

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 132 (1952)

**Artikel:** Vulkanologie und Geochemie der Geysire und heissen Quellen Islands

**Autor:** Barth, Tom F.W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-90487>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 07.06.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# **Vulkanologie und Geochemie der Geysire und heißen Quellen Islands**

Von

TOM. F. W. BARTH, Oslo

Die Vulkane Islands haben lebhaftes Interesse erweckt, und eine große Anzahl von Geologen vieler Länder war und ist mit ihrer Erforschung beschäftigt. Unter der großen Mannigfaltigkeit der vulkanischen Erscheinungen sind sowohl die Spaltenergüsse als die sogenannten Arealeruptionen für Island charakteristisch. Sie sind intensiv studiert worden, und unter den Schweizer Geologen hat sich besonders Dr. RITTMANN durch seine erfolgreichen Studien des Mechanismus der Spaltenergüsse hervorgetan.

In den weitgestreckten Lavaflächen der Umgebung des Sees Mývatn findet sich eine erstaunlich große Anzahl von Kleinkratern und anderen vulkanischen Kleinbildungen, die von H. RECK als Förderungsschlote der Lava aufgefaßt wurden (siehe Abb. 1) – deshalb der Name Arealeruption.

Dem isländischen Geologen THORARINSSON ist es aber gelungen, eine interessante und neuartige Erklärung dieser Kleinformen zu geben. Das heißt, neuartig ist sie eigentlich nicht, denn der bekannte, verstorbene Naturalist und Geograph Islands, THORVALDUR THORODDSEN, hatte schon in seinen geographischen Arbeiten von ungefähr 1880 die Erklärung angedeutet. Seine Arbeiten waren aber teils isländisch, teils dänisch geschrieben und blieben infolgedessen einem größeren wissenschaftlichen Kreise unbekannt.

Jetzt hat THORARINSSON den Gedanken aufgenommen und wissenschaftlich bearbeitet. Die Lava ist danach über eine flache Landschaft voll von Moorböden und wassergefüllten Vertiefungen geflossen und hat dadurch die Möglichkeit gehabt, das darunterliegende Wasser in sich zu inkorporieren, teils in Lösung, teils in Okklusion. Durch Erstarren der Lava ist das Wasser unter Bildung allerlei phantastischer Kleinkrater und Kleinvulkanformen explosionsartig wieder abgegeben worden.

Die isländischen, von RECK aufgestellten Arealeruptionen, die in seinem Klassifikationsschema eine große Rolle spielen, sind somit durch diese Untersuchungen überholt worden. Wahrscheinlich gibt es überhaupt nirgends Arealeruptionen im Sinne RECKS.

Man sieht an diesem Beispiel, wie die vulkanischen Kräfte sich mit dem Wasser verbinden können und wie diese Feuer-Wasser-Kombination sofort zu Thermalerscheinungen verschiedener Art Anlaß gibt.

Alle heißen Quellen und Dampfexhalationen sind durch diese Kombination von Feuer und Wasser erzeugt. Sie sind von Geologen, Chemikern, Physikern und Geographen des letzten Jahrhunderts intensiv

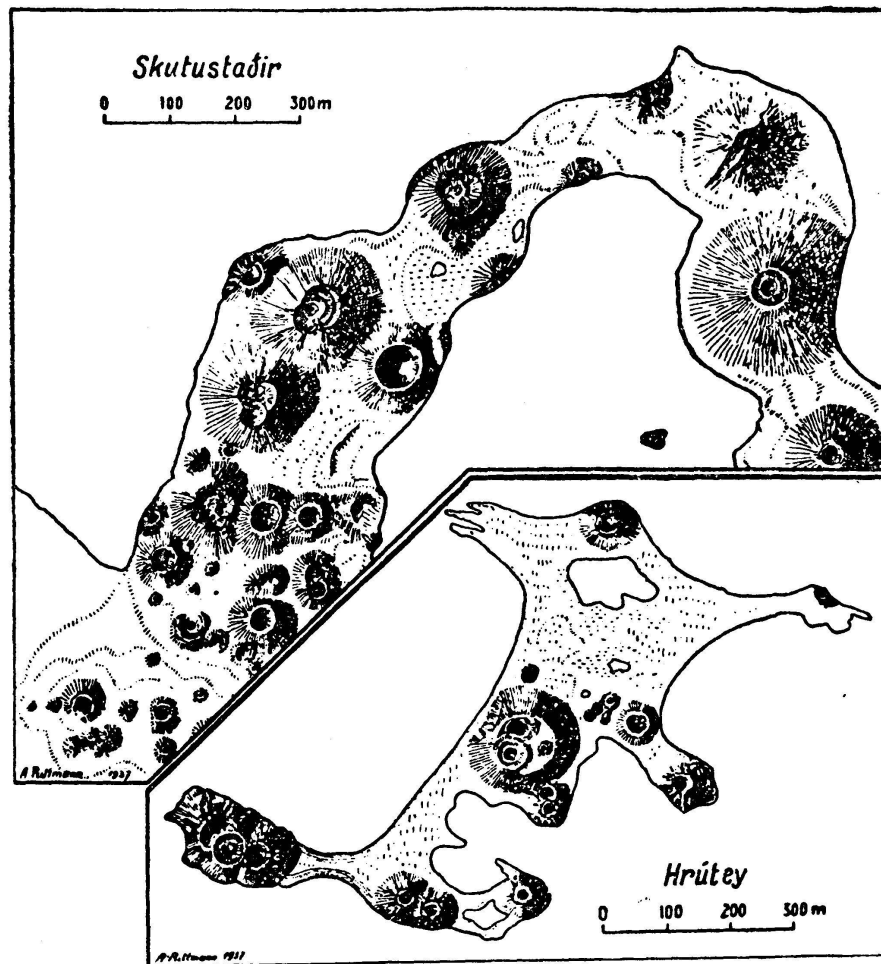


Abb. 1

Kratergruppen bei Mývatn (nach Rittmann).

untersucht worden. Unter ihnen hat sich der Schweizer Geologe Dr. SONDER durch klassifikatorische und chemische Erforschung zahlreicher Quellengebiete in besonders verdienstvoller Weise hervorgetan.

Im Folgenden werde ich zunächst über die Geysiraktivität berichten und eine neue Geysirtheorie vorlegen. Hierauf werden die Entstehung und Entwicklung der heißen Quellen diskutiert und ihre geochemische Stellung erklärt. Dadurch werde ich auch auf die große Bedeutung der Entgasungsprozesse der Erde zu sprechen kommen.

### *Die Geysire*

Über die Geysiraktivität ist viel Interessantes zu berichten: Sie ist eines der eigentümlichsten Phänomene der Natur. Auf Island sind mehrere tausend einzelne heiße Quellen bekannt, aber höchstens 30 Geysire sind in Tätigkeit, d. h. weniger als 1 % der gesamten Anzahl heißer Quellen.

Im Yellowstone-Nationalpark gibt es nicht so viele heiße Quellen wie in Island, trotzdem sind davon mindestens 200 Geysire, d. h. ungefähr 10 % der Gesamtanzahl heißer Quellen des Nationalparkes. Die Geysiraktivität in Yellowstone ist also relativ viel häufiger als in Island.

Die Geysire haben eine Tendenz, sich zusammenzuhäufen; in Island existieren nur 4 Geysirgruppen oder -areale, innerhalb deren sich alle aktiven Geysire Islands befinden. Man muß daher annehmen, daß diese 4 Areale in Gegenden liegen, wo die Verhältnisse für Geysirtätigkeit besonders günstig sind.

Der Wahrscheinlichkeitsquotient in Island ist ja klein, weniger als 1 %. Aber innerhalb der vier erwähnten Geysirareale zeigen nicht weniger als 25 % der Gesamtanzahl heißer Quellen Geysirtätigkeit. Welches sind nun die Bedingungen, die eine Geysiraktivität voraussetzen?

BUNSEN hat auf einer Reise im Jahre 1847 einige der Geysire Islands besucht. Das Resultat seiner Reise war die berühmte Geysirtheorie, die heute noch weit verbreitet ist. Seiner Ansicht nach ist die Eruption von der Temperatur abhängig und erfolgt nur, wenn der Siedepunkt in irgendeiner Tiefe erreicht wird. Gleich nach einer Eruption ist das Quellenwasser verhältnismäßig kalt. Durch heiße Dämpfe wird es allmählich bis auf den Siedepunkt erwärmt; und eine Eruption folgt.

Meine Studien in Island zeigen aber einen davon verschiedenen Mechanismus an.

1. Es findet im allgemeinen kein regelmäßiges Steigen der Temperatur von einer Eruption zur nächsten statt. Jeder Geysir zeigt eine charakteristische Temperatur-Tiefen-Kurve, die von der Zeit gewissermaßen unabhängig ist.

2. Obschon die Temperatur mit der Tiefe steigt, ist das Steigen geringer als das des Siedepunktes mit der Tiefe; d. h. je tiefer im Brunnen, desto weiter ist man vom Siedepunkte der betreffenden Tiefe entfernt. Diese zwei Sätze sind voneinander abhängig. Sofern in irgendeiner Tiefe Überhitzung vorkäme, würde das aufsteigende Wasser sofort die oberen Teile des Geysirsystems auf Temperaturen weit über die wirklich beobachteten erwärmen.

Dieses kann man auch mathematisch verfolgen; ich werde hier aber nicht die Gleichungen bringen; zwei Beispiele werden die Prinzipien zur Genüge zeigen können.

In Uxahver und Ystihver, den zwei berühmtesten Geysiren Nord-Islands, wurden die Temperatur-Tiefen-Kurven durch Messungen bis auf sechs bzw. acht Meter Tiefe festgestellt. Von den auf diese Weise erhaltenen Daten läßt sich der Temperaturgradient mit der Tiefe

berechnen. Der Gradient wird schnell sehr klein, ja die maximalen Temperaturen, sogar in sehr großer Tiefe, sind für Uxahver und Ystihver  $108^{\circ}$  bzw.  $107^{\circ}$ .

Der Grund hierfür ist, daß in größeren Tiefen kein Mechanismus vorhanden ist, durch den Wärme von einem aufsteigenden Wasserkörper weggeführt werden kann. Alle Temperatur-Tiefen-Profile, die in Bohrlöchern der Thermalgebiete Islands gemessen worden sind, zeigen dasselbe, d. h. praktisch keinen Gradienten unterhalb etwa 20 bis 30 Meter Tiefe.

Ein Bohrloch einer Dampfquelle im Yellowstone-Park, die von Dr. FENNER im Jahre 1936 untersucht wurde, zeigte ganz andere Verhältnisse. Hier zeigt die Temperatur-Tiefen-Kurve einfach das Steigen des Siedepunktes mit der Tiefe an. Siehe Abb. 2. Deshalb hat sich hier eine Dampfquelle und kein Geysir gebildet.

*Zusammenfassend* kann gesagt werden, daß die Messungen, die ich in Island ausgeführt habe, ganz entschieden darauf hindeuten, daß Geysireruptionen nicht durch Überhitzung irgendeines Teiles des Geysirrohres erzeugt werden. Berechnungen zeigen, daß in den tieferen Teilen des Geysirsystems, in denen sich die explosive Kraft entwickelt, die Temperatur gewöhnlich niedriger ist als die des Siedepunktes in dieser Tiefe.

Meiner Ansicht nach, und in Übereinstimmung mit der Theorie des Isländers TH. THORKESSON, beruht die Geysirtätigkeit auf dem Vorhandensein von Schwärmen von Gasblasen, die, mit Wasser vermischt, einen kleineren hydrostatischen Druck ausüben als Wasser allein. Die so erzeugte Druckentlastung ist fähig, ein Aufrauschen und Kochen des Wassers, das sich jetzt unter einem kleineren Druck befindet, zu bewirken, was hinreicht, eine Eruption auszulösen. Siehe Abb. 3.

### *Entstehung und Entwicklung der Quellen*

Unter der festen Kruste Islands befinden sich große Reservoirs geschmolzener Gesteinsmassen, die sogenannten Magmen, deren Kristallisationstemperatur (d. h. Erstarrungstemperatur) von ungefähr  $1200^{\circ}$  bis zu  $700^{\circ}$  gelegen ist. Durch allmähliche Abkühlung wird eine immer größere Fraktion des Magmas fest werden. Die nicht verfestbaren Anteile des Magmas, besonders die magmatischen Gase, akkumulieren sich infolgedessen mehr und mehr in der Restschmelze – vor allem Wasserdampf, aber auch andere Gase wie Schwefel, Chlor, Kohlensäure usw. Bald wird in dieser Weise ein Punkt erreicht, bei dem die Restschmelze mit den Gasen gesättigt ist. Oder, anders ausgedrückt, der innere Gasdruck der Restschmelze übersteigt den äußeren Druck, und die Schmelze fängt somit zu sieden an. Es ist hier der sogenannte zweite Siedepunkt, der durch Erhöhung der Gasspannung infolge Kristallisation erreicht wird, im Gegensatz zum bekannteren oder «gewöhnlichen» Siedepunkt, der durch Erhöhung der Gasspannung infolge Wärmezufuhr erreicht wird.

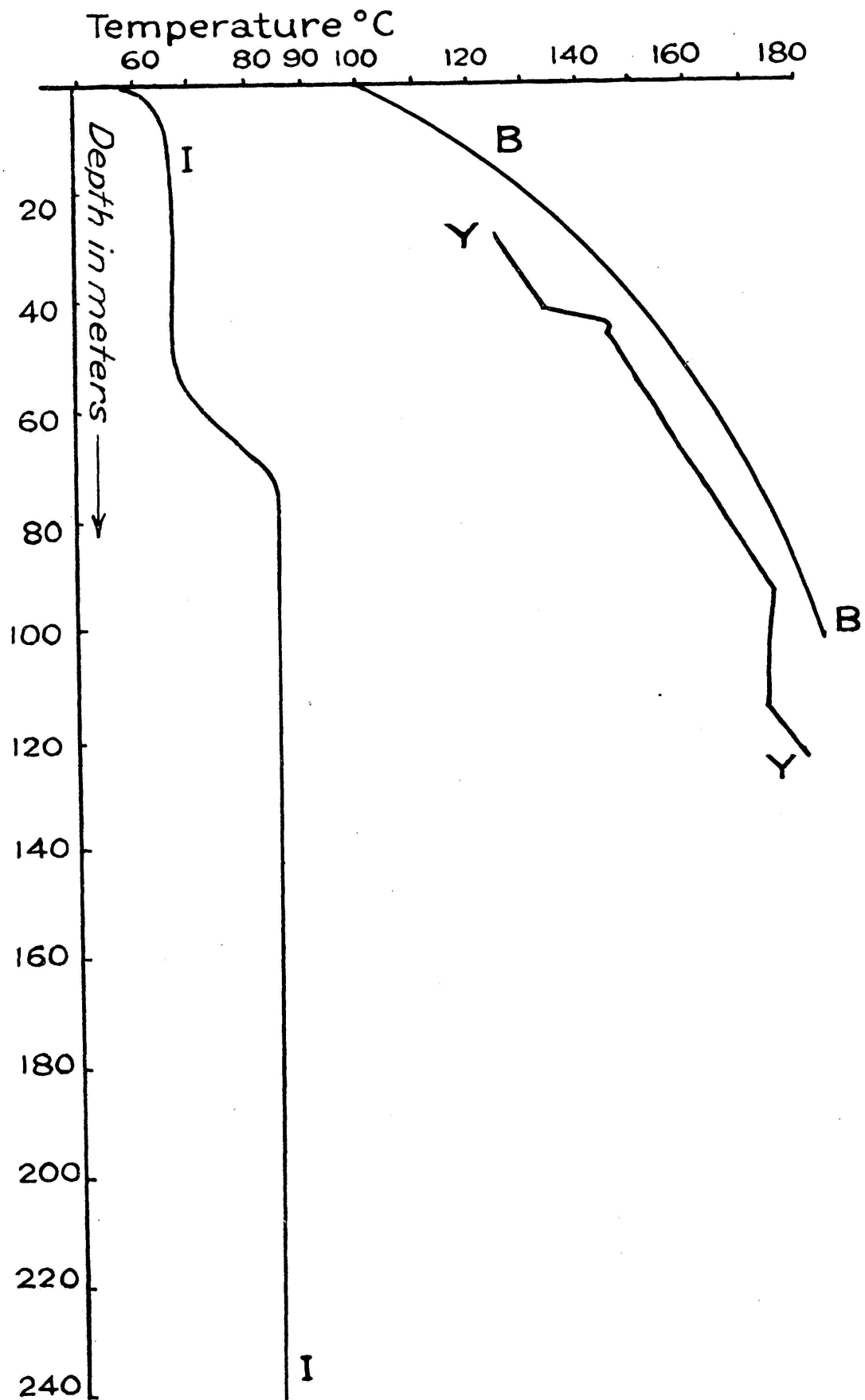


Abb. 2

Temperatur-Tiefen-Kurven: I-I, in einem Bohrloch von Sudur Reykir, Island. Y-Y, in einem Bohrloch bei Upper Basin, Yellowstone. B-B, Siedepunkt des Wassers.

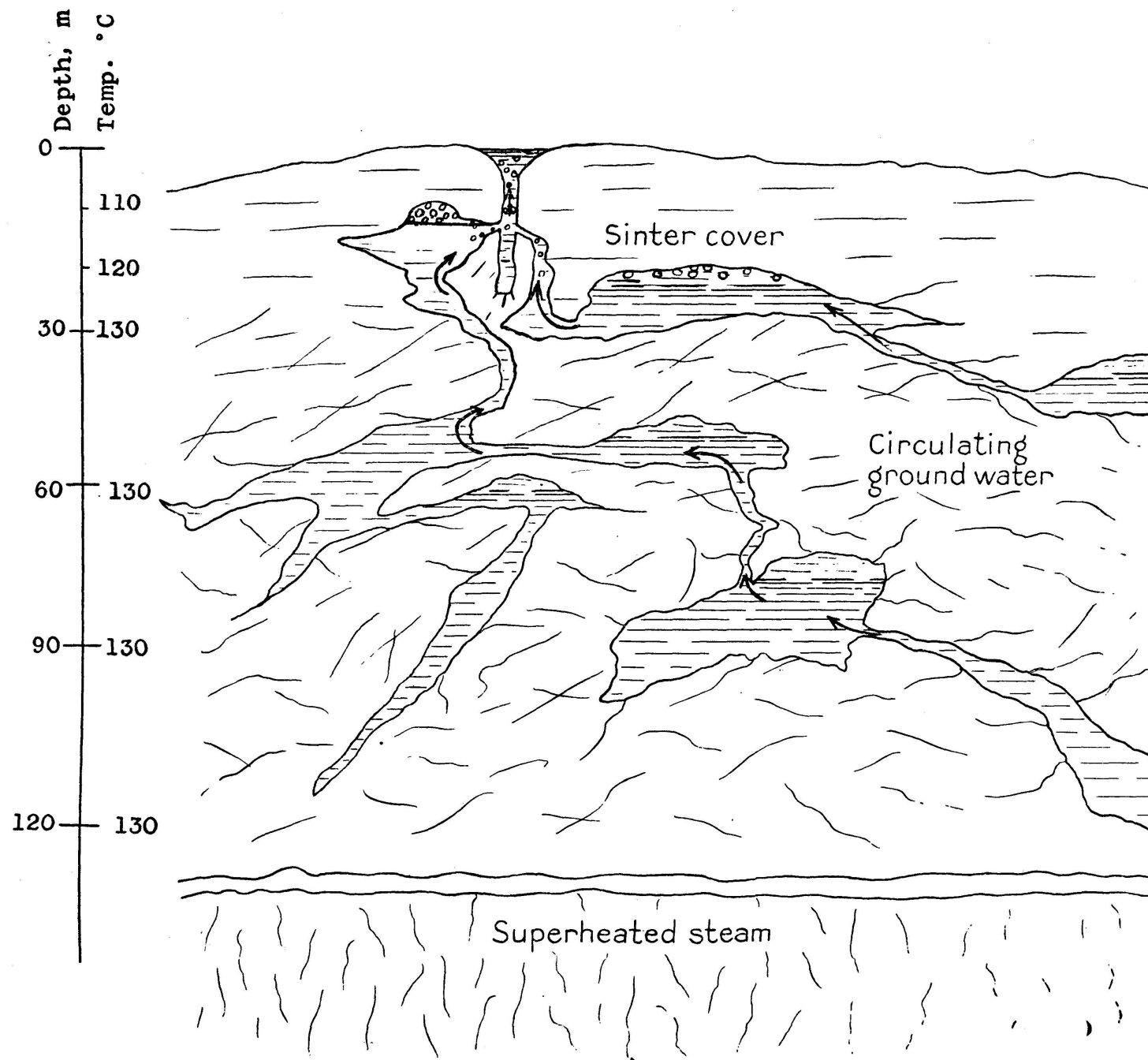


Abb. 3  
Schematisches Diagramm  
vom Großen Geysir

Sieden heißt, daß eine Gasphase über der Schmelze gebildet wird. Die Gase steigen empor und werden mit dem festen Gestein reagieren; sie werden einer dicken Schicht von Grundwasser begegnen, dadurch werden sie unter Erhitzung des Grundwassers in Lösung gehen, werden dann mit den im Grundwasser aufgelösten Substanzen und immer noch mit dem umgebenden Gestein reagieren. Schließlich wird ein Teil der Gasphase an die Erdoberfläche gelangen, teilweise im Quellenwasser gelöst, teilweise in Form von Quellengasen.

Es ist aber ohne weiteres klar, daß diejenigen Quellengase, die an der Oberfläche angetroffen werden, ganz verschieden sind von den primären, magmatischen Gasen – nicht nur infolge unterirdischer Reaktionen, sondern auch infolge von Verunreinigungen mit atmosphärischen und anderen Gasen.

Zahlreiche Analysen zeigen, daß man die Quellengase in zwei Gruppen einteilen kann:

1. die vulkanischen Gase, wesentlich  $H_2$ ,  $H_2S$  und  $CO_2$ ;
2. die sekundären Gase, wesentlich  $N_2$  und auch  $O_2$ .

Die Quellen selbst lassen sich zweckmäßig nach ihrem relativen Gehalt an den betreffenden Gasen klassifizieren, wodurch eine natürliche Klassifikation erreicht wird: Diejenigen Quellen, die in direktester Beziehung zur vulkanischen Wirksamkeit stehen, haben einen großen Gehalt an  $H_2$ ,  $H_2S$  und  $CO_2$ . Mit zunehmender Entfernung sinken zunächst die Gehalte an  $H_2$  und  $H_2S$ , dann sinkt das  $CO_2$ ; und schließlich, wenn die Quellen keine direkte Relation zur Vulkanität mehr aufweisen, sind alle drei dieser Gase ganz verschwunden; nun enthält die Quelle lediglich Stickstoff (inklusive Edelgase wie Argon) und vielleicht ein wenig Sauerstoff.

Die Entwicklungsgeschichte läßt sich jetzt gut rekonstruieren: Parallel mit der Veränderung des Gasgehaltes geht eine gesetzmäßige Variation der im Quellenwasser aufgelösten Substanzen. Beispielsweise sei erwähnt, daß *Sulfate* in den primären Quellen konzentriert sind und in der Entwicklungsserie regelmäßig abnehmen. *Chloride* verhalten sich umgekehrt: Sie sind in den primären Quellen fast nicht vorhanden, steigen aber dann regelmäßig an. *Fluoride* folgen den Chloriden. *Fe-* und *Al-Ionen* sind in den primären Quellen konzentriert usw. Es würde aber zu weit führen, die verschiedenen Komponenten für sich näher zu besprechen. Sehr charakteristisch ist nun die Wasserstoffionenkonzentration. *pH-Werte* lassen sich leicht im Felde messen. Viele Messungen sind deshalb gemacht worden, und überall habe ich dieselbe Regelmäßigkeit gefunden: Das vulkanische Quellenwasser ist ursprünglich sauer. Je länger es sich unter der Erde befindet, um so mehr Gelegenheit hat es, mit anderen Stoffen zu reagieren; dadurch wird es alkalischer.

Um die vulkanischen Zentren herum entsteht somit ein regelmäßiger geochemischer Zonenbau. Vom Zentrum gegen die Peripherie hin lassen sich also die geochemischen Variationen regelmäßig verfolgen. Jedes Element kann auf diese Weise studiert werden, und durch Extrapolieren

kann man versuchen, die Zusammensetzung der primären vulkanischen Phase zu bestimmen.

Die Frage der Herkunft der vulkanischen Energie soll hier nicht näher berührt werden; wir müssen uns damit begnügen, festzustellen daß sie als erste Bedingung der Quellentätigkeit tatsächlich vorhanden ist. Weitere Bedingungen sind (2) die großen Niederschlagsmengen und (3) die große Lockerheit oder Porosität der isländischen Gesteinsarten, die imstande sind, sehr schnell das Regenwasser zu absorbieren. Es ist charakteristisch, daß Island, das ein sehr feuchtes Klima hat, doch über größere Strecken wüstenartig trocken erscheint – alle Gewässer verschwinden in den klüftigen Laven, setzen ihren Weg unterirdisch fort und treten erst in den Vertiefungen zutage. In geringerer Tiefe begegnen dem Wasser heiße magmatische Gase und Dämpfe. Dadurch wird das ganze Grundwasser zu hohen Temperaturen erhitzt, und wenn es in Talsenken und Flußbetten oder in anderen Vertiefungen zutage tritt, bilden sich die zahlreichen heißen Quellen.

Die große Intensität und Extensität der heißen Quellen läßt sich somit durch die Kombination von vulkanischer Energie, starkem Niederschlag und lockerem Gesteinsboden erklären.

### *Die Entgasung*

Zuletzt sei die fundamentale Frage gestellt: Warum existieren überhaupt echte juvenile Gasarten, d. h. Gase, die direkt aus dem Inneren der Erde kommen? Ich glaube, die Antwort ist, wir haben es mit einem fundamentalen Prozeß zu tun – mit einem großartigen Entgasungsprozeß – von weitreichender geologischer Bedeutung.

Es läßt sich thermodynamisch beweisen, daß gasförmige Moleküle im Erdinneren nicht im Gleichgewicht sind und daß sie infolgedessen gegen die Oberfläche diffundieren müssen. Wichtige Beobachtungen lassen sich dafür anführen, daß die ganze Hydrosphäre und die ganze Atmosphäre sekundär durch Entgasung entstanden sind. Diejenigen Gase, die bei der Entstehung der Erde sozusagen im Erdinneren gefangen genommen wurden, sind während der nachfolgenden geologischen Zeiten ununterbrochen auf Wanderung nach der Oberfläche. Die feste Erde verarmt ständig an Gasen, die zunächst in die Atmosphäre hineingelangen, und schließlich – im Falle von leichten Gasarten – an den Kosmos abgegeben werden.

Heute findet in Island eine lebhaftige Entgasung statt, und von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, bieten die Quellengase dem Geologen ausgezeichnete Gelegenheit, fundamentale geologische Probleme zu studieren. Er kann hier Relationen zwischen dem Erdinneren und der Oberfläche suchen. Die juvenilen Quellengase sind also Boten aus dem unzugänglichen Inneren der Erde. Aber trotzdem, und dies ist von besonderem Interesse, ist die chemische Zusammensetzung der Gase gar nicht typisch für die des Erdinneren.

Zwei Regionen bleiben wohl immer für uns unzugänglich: der Weltraum und das Erdinnere.

Vereinzelte Botschaften kommen aber aus beiden Regionen. Die Meteorite kommen aus dem Weltraum, die juvenilen Gase aus dem Erdinneren. Wir wissen, daß im Weltraum besonders leichte Gase vorhanden sind und daß die durchschnittliche Zusammensetzung des Weltraumes infolgedessen sehr weit von der Zusammensetzung der Meteorite entfernt ist. Ja wenn man näher daran denkt, sieht man ein, daß die Meteorite der Zusammensetzung nach in schroffem Gegensatz zum Weltraume stehen, woher sie kommen, daß sie aber eine merkwürdige Beziehung zum Erdinneren zeigen. Die juvenilen Gase zeigen hingegen eine enge Beziehung zum Chemismus des Weltraumes und sind verschieden von dem des Erdinneren, woraus sie kommen. Diese Botschaften zeigen somit in ihrer Zusammensetzung an, wohin sie gehen, nicht aber woher sie kamen. Wie läßt sich dies erklären? Die Erklärung ist vielleicht einfach: Die Boten sind gar nicht Vertreter des Chemismus ihrer respektiven Heimaten. Ganz im Gegenteil: Sie sind Verstoßene, die in ihre Heimat nicht passen, die sich neue Aufenthaltsorte suchen. Wenn man die Flüchtlinge betrachtet, die von Osten durch den Eisernen Vorhang schlüpfen, so sind sie keine Vertreter der politischen Farbe ihrer Heimat. Ihre Farbe zeigt an, wohin sie wollen, nicht woher sie kamen. Auf dieselbe Weise: Die Elemente der Meteorite finden in der Gesellschaft des Weltraumes kein Gleichgewicht, sie werden mit einem Überschuß von freier Energie geladen und so gezwungen, das Innere eines Planeten zu suchen; einige finden so die Erde und fallen zur Oberfläche, um im Laufe geologischer Äonen immer weiter in die Tiefe zu sinken.

Die Gase verhalten sich umgekehrt und finden im Erdinneren keine Ruhe, ihre freie Energie wird sich aber in der Gesellschaft des Himmelsraumes vermindern. Deshalb steigen sie empor, gelangen an die Erdoberfläche und versuchen noch weiter in die Höhe zu steigen.

So sehen wir, welche Gesellschaft von diesen Boten bevorzugt wird und welche gemieden wird. Wir können diese großartigen geochemischen Wanderungen betrachten und durch wissenschaftliche Studien versuchen, diejenigen Verhältnisse zu verstehen, die die Meteorite zur Flucht aus dem Himmelsraum veranlassen und die Gase zur Flucht vom Erdinneren zwingen. Durch weitere Theoretisierung eröffnet sich vor uns ein Ausblick auf die Möglichkeit, diese Wechselwirkung zwischen Geochemie und Kosmochemie in ein größeres System einzuordnen, ihr einen Platz in unserem Weltbilde zu schaffen.

#### Literatur

- ALLEN, E. T., and A. L. DAY. Hot springs of the Yellowstone National Park. Carnegie Inst. Wash. Publ. 466, 1935.
- BARTH, T. F. W.: Volcanic geology, hot springs, and geysers of Iceland. Carnegie Inst. Wash. Publ. 587, 1950.

- BUNSEN, R.: Physikalische Beobachtungen über die hauptsächlichsten Geysire Islands. Poggendorffs Ann. Phys. u. Chem., Vol. 72, S. 159–170, 1847.
- FENNER, C. N.: Bore-hole investigations in Yellowstone Park, Jour. Geol., Vol. 44, S. 225–315, 1936.
- RECK, H.: Die Masseneruptionen usw. Deutsche Islandsforschung. Vol. 2, S. 24–49, Breslau 1930.
- RITTMANN, A.: Die Vulkane am Mývatn in Nord-Island. Bull. Volcanol. Napoli, ser. 2, Vol. 4, S. 1–38, 1938.
- SONDER, R. A.: Studien über heiße Quellen und Tektonik in Island. Publ. Vulkaninst. I. Friedländer, Nr. 2, Zürich 1941.
- THORARINSSON, S.: Laxárgljufur and Laxárhraun. Geogr. Ann. S. 61–73, Stockholm 1951.
- THORKESSON, Th.: On thermal activity in Iceland and geyser action. Reykjavik 1940.