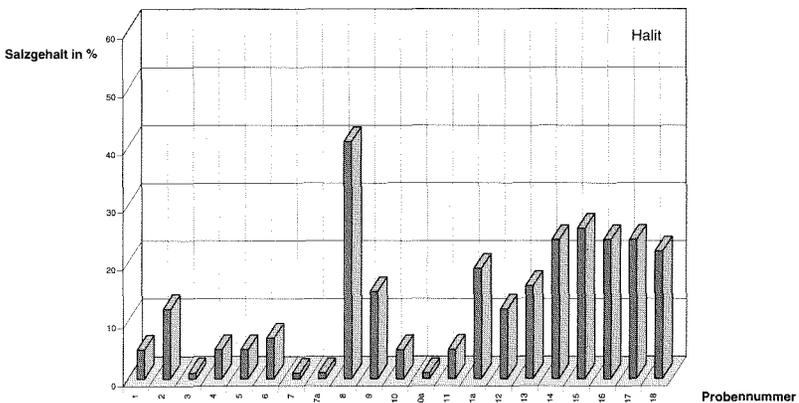


Abb. 7: Prozentualer Halitanteil in der Quebrada de las Zorritas

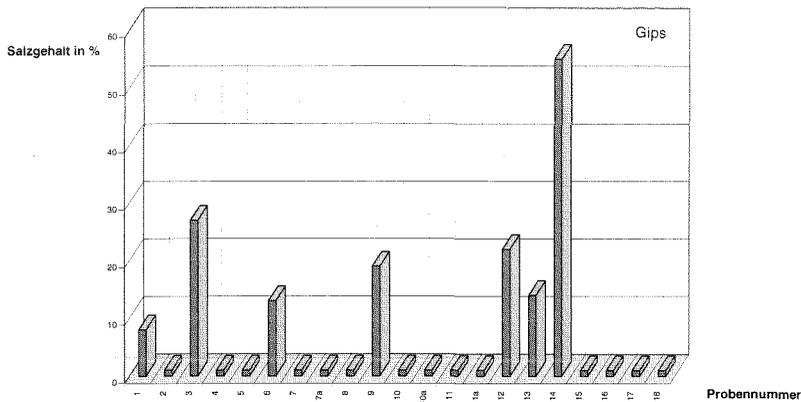


Abb. 8: Prozentualer Gipsanteil in der Quebrada de las Zorritas

mum bei 64 %, überwiegend jedoch zwischen 20 % und 50 %. Überraschend ist, daß sowohl Borate mit Kernit, Borax, Ulexit und Colemanit, als auch die Nitrate mit Natronsalpeter und Kalisalpeter nicht in quantifizierbaren Mengen auftreten. Die im Einzugsgebiet der Quebrada de las Zorritas vorhandenen Dazite, Andesite und Ignimbrite (GARDEWEG, CORNEJO & DAVIDSON 1984, GARDEWEG, RAMIREZ & DAVIDSON 1993) müssen also primär nitrat- und boratarm sein. Ebenso spielt in Höhen über 4000 m der Salpeterbildungsprozeß, der ansonsten auf die besonderen klimatischen Bedingungen zurückgeführt wird, keine Rolle mehr. Nach MATTHES (1990) kommt es durch die in Wüstenstaub reichlich vorhandenen Kondensationskerne zu ständigen statischen Entladungen der Lufterlektrizität, bei denen der Stickstoff der Luft zu Salpetersäure oxidiert und in Nebeltropfen niedergeschlagen wird. Mit den Ionen des Verwitterungsschutts können sich so Nitrate bilden, die durch Lösung und Wiederausfällung zwar angereichert, jedoch nicht weggeführt werden. In größeren Höhen kann davon ausgegangen werden, daß sowohl der Anteil an Staubpartikeln, die als Kondensationskerne fungieren, als auch das Niederschlagen der Nebeltropfen stark reduziert ist, so daß der oben beschriebene Prozeß nicht oder nur sehr untergeordnet stattfindet.

## 5 Fluvialer Transport der Salze

Da der Bach in der Quebrada de las Zorritas während des Geländeaufenthaltes im September/Oktober 1995 das einzige Fließgewässer im Bereich des Llullaillaco war und aufgrund der in diesem Jahr gerade eingetretenen Schneeschmelze, gehen wir davon aus, daß zum Zeitpunkt der Beprobung ein relativ starker Abfluß stattfand. Dies wiederum bedeutet, daß zwar in der Anfangsphase verstärkt Salze gelöst und transportiert werden, daß sich aber nach einigen Tagen bei anhaltendem starken Abfluß ein Verdünnungseffekt einstellt. Die Messung und Überprüfung erfolgte am



Abb.9: Der Llullaillaco von Nordwesten mit aktueller Schneegrenze am 21.09.1995 in 4 600m Höhe

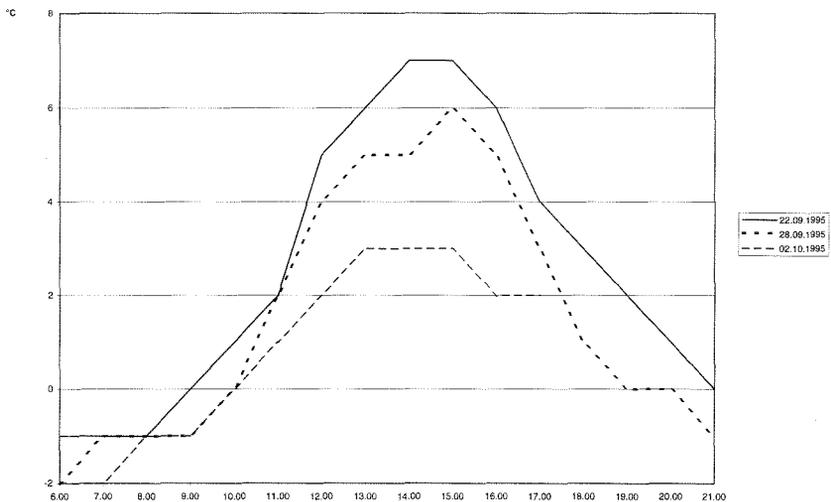


Abb. 10: Tagesverlauf der Wassertemperaturen am 22.09.1995, 28.09.1995 und 02.10.1995 in 4 130 m Höhe

Am 2.10. herrschte ganztägig eine geschlossene Bewölkung, die dazu führte, daß die Wassertemperaturen wesentlich geringer anstiegen. Einsetzender Schneefall führte zum Abbruch der Messung.

28. September, nachdem ein Niederschlag vom 12. September bis in etwa 4000 m Höhe zu einer geschlossenen Schneedecke führte, die bis zum 19. September vorhanden war. Im Verlauf der nächsten Woche taute bzw. verdunstete der Schnee auf den Fußflächen, so daß nur noch Reste in Höhenlagen ab etwa 4600 m zurückblieben. Die Schneebedeckung am 21. September zeigt Abb. 9. Während der Beprobung am 28. September wurde in 4130 m Höhe an einem vorhandenen Querschnitt die Gesamtabflußmenge von 4,1 l/s mit einem Salzgehalt von 1,2 g/l gemessen. Dies entspricht einer transportierten Salzmenge von 4,9 g/s, 17,2 kg/h bzw. 414,7 kg/d (24 h). Dies bedeutet, daß in Richtung Salar de Punta Negra bei gleichbleibender Konzentration und Wassermenge rund 151,4 t/a Salze transportiert werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Wassertemperatur von 3°C, die dem Durchschnitt des Tagestemperaturverlaufs im Bach der Quebrada de las Zorritas entspricht (Abb. 10). Durch das Tageszeitenregime und den hohen Strahlungsgenuß treten nur etwa 1 km nach dem Quellenaustritt bei Strahlungswetterlagen Temperaturamplituden von 8°C/d auf.

Von den am Durchfluß ermittelten Salzmenigen erreichen im Jahreszyklus nur sehr geringe Anteile den Salar de Punta Negra. Die bei weitem überwiegende Salzmenge wird im Unterlauf der Quebrada de las Zorritas akkumuliert. Durch die hohe Verdunstung steigt schon im Oberlauf die Konzentration der gelösten Salze beträchtlich. In einer Höhe von 3950 m werden schon Konzentrationen von 1,8 g/l gemessen (Abb. 11).

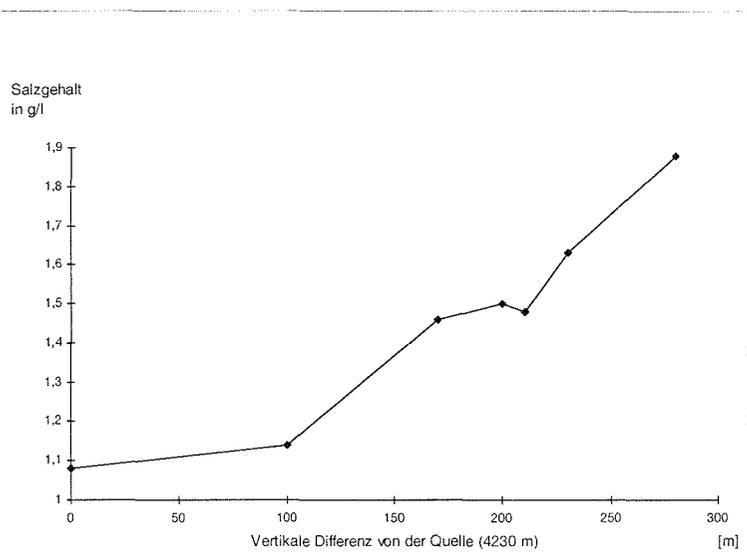


Abb. 11: Anteil der gelösten Salze (in g/l) im Bach der Quebrada de las Zorritas

## 6 Zusammenfassung

Die Salze der Quebrada de las Zorritas sind, mit Ausnahme geringer Anteile, die durch äolischen Transport hereingeweht wurden, geogenen Ursprungs. In den Daziten, Andesiten und Ignimbriten des nordwestlichen Llullaillaco sind dabei die Borate und Nitrate nur in untergeordneten Konzentrationen vorhanden. Die wichtigste Salzart ist der Thenardit. Er kommt mit Abstand am häufigsten und in hohen Konzentrationen vor. Ebenfalls bedeutend und nahezu ubiquitär verteilt ist das Halit. Ein sehr unterschiedliches Verhalten dagegen zeigen Trona und Gips. Während Trona in fast allen Proben in gleichbleibender Konzentration auftritt, ist der Gips nur in wenigen Proben mit sehr unterschiedlichen Konzentrationen vertreten.

Neben der Beteiligung der Salze an der Verwitterung durch Salzsprengung konnte ein sehr differenziertes Verhalten in Polygonböden nachgewiesen werden. Die psamitischen Außenringe zeigen deutlich geringere Konzentrationen als die pelitischen Innerbereiche. Da auf nicht grundwasserbeeinflussten Standorten in 4 000 m Höhe keinerlei Polygonböden zu beobachten waren, liegt der Schluß nahe, daß nicht nur der fast tägliche Frostwechsel ursächliche Bedingung für die Polygonbildung sein kann, sondern daß die hohen Konzentrationen an Salzen den Prozeß der Substratdifferenzierung zumindest unterstützen.

Durch einen Durchfluß in 4 130 m Höhe werden im zeitigen Frühjahr etwa 400-420 kg/d transportiert. Dies entspricht rund 150 t/a. Der überwiegende Teil wird dabei im Unterlauf des Baches der Quebrada de las Zorritas akkumuliert. Darauf weist die Verdoppelung der Konzentrationszunahme bei nur 280 m Höhenunterschiede hin.

## Literatur

- ABELE, G. 1984: Oberflächenformen in der chilenischen und peruanischen Wüste unter dem Einfluß von Salzgehalt und Niederschlag. - Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, 11/12: 1497-1509.
- CHEN, P.Y. 1977: Table of Key Lines in X-ray Powder Diffraction Patterns of Minerals in Clays and Associated Rocks. Dep. Nat. Res. Geol. Survey, 21, Bloomington, Indiana.
- GARDEWEG, M., P. CORNEJO & J. DAVIDSON 1984: Geología del Volcan Llullaillaco, Altiplano de Antofagasta, Chile. In: Rev. Geol. Chile, 23, Santiago de Chile: 15-31.
- GARDEWEG, M., C.F. RAMIREZ & J. DAVIDSON 1993: Mapa Geológico del Area del Salar de Punta Negra y del Volcan Llullaillaco. Servicio Nat. Geol. y Minería. Santiago de Chile, 5.
- GOUDIE, A.S. & A. WATSON 1990: Desert geomorphology. Mcmillan, London.
- GROSJEAN, M., B. MESSERLI & H. SCHREIER 1991: Seenhochstände, Bodenbildung und Vergletscherung im Altiplano Nordchiles: Ein interdisziplinärer Beitrag zur Klimageschichte der Atacama. Erste Resultate. In: Bamberger Geograph. Schr., 11, Bamberg: 95-108.
- LAUER, W. 1988: Zum Wandel der Vegetationszonierung in den Lateinamerikanischen Tropen seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit. In: Jb. Geogr. Ges. Hannover: 1-45.
- LAUER, W. & W. ERLÉNACH 1986: Die tropischen Anden. Geoökologische Raumgliederung und ihre Bedeutung für den Menschen. In: Geogr. Rundschau, 39: 86-97.

- MATTHES, S. 1990: Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Berlin, Heidelberg, New York.
- MESSERLI, B. u.a. 1992: Die Veränderungen von Klima und Umwelt in der Region Atacama (Nordchile) seit der letzten Kaltzeit. In: Erdkunde, 46: 257-272.
- PACHUR, H.J. & G. BRAUN 1982: Aspekte paläoklimatischer Befunde in der östlichen Zentralsahara. In: Geomethodica, 7, Basel: 23-54.
- RICHTER, M. & H. SCHRÖDER 1996: Remarks on the Paleoecology of the Atacama basing on the latest distribution patterns. In: Bamberger Geogr. Schr. (im Druck).
- SCHLICHTING, E. & H.D. BLUME 1966: Bodenkundliches Praktikum. Hamburg, Berlin.
- SCHMIDT, D. 1993: Klimaökologie Atacama. Projektteil Klimatologie. Forsch.ber., Erlangen.
- SCHROTT, L. 1994: Die Solarstrahlung als steuernder Faktor im Geosystem der subtropischen semiariden Hochanden (Agua Negra, San Juan, Argentinien). Heidelberger Geogr. Arb., 94.

