BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

ABHANDLUNGEN · NEUE FOLGE HEFT 96

WERNER ZEIL

Das Fumarolen- und Geysir-Feld westlich der Vulkangruppe des Tatio (Provinz Antofagasta, Chile)

Mit 22 Abbildungen im Text und auf 10 Tafeln

Vorgelegt von Herrn Albert Maucher
am 4. Juli 1958

MÜNCHEN 1959

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
IN KOMMISSION BEI DER C. H. BECK'SCHEN VERLAGSBUCHHANDLUNG

Druck der C. H. Beck'schen Buchdruckerei Nördlingen
Printed in Germany

INHALT

Resumen-Zusammenfassung 5

1. Einleitung 5

2. Der geologische und morphologische Rahmen 6

3. Art und Ausmaß der postvulkanischen Tätigkeit 8

4. Herkunft des Wassers und Wasserchemismus 11

5. Die festen Mineralausscheidungen 12

6. Schriften 14

Tafeln I–X 15

RESUMEN

Durante investigaciónes realizadas como huésped – investigador de la Universidad de Chile en Santiago, tuve en 1956, ocasión de estudiar, por encargo del Sr. Rector Don Juan Gomez Millas, el campo de geysires y fumarolas ubicado en la alta cordillera de Antofagasta, un poco al Oeste del grupo volcánico del Tatio.

Este campo de actividad postvulcanica está limitado al Este por estratovolcanes jóvenes, y al Oeste por una cubierta de efusiones dacíticas más viejas. Se dan an conocer: la situación exacta y algunos datos geólogicos del área.

La actividad está reducida principalmente a tres focos dentro del área total, en la que en Septiembre de 1956 fueron constatadas: 72 fumarolas, 40 geysires, 62 fuentes calientes, 13 solfataras, y 5 fuentes de barro. Este caso constituye el ejemplo más importante de actividad postvulcánica conocido hasta ahora en las cordilleras sudamericanas.

Las aguas son de origen vadoso y tienen, a la salida del campo principal de actividad, un gasto de 119 litros por segundo; estas aguas constituyen una de las fuentes del río Salado.

En el informe se proporcionan análisis de muestras de aguas de los geysires y de los minerales depositados dentro del campo por estas aguas. Las depositaciones sólidas están constituídas principalmente por geyseritas de ópalo y cantidades menores de sal común (halita). La presencia de algas azules, bacterias de hierro, como también de pequeñas cantidades de combinaciones inorganicas de hierro, es causa de una intensa coloración.

Un grupo escogido de fotos permite obtener una impresión del tamaño y forma de este proceso postvulcánico.

Durante el trabajo de terreno, me asistieron los Señores Erik Klohn H. y Arturo Thomas N., del Instituto de Geología de la Universidad de Chile. Agradezco también al Director del Instituto de Geología, Don Jorge Muñoz Cristi, por su interés en el progreso del conocimiento de este problema.

ZUSAMMENFASSUNG

Westlich der Vulkangruppe des Tatio in der Hochkordillere der Provinz Antofagasta (Chile) liegt eine Verebnung in 4200 m Höhe, in der zur Zeit verschiedene postvulkanische Prozesse ablaufen. Im September 1956 waren dort 72 Fumarolen, 40 Geysire, 62 Thermen, 13 Kohlensäuerlinge und 5 Schlammtöpfe tätig.

Die genaue Lage und einige geologische Daten aus der Umgebung dieses vermutlich größten Fumarolen- und Geysir-Feldes der südamerikanischen Kordilleren werden mitgeteilt.

Angaben über den Wasserhaushalt und den Wasserchemismus, sowie über den Aufbau der festen Mineralausscheidungen geben zusammen mit einigen ausgewählten Bildern einen ersten Einblick in dieses bisher fast unbekannte Vorkommen.

1. EINLEITUNG

Während einer Gastforscher-Tätigkeit an der Universidad de Chile in Santiago im Jahre 1956 wurde ich von Rektor Sr. Don Juan GOMEZ MILLAS gebeten, meine Ansicht als Geologe über eine praktische Verwertung eines Gebietes mit postvulkanischer Tätigkeit in der Hochkordillere der Provinz Antofagasta darzulegen. Bei einer ersten Erkundung im April 1956 zeigte es sich, daß die bis zu diesem Zeitpunkt bekannten spärlichen Unterlagen über dieses Vorkommen völlig ungenügend waren. Mein Vorschlag, das Fumarolen- und Geysir-Feld mit seinem Rahmen zu kartieren und genau zu untersuchen, fand die Zustimmung und bereitwillige Unterstützung meiner chilenischen Gastgeber.

Die Geländearbeiten wurden im September 1956 durchgeführt. Die chilenische Luftwaffe stellte ein Transportflugzeug zur Verfügung und übernahm verschiedene Erkundungsflüge sowie mehrere Luftaufnahmen. Als Assistenten unterstützten mich im Gelände die Herren Erik KLOHN H. und Arturo THOMAS N. vom Instituto de Geología der Universidad de Chile. Eine Anzahl chemischer Analysen wurde von der chemischen Abteilung des Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales der Universidad de Chile unter Leitung von Chefchemiker Hugo COLOMER durchgeführt, während einige Gesteinsproben im Institut für anorganische Chemie der Universität München durch die freundliche Vermittlung von Prof. Dr.-Ing. E. WIBERG untersucht wurden.

Für das große Interesse und die verständnisvolle Hilfe bei der Vorbereitung der Expedition danke ich den Herren J. GOMEZ MILLAS, Rektor der Universidad de Chile, und E. THOMAS, Direktor des Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales der Universidad de Chile.

2. DER GEOLOGISCHE UND MORPHOLOGISCHE RAHMEN

Das Fumarolen- und Geysir-Feld liegt dicht an der chilenisch-bolivianischen Grenze im Norden der Provinz Antofagasta (Abb. 1 und 2). In der modernen Literatur wurde es von J. BRÜGGEN (1943) zum erstenmal erwähnt. Der Verfasser hatte jedoch keine Möglichkeit, genaue eigene Beobachtungen und Messungen vorzunehmen, da er sich wegen Transportschwierigkeiten und des Mangels an Stützpunkten nur einige Stunden in der lebensfeindlichen Hochgebirgswüste aufhalten konnte. BRÜGGEN (1943, S. 4/5) erwähnt einige ältere Notizen von A. BERTRAND (1884) und L. SUNDT (1909), in denen jeweils kurze Angaben über postvulkanische Tätigkeit im Raum der Puna de Atacama ohne genauere Ortsangaben gemacht werden. Auch BRÜGGEN selbst (1943, S. 1) gibt nur eine ungefähre Lage des Vorkommens an.

Das Fumarolen- und Geysir-Feld liegt in einer 4200 m hoch gelegenen Depression (Abb. 2), die sich zwischen den jungen Stratovulkanen der nordchilenischen Hochkordillere im Osten und den etwas älteren Dazitergüssen im Westen erstreckt. Unmittelbar im Osten ragt eine Reihe hoher Einzelvulkane auf. Von Süden nach Norden sind dies (Abb. 2):

Vulkan Tatio (5314 m),

Cerros del Tatio (eine Anzahl Einzelvulkane mit Höhen zwischen 5280 bis 5570 m),

Vulkan El Volcán (5560 m),

Vulkan Deslinde (5651 m).

Nähere Einzelheiten über diese Andesitvulkane, die dem „finalen" Vulkanismus der Anden angehören und deren Hauptaktivität an der Grenze Pliozän/Pleistozän gelegen haben dürfte, habe ich in einem anderen Zusammenhang dargestellt (ZEIL 1959). Diese Stratovulkane sind heute weitgehend erloschen, nur vereinzelt sind in Kraternähe noch Solfataren tätig.

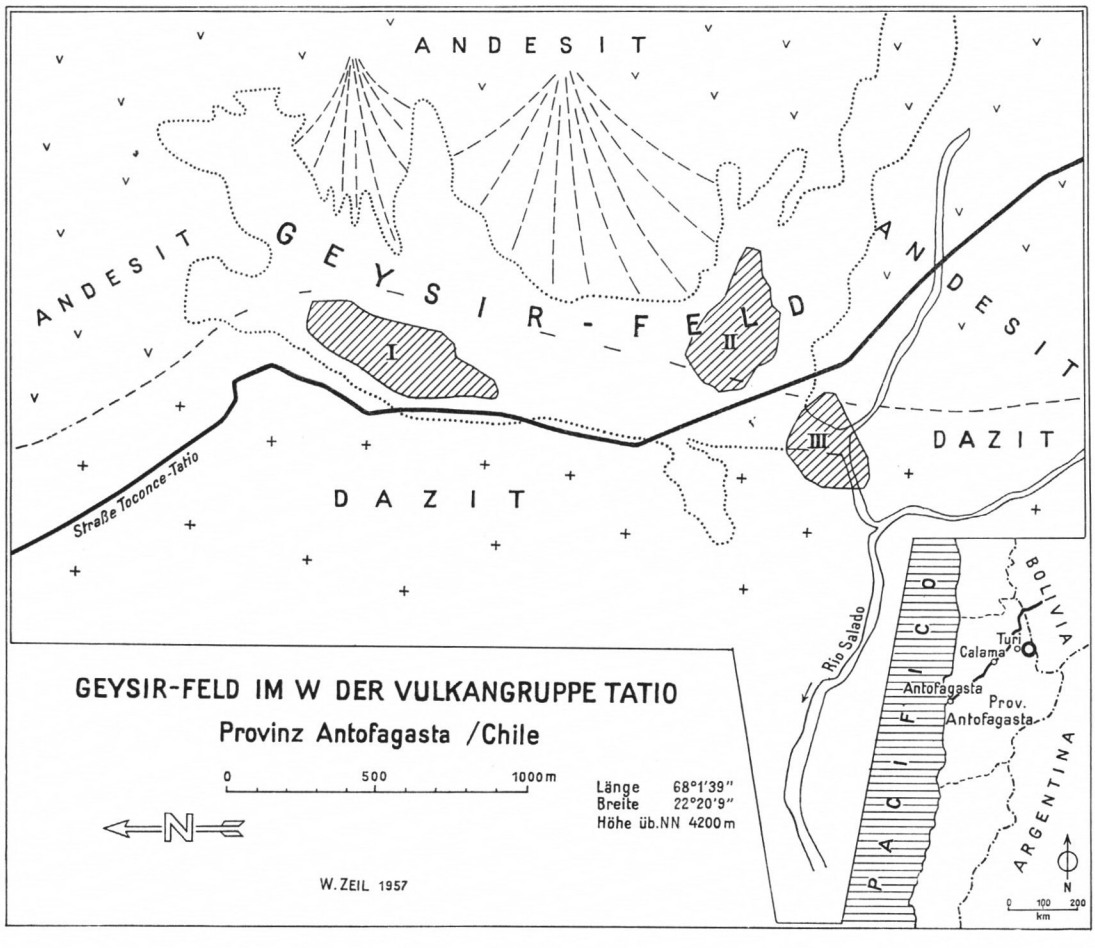

Abb. 1: Geologische Skizze des Fumarolen- und Geysir-Feldes westlich der Vulkan-Gruppe des Tatio. Die Felder I, II und III innerhalb der punktierten Verebnung entsprechen Zonen besonders heftiger Tätigkeit (Stand September 1956)

Im Westen des Feldes (Abb. 1 und 2) liegen nach Gefüge, Zusammensetzung und Alter andersartige Vulkanite vor. Hier beginnt der Bereich ausgedehnter Dazitergüsse, die bisher unter dem Sammelbegriff „formación liparitica" (BRÜGGEN 1950, MUÑOZ CRISTI 1956) bekannt waren. Sie besitzen im Raum der mittleren Anden eine riesige Verbreitung. J. BRÜGGEN (1950, S. 268) schätzt, daß diese sauren Laven allein im chilenisch-bolivianischen Bereich 110000 km² bedecken. Einige charakteristische Ausschnitte dieser „subsequenten" Deckenergüsse, die vermutlich zwischen Miozän und Pliozän entstanden sind, vermitteln Tafel I, Bild 1 und Tafel X, Bild 2.

Die Dazite bilden im Südwesten und Nordwesten des Geysir-Feldes langgestreckte, S–N verlaufende Bergzüge, die ebenfalls beachtliche Höhen erreichen (Abb. 2). Der Zug Alto Ojo de Cablor, mit 4570 bis 4690 m, der Cerro Copacoya mit 4812 und der Loma Crucero mit 4341 m bilden die unmittelbare Begrenzung der Verebnung mit postvulkanischer Tätigkeit.

Die Erstreckung von Süden nach Norden (Abb. 1) deutet an, daß die Dazite aus langgestreckten Spalten ausströmten, die wiederum in ihrer Anlage und Richtung bedeutenden Dehnungs-Strukturen im andinen Bau entsprechen. Allerdings ist eine eindeutige Aussage über die Natur dieser jungen Bruchstrukturen vor allem im Gebiet der Hochkordillere der Provinz Antofagasta nicht möglich, da der junge Vulkanismus mit Laven und Lockerprodukten einen dichten Schleier über den älteren Bau des Gebirges gelegt hat. Die Morphologie der Salare in Nord-Chile wie auch die Form der Verebnung westlich der Cerros del Tatio (Abb. 1) deuten jedoch die Abhängigkeit der Depressionen von vorgezeichneten tektonischen Lineamenten an.

Neben dem hier beschriebenen Fumarolen- und Geysir-Feld gibt es in der näheren Umgebung weitere Vorkommen mit postvulkanischer Tätigkeit, die allerdings nirgends ein größeres Ausmaß erreicht. So konnte ich Fumarolen etwa 100 km nordwestlich in den Ojos de San Pedro südlich des Vulkans San Pedro (6063 m) sowie etwa 170 km nördlich vom Vulkan Tatio im Südteil des Salars von Ascotán beobachten. Stärkere Solfataren waren im Jahre 1956 im Kraterbereich von 4 Vulkanen zwischen dem Salar von Atacama und dem Salar von Ascotán tätig (Zeil 1959, Abb. 1).

Der geologische Rahmen des Gebietes wird – wie oben angedeutet – ausschließlich von jungen Vulkaniten gebildet. Aus den Flanken des Vulkans Tatio sind letzte Lavamassen vermutlich noch im Holozän ausgeströmt. Ihre Zusammensetzung ist mehr basaltisch, also kieselsäureärmer als die der älteren Andesitkegel. Sie überlagern in Form von riesigen Zungen deutlich die älteren Dazitergüsse im Westen.

In diese fast horizontal angelagerten sauren Decken haben verschiedene Flüsse – von der Hochkordillere im Osten ausgehend – Cañons mit senkrecht abfallenden Steilrändern eingeschnitten. Die Quellzuflüsse des Rio Salado (Abb. 1 und 2) entspringen zum Teil im Fumarolen- und Geysir-Feld.

Das Feld wird unmittelbar im Osten von gewaltigen Schuttfächern begrenzt, die vom Fuß der Vulkane ausgehen und neben den Eis- und Schneeresten als wesentliches Wasserreservoir für die postvulkanischen Erscheinungen dienen.

Die Hochgebirgswüste in der Umgebung des Geysirfeldes ist unbewohnt, abgesehen von dem Arbeitslager der Schwefelmine am Vulkan Tatio.

3. ART UND AUSMASS DER POSTVULKANISCHEN TÄTIGKEIT

Im September 1956 habe ich die postvulkanischen Erscheinungen westlich des Tatio eingehend untersucht. Die wenigen älteren Angaben in der Literatur vermitteln auch nicht annähernd einen Eindruck von dem Ausmaß der Aktivität. Da entsprechende Geräte nicht zur Verfügung standen, konnten wir lediglich die Zusammensetzung des Dampfes der Fumarolen nicht analysieren.

Zunächst ist auffallend, daß in drei Zonen der Verebnung besonders heftige Tätigkeit herrscht, während im übrigen Bereich des Feldes nur vereinzelt postvulkanische Prozesse

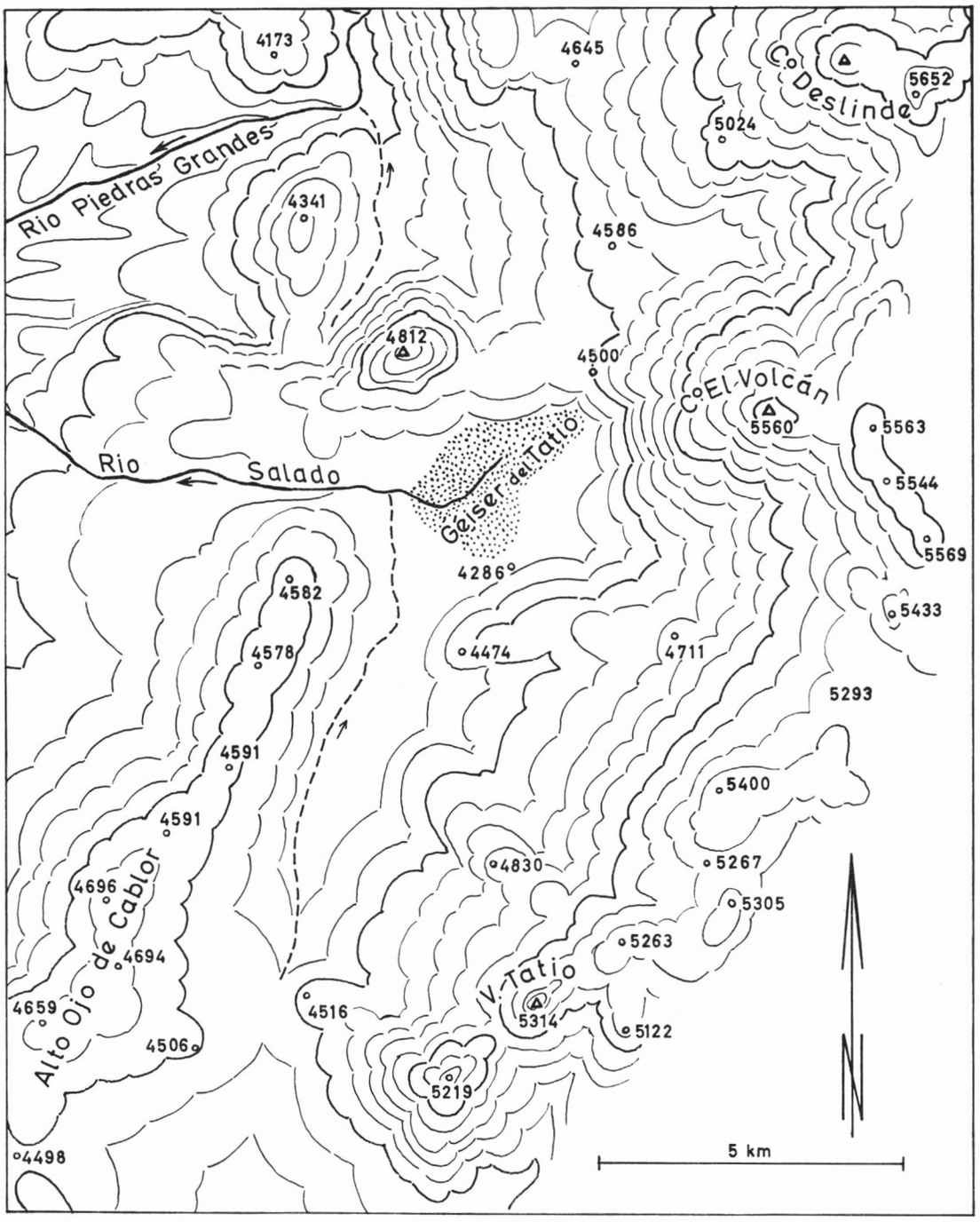

Abb. 2: Topographische Skizze des Fumarolen- und Geysir-Feldes in der chilenischen Hochkordillere. Im Osten junge Stratovulkane, im Westen lineare Dazitergüsse (siehe Text)

ablaufen. Feste Mineralabscheidungen und verlassene Geysir-Steigrohre zeigen aber an, daß früher auch in anderen Teilen des Feldes Fumarolen und Geysire tätig waren. Typisch für alle postvulkanischen Erscheinungen ist ja ein periodisches Ansteigen und Abflauen, ferner das mehr oder weniger plötzliche Erlöschen an einem Ort und das Aufflackern an einem anderen. Die Skizze (Abb. 1) hebt die drei Bereiche mit konzentrierter Tätigkeit innerhalb des Feldes besonders heraus, wobei betont werden muß, daß hier der Stand vom September 1956 festgehalten ist.

Die heftigste Tätigkeit konnte ich jeweils am Vormittag zwischen 7 und 10.30 Uhr feststellen. Im weiteren Verlauf des Tages habe ich immer ein deutliches Abflauen registriert. Erst am späten Nachmittag ließ sich wieder ein stärkeres Ansteigen der Tätigkeit beobachten. Im einzelnen hat aber jede Dampfquelle, jeder Geysir und jeder Schlammtopf seinen eigenen Rhythmus, wenn auch wieder Zusammenhänge zwischen einzelnen Gruppen vorhanden sind.

Innerhalb der drei Zonen (Abb. 1) haben wir folgende Einzelprozesse erfaßt:

Zone I:

37 Fumarolen (Dampfquellen, Taf. II, Bild 1, Taf. III, Bild 1),
16 Geysire (Springquellen mit 1 bis 3 m hohem Wasserausstoß, Taf. VII, Bild 1),
33 Thermen (Taf. VII, Bild 2),
8 Kohlensäuerlinge;

Zone II:

15 Fumarolen (Taf. II, Bild 1 und 2, Taf. III, Bild 2),
5 Geysire (Taf. IV, Bild 2, Taf. V, Bild 2, Taf. VI, Bild 1 und 2),
14 Thermen,
5 Kohlensäuerlinge;

Zone III:

10 starke und 10 schwache Fumarolen (Taf. IV, Bild 1),
6 größere und 13 kleinere Geysire (Taf. V, Bild 1),
15 Thermen,
5 Schlammtöpfe (Taf. VIII, Bild 2).

Im gesamten Feld waren demnach im September 1956 tätig:

72 Fumarolen,
40 Geysire (darunter größere mit 3 bis 4,5 l/sec. Wasserausstoß und kleinere mit 1 l/sec.),
62 Thermen,
13 Kohlensäuerlinge,
5 Schlammtöpfe.

Damit ist dieses Feld westlich der Vulkangruppe des Tatio das größte bisher bekannte Vorkommen mit postvulkanischer Tätigkeit in den südamerikanischen Kordilleren.

Das vaporide Stadium der Dampfquellen, deren Temperaturen meist etwas über 100 Grad Celsius liegen, ist besonders in den frühen Morgenstunden deutlich ausgeprägt (Taf. II, Bild 1 und 2), während die gasförmige Tätigkeit im weiteren Verlauf des Tages merklich nachläßt. Die stärkste Fumarole (Taf. III, Bild 2) in Zone II war während der gesamten Beobachtungszeit fast ununterbrochen tätig. Vereinzelte Fumarolen konnte ich noch 3 bis 4 km im Osten außerhalb des Feldes beobachten. Auch am Westabfall der Vulkangruppe Cerros del Tatio sind zwischen 4500 und 5000 Meter einzelne Dampfquellen tätig.

Von den 40 Geysiren liegen die stärksten in den Zonen II und III. Die an der Oberfläche gemessenen Wassertemperaturen betragen zwischen 81 und 86 Grad Celsius. Die größte Höhe eines Wasserausstoßes von 4 m haben wir an zwei Geysiren der Zone II gemessen. Zahlreiche verlassene Geysir-Steigrohre (Taf. X, Bild 1) zeigen ein vielfältiges Verlagern der unterirdischen Wasserwege an. Besonders eindrucksvoll ist die Fumarolen- und Geysir-Tätigkeit in Zone III. Dort – an der Grenze des Feldes – treten die Springquellen vereinzelt innerhalb des Rio Salado auf.

An den Thermen und Kohlensäuerlingen (Taf. VII, Bild 2) wurden Temperaturen zwischen 41 und 62 Grad Celsius gemessen. Die Gasentwicklung ist zum Teil sehr stark. Gas und Wasser treten gemischt auf.

In den Schlammtöpfen (Taf. VIII, Bild 2) beträgt die mittlere Temperatur an der Oberfläche 48 Grad Celsius. Es handelt sich um Schlammsprudel, in denen es zum Aufsprudeln des mit Gas vermischten heißen Schlammes kommt. Geysirartige Phänomene in den Töpfen waren während der Beobachtungszeit nicht zu sehen.

In den Abflüssen des Feldes – die vorwiegend in den Oberlauf des Rio Salado entwässern – haben wir mit abnehmender Entfernung von der Verebnung Temperaturen zwischen 32 und 17 Grad Celsius gemessen. Dabei ist zu bedenken, daß die Lufttemperaturen in der Höhe von über 4000 m ziemlich niedrig sind.

4. HERKUNFT DES WASSERS UND WASSER-CHEMISMUS

Die Frage nach dem Ursprung des Wassers bei postvulkanischen Erscheinungen war lange Zeit stark umstritten. An sich ist eine Entscheidung, ob es sich um Tiefenwasser (juveniles Wasser) oder Oberflächenwasser (vadoses Wasser) handelt, in Gebieten mit jungem Vulkanismus in manchen Fällen schwer einwandfrei zu treffen. Untersuchungen aus der jüngsten Zeit in verschiedenen Gegenden der Erde ergaben, daß am Zustandekommen von postvulkanischen Prozessen in erster Linie Oberflächenwasser beteiligt ist.

Das Wasser im Geysir-Feld westlich der Tatiogruppe ist mit Sicherheit zum weitaus größten Teil Oberflächenwasser. Die Kartierung in der weiteren Umgebung ergab, daß das Oberflächenwasser zum Teil aus den Abhängen der Vulkane im Osten und den davon ausgehenden Schuttströmen (Abb. 1) stammt. Ferner gehen unmittelbare Abflüsse von kleinen Eis- und Firnfeldern aus, die an den Westhängen der Cerros del Tatio in Höhen zwischen 4900 bis 5200 m liegen. Das Oberflächenwasser wird nach der teilweisen Versickerung im Bereich des Geysir-Feldes ziemlich oberflächennah aufgeheizt, löst dabei aus vorwiegend andesitischen Gesteinen verschiedene Elemente und Verbindungen und wird schließlich in Dampf- und Wasserform ausgestoßen.

Der ständige Abfluß im Südosten des Fumarolen- und Geysir-Feldes, der einen erheblichen Anteil der Quellzuflüsse des Rio Salado bildet, wurde von uns an mehreren Tagen und zu verschiedenen Zeiten genau kontrolliert. An den vier wesentlichen Abflüssen haben wir von Norden nach Süden folgende Durchschnittswerte gemessen:

Abfluß 1: 26 l/sec.
Abfluß 2: 17 l/sec.
Abfluß 3: 70 l/sec.
Abfluß 4: 6 l/sec.

Durchschnittlich fließen aus dem Feld demnach ungefähr 119 l/sec. ab, wobei natürlich mit erheblichen Schwankungen zwischen Tag und Nacht, wie auch während der verschiedenen Jahreszeiten zu rechnen ist.

Die chemische Analyse verschiedener Wasserproben von Geysiren, Thermen und den Flüssen der Umgebung erbrachte folgendes Bild:

Proben-Nr.	Temp. in Grad C	p_H-Wert	H_3BO_3 g/l	SiO_2 g/l	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$ g/l	CaO g/l
1	85	7,31	1,05	0,32	0,016	0,28
5	81	7,34	1,03	0,32	0,038	0,26
8	86	6,72	0,76	0,22	0,016	0,24
9	81	7,31	1,05	0,35	0,028	0,28
14	82	7,90	0,56	—	—	—
16	85	7,21	0,70	0,21	0,026	0,24
17	85	6,98	0,76	0,20	0,027	0,25
3	41	5,96	1,02	0,27	0,022	0,28
12	62	6,51	0,00	0,11	0,005	0,077
15	32	7,95	0,23	0,14	0,007	0,076
26	15	8,06	0,063	—	—	0,0092

Die Proben 1 mit 17 wurden unmittelbar an tätigen Geysiren entnommen, die Proben 3 und 12 stammen aus Thermen ohne Gasentwicklung, Probe 15 vom Abfluß im Südosten des Geysir-Feldes und Probe 26 aus dem Rio Loa, ungefähr 50 km nordwestlich des Geysir-Feldes. In den Wasserproben aus den Geysiren fällt der ziemlich gleichbleibende p_H-Wert, sowie die relativ hohen Gehalte an H_3BO_3 und SiO_2 auf. Die gelösten Stoffe, die wohl überwiegend aus Plagioklas und Hornblende führenden Andesiten und andesitischen Tuffen im Untergrund des Geysir-Feldes stammen, werden noch innerhalb des Feldes selbst an der Oberfläche weitgehend wieder ausgeschieden.

Die Temperaturen und der Chemismus des Wassers entsprechen annähernd dem alkalischen Quellentyp, den R. A. Sonder (1941) aus Island, und den alkalischen Arealen, die A. L. Day & E. T. A. Allen (1935) von den heißen Quellen des Yellowstone-Parkes in Nordamerika beschrieben haben.

5. DIE FESTEN MINERALAUSSCHEIDUNGEN

Der Boden des gesamten Fumarolen- und Geysir-Feldes westlich der Tatiogruppe ist zum größten Teil von weißen Absonderungen bedeckt, die nach den Analysen in der Hauptsache aus Kieselsinter (Opal) bestehen. Diese Opal-Geyserite treten in den verschiedensten Formen und Strukturen auf. Größere Areale werden von lagen- und terrassenförmigen Krusten bedeckt (Taf. IX, Bild 2), an anderen Stellen sind die Wandungen von verlassenen Geysir-Steigrohren mit Opal-Geyserit verkleidet (Taf. X, Bild 1), auch kommen traubig-nierige Krusten vor (Taf. IX, Bild 1); schließlich werden aus dem gleichen Material große muschelartige Körper aufgebaut (Taf. VI, Bild 1) oder zapfen- und kaskadenähnliche Formen verkleiden den Rand eines Geysirs (Taf. VIII, Bild 1). An einigen Stellen

des Feldes herrschen intensiv rote, orange, schwarzgrüne und gelbe Farben in bunten Mischungen vor, die vorwiegend durch Blaualgen und Eisenbakterien erzeugt werden. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel bietet Taf. VI, Bild 2. Hier ist der schwarzgrüne Besatz von Blaualgen an einem Kieselsinter-Terrassenrand in bestimmter Entfernung von dem tätigen Geysir zu sehen.

Die Untersuchung einiger Opal-Geyserite ergab folgende chemische Zusammensetzung:

Proben-Nr.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Glüh-Verlust, geschätzt
1	69,94	0,48	0,80	2,58	0,20	1,34	16,49
4	83,80	1,24	0,32	3,36	0,22	2,07	7,99
10	71,70	1,31	2,07	3,70	0,56	1,62	6,84
11	82,24	0,96	0,48	2,96	0,22	1,75	10,66
21	79,72	0,66	1,28	3,81	0,39	0,25	13,17
22	80,50	1,66	1,92	3,25	0,47	0,17	11,63
19	62,98	3,17	6,23	3,70	0,39	1,77	15,43

Die Probe Nr. 19 fällt aus dem Rahmen der übrigen Proben durch den hohen Eisen- und Aluminiumgehalt heraus. Die Probe ist im Gegensatz zu den anderen weißen Geyseriten intensiv grün gefärbt. Es handelt sich hier wohl um eine Fe-Konzentration durch Mitwirkung von Eisenbakterien.

In einzelnen Proben sind in Spuren Sn, K, Ti und Li vorhanden.

10 verschiedene Proben von Opal-Geyseriten hat freundlicherweise Prof. Dr. F. Kirchheimer, Geologisches Landesamt in Baden-Württemberg, im UV-Licht untersucht. Dabei ergaben sich keine Anzeichen einer auf einen nennenswerten Urangehalt deutenden Fluoreszenz.

Die Übereinstimmung mit älteren Analysen von Opal-Geyseriten aus Island, die T. F. W. Barth (1950, S. 47) mitteilt, ist groß. Lediglich der Ca-Gehalt ist bei den Proben vom Tatio erheblich größer. Dies ist zweifellos auf den hohen Prozentsatz von Ca-reichen Plagioklasen zurückzuführen, die im Untergrund und in der Umgebung des Geysir-Feldes am Tatio anstehen.

An einzelnen Stellen des Feldes kommt es außerdem zum Niederschlag eines stark verunreinigten bis ziemlich reinen Steinsalzes. Es sind weiße Krusten, deren Oberfläche aus feinen Nadeln besteht. Die chemische Untersuchung einiger Proben ergab:

Proben-Nr.	SiO_2	Al_2O_3	Fe	Ca	Cl	H_3BO_3	Na_2O	K_2O
7	1,07	0,93	Spur	1,35	53,45	2,63	41,53	1,81
2	58,02	2,72	0,33	0,32	15,84	2,09	12,14	1,45

In Probe 7 sind dazu noch in Spuren As und Li enthalten.

Ferner wurde ein tiefroter, feuchter Überzug eines Geyserites untersucht, da der Verdacht auf einen bedeutenden Fe-Gehalt bestand. Die Analyse ergab:

SiO_2	Al_2O_3	Fe	Ca	Cl	H_3BO_3	Na_2O	K_2O
41,78	5,20	6,86	2,85	5,01	2,57	4,49	0,96

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, daß aus dem Untergrund des Fumarolen- und Geysir-Feldes, der vorwiegend aus Vulkaniten andesitischer Zusammensetzung aufgebaut wird, mit Hilfe alkalischer Quellen ein umfangreicher Stofftransport stattfindet. An der Oberfläche werden dabei in der Hauptsache Opal-Geyserite und in geringem Umfang Steinsalz ausgeschieden. In diesen chemischen Ablauf schalten sich Blaualgen und Eisenbakterien ein. Abscheidungen von Schwefel wurden im Bereich des Feldes nicht beobachtet, andere färbende Elemente, wie z. B. As, sind nur in Spuren vertreten.

Vor allem die Zusammensetzung der Opal-Geyserite stimmt gut mit den Ergebnissen überein, die T. F. W. Barth (1950) und R. A. Sonder (1941) aus Island, A. L. Day & E. T. A. Allen (1935) im Yellowstone-Park gewonnen haben. Der geologische Untergrund westlich der Tatiogruppe bedingt als wesentliche Abweichung einen relativ hohen Ca-Gehalt.

6. SCHRIFTEN

Barth, T. F. W.: Volcanic Geology, Hot Springs and Geysers of Iceland. – Carnegie Inst. Washington, Publ. 587, Washington 1950.

Bertrand, A.: Memoria sobre las cordilleras del desierto de Atacama. – Santiago de Chile 1885.

Bloss, F. D. u. Barth, T. F. W.: Observations on some Yellowstone Geysers. – Bull. Geol. Soc. Amer., 60, 5, S. 861–886, New York 1949.

Brüggen, J.: Los Geisers de los Volcanes del Tatio. – Imprenta Universitaria, 21 S., Santiago de Chile 1943.

Fundamentos de la Geología de Chile. – Instituto Geogr. Militar, Santiago de Chile 1950.

Day, A. L. & Allen, E. T. A.: Hot Springs of the Yellowstone Park. – Carnegie Inst. Washington, Publ. 466, S. 164–267, Washington 1935.

Fix, P. E.: Nomenclature of geyser eruptions. – Journ. Geol. 47, 99–104, Chicago 1939.

Muñoz Cristi, J.: Chile. In: Handbook of South American Geology. – Geol. Soc. Amer., Memoir 65, S. 191–214, New York 1956.

Sonder, R. A.: Studien über heiße Quellen und Tektonik in Island. – Vulkaninstitut I. Friedländer, 2, Zürich 1941.

Sundt, L.: Estudios geológicos y topográficos del Desierto y Puna de Atacama. – 2 Teile, Santiago de Chile 1909.

Taylor, D.: Analyse des Wassers des großen Geysirs auf Island. – Z. f. allgem. Erdk., Neue Serie, I, S. 457 bis 459, Berlin 1856.

Zeil, W.: Geysire und Fumarolen in den Anden Nordost-Chiles. – Photographie u. Wissenschaft, 6, 3/4, S. 9–11, Leverkusen 1957.

Junger Vulkanismus in der Hochkordillere der Provinz Antofagasta (Chile). – Geol. Rundsch., 48, 1, Stuttgart 1959.

Zies, E. G.: The Valley of Ten Thousand Smokes. – Nat. Geogr. Soc., Technical Papers, I, 4, 79 S., Washington 1929.

TAFELN

Bild 1: Blick von Turi nach Osten auf Dazit-Ergüsse („subsequenter" Vulkanismus).
Im Hintergrund jüngere Strato-Vulkane.

Bild 2: Rio Salado unterhalb des Fumarolen- und Geysirfeldes.
Im Hintergrund links Cerro El Volcán (5560 m), rechts Vulkane der Tatio-Gruppe.
Diese Vulkane gehören dem „finalen" Vulkanismus der Anden an.

TAFEL II

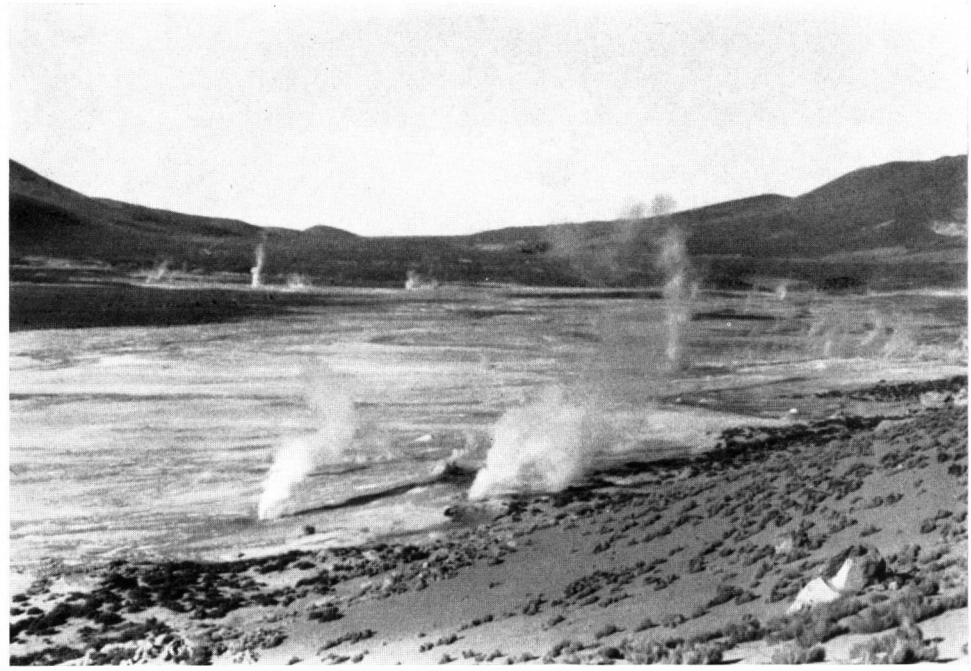

Bild 1: Blick von Norden auf das Fumarolen- und Geysir-Feld.
Tätigkeit um 8.30 Uhr am Morgen. Im Vordergrund Zone I, im Hintergrund Zone II.

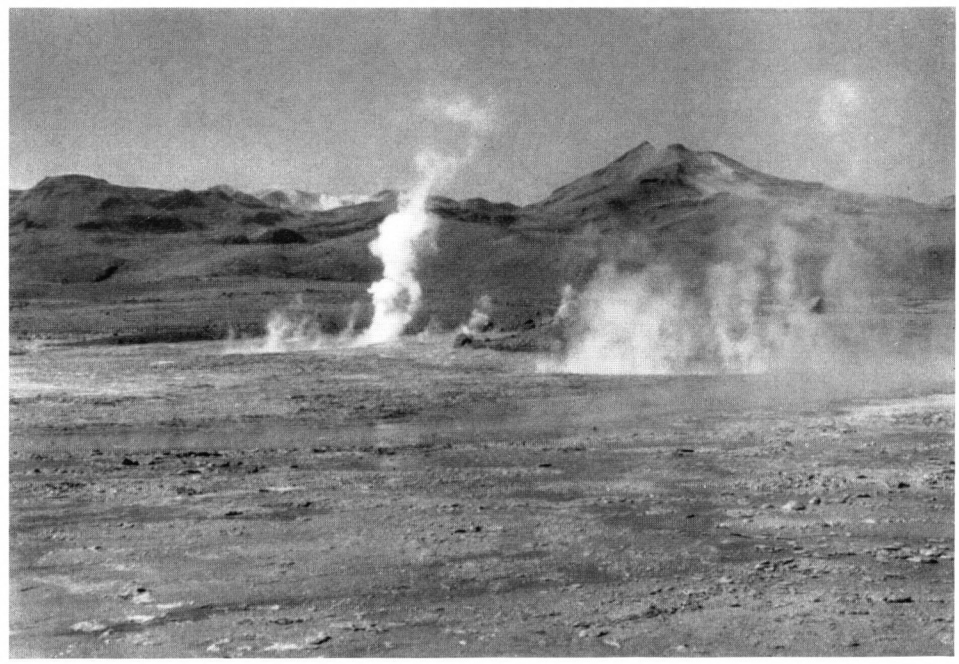

Bild 2: Fumarolen-Tätigkeit in Zone II, im Hintergrund ein Vulkan
der Reihe Cerros del Tatio mit 5569 m.

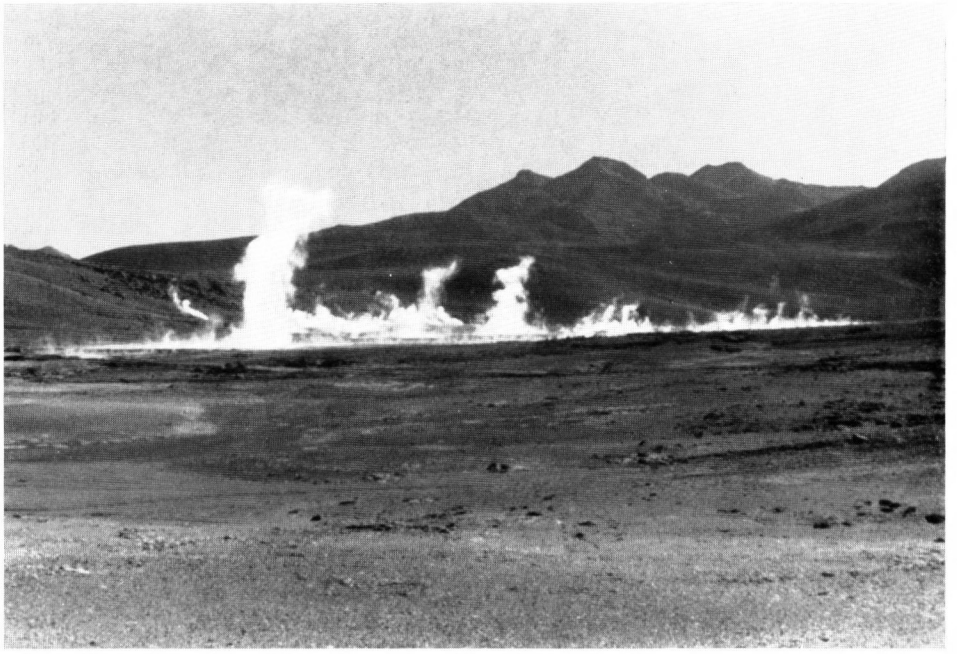

Bild 1: Fumarolen-Tätigkeit in Zone I, im Hintergrund Vulkan Deslinde (5651 m).

Bild 2: Große Fumarole in Zone II.

TAFEL IV

Bild 1: Fumarolen-Tätigkeit in Zone III. Hier liegen einzelne Fumarolen und Geysire innerhalb des Rio Salado.

Bild 2: Geysir in Zone II mit Absonderung von Opal-Geyserit, im Hintergrund Vulkan der Reihe Cerros del Tatio.

Bild 1: Geysir in Zone III,
im Hintergrund links Andesit-Vulkane der Reihe Cerros del Tatio.

Bild 2: Geysir in Tätigkeit,
mit Absonderung von Opal-Geyserit und Steinsalz (Zone II).

TAFEL VI

Bild 1: Geysir in Zone II mit muschelförmiger Opal-Abscheidung.
Im Hintergrund die hellen Farben der Schwefel-Lagerstätte Tatio.

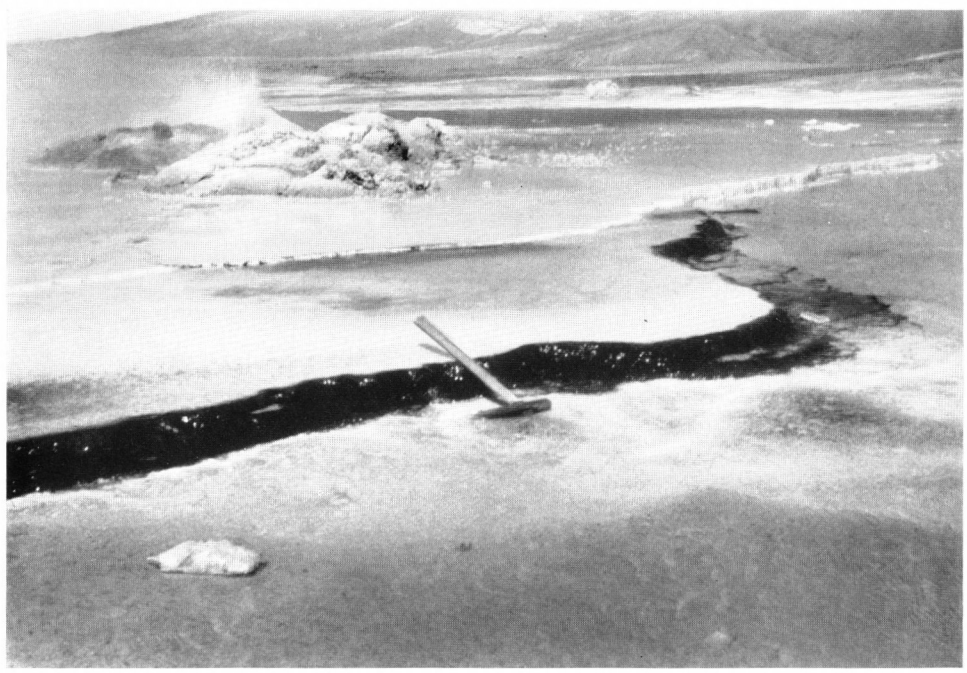

Bild 2: Geysir in Zone II mit verschiedenen Terrassen von Opal.
Am Rand der vorderen Terrasse Belag von schwarzgrünen Blaualgen.

Bild 1: Geysir in Zone I mit Abscheidung von Opal und Steinsalz.

Bild 2: Therme mit heftiger Kohlensäure-Entwicklung in Zone I.

TAFEL VIII

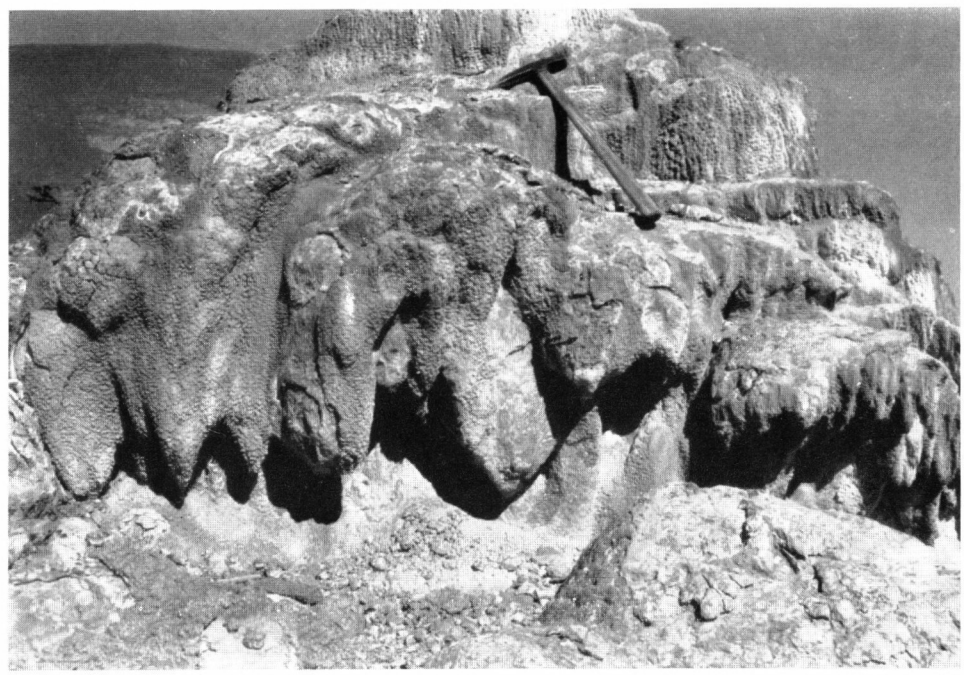

Bild 1: Kaskadenartige Opal-Bildung um ein verlassenes Geysir-Steigrohr in Zone I.

Bild 2: Schlamm-Topf in Tätigkeit (Zone III).

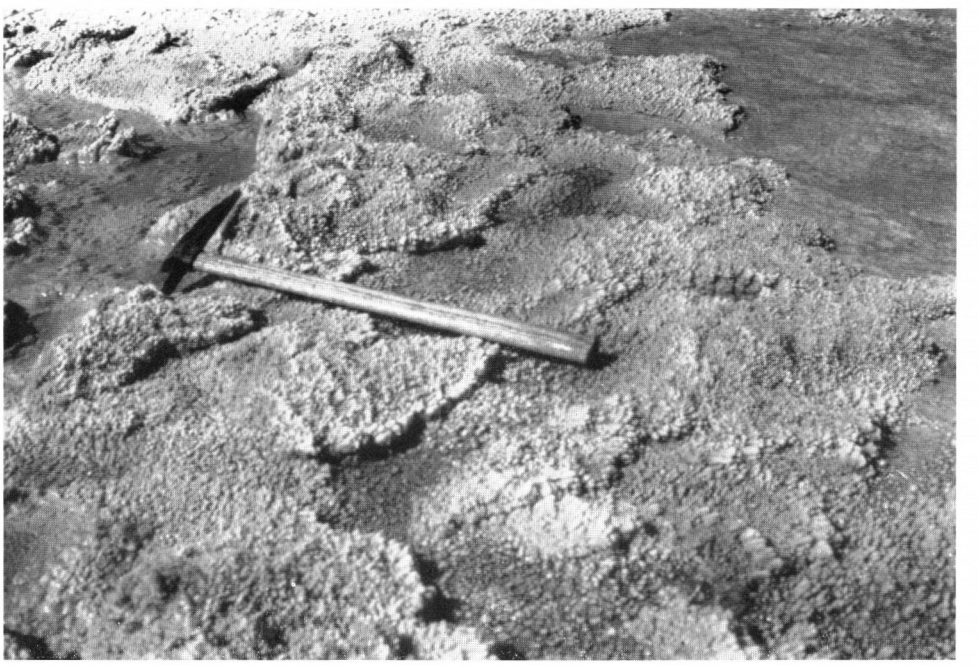

Bild 1: Traubige Abscheidung von Opal-Geyserit in Zone II.

Bild 2: Terrassenartige Ausscheidung von Opal-Geyserit in Zone III.

TAFEL X

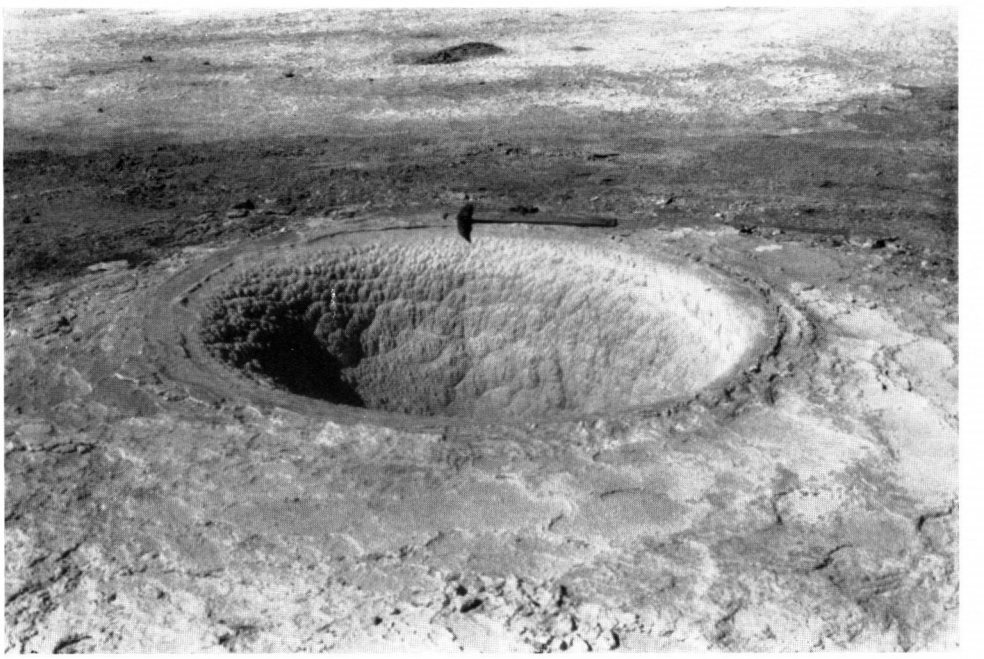

Bild 1: Verlassenes Geysir-Steigrohr in Zone I.

Bild 2: Verwitterungsformen an Dazit in der
westlichen Umrahmung des Feldes mit postvulkanischer Tätigkeit bei Alto Ojo de Cablor.