

akzent

Michail M. Wassilewski

# Vulkane – Feuer des Pluto



---

Michail M. Wassilewski

# Vulkane – Feuer des Pluto

---

Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

Autor: Dr. Michail M. Wassilewski,  
Institut für Vulkanologie im wissenschaftlichen Zentrum  
Fernost der Akademie der Wissenschaften der UdSSR,  
Petropawlowsk

Übersetzer: Leo Korniljew, Leipzig

Originaltitel: РОЖДЕННЫЕ В ОГНЕ.

(Im Feuer geboren.) Verlag »Snanije«, Moskau 1976

Mit freundlicher Genehmigung des Autors für die  
akzent-Reihe gekürzt und bearbeitet von

Dipl.-Geol. Dr. Frank Eigenfeld, Halle/Saale

Zeichnungen: Klaus Thieme

*1. Auflage 1980*

*1.–20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten*

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, 1980

VLN 212–475/18/80. LSV 1439

Lektor: Ewald Oetzel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Claus Ritter

Fotos. N. Smelow: 8, 9, 34/35, 44/45, 63, 67, 71, 74, 77, 110, 111,

115, 119, 125,; Archiv des Verlages: 10, 53, 54; Archiv der

Martin-Luther-Universität Halle/Saale (E. Schenk): 109;

ADN-ZB: 65; Deutsche Fotothek Dresden: 13, 15, 36, 38, 39,

87; NASA: 43, 46, 47; Ocean Science and Engineering Washing-

ton: 89; Gustav Ginzler, Liberec: 95, 97; Uta Lindner, Halle:

14, 19, 83, 84, Wolfgang G. Schröter, Markkleeberg: 127

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig – III/18/97

Best.-Nr. 653 585 2

DDR 4,50 M

---

# Inhalt

---

## Feuerringe unseres Planeten 7

### Der Mensch und die feuerspeienden Berge 11

Höllisches Inferno 11

Lebensatem aus irdischen Tiefen 18

### Vulkanische Gürtel 26

Es begann mit einer dünnen Rinde 26

Die vulkanischen Kordilleren 28

Explosive Herde 29

Beschleunigte Erdgeschichte 31

Kleine Ringe – große Ringe 40

Ringstrukturen auf dem Mond und  
den Nachbarplaneten 44

Die expandierende Erde 49

### Flüchtig und flüssig 56

Die zweite Komponente 56

Transporte in der Gasphase 58

Flüssige Schatzkammern 61

Spuren heißer Wässer 62

Geysire – Zeichen erlöschender Vulkane 66

Woher kam das Wasser? 69

Heilquellen – Geschenk der Natur 73

### Alles Gold dieser Welt 75

Die Hand des Zufalls? 75

Erzbildungen, von Vulkanen beeinflusst 76  
Lagerstätten vulkanischen Ursprungs 82  
Erze auf dem Meeresboden 88  
Wichtige Erzlagerstätten 92

**Wie schnell schlägt der Puls der Erde? 108**

Stein gewordene Zeit 108  
Blick auf den pazifischen Feuerring 109  
Vom Balkan bis zum Kaukasus 113  
Abstieg in die Tiefen der Zeit 117  
Reichtum für die Menschheit 126

---

# Feuerringe unseres Planeten

---

Vulkanische Prozesse sind Gegenstand einer der jüngsten Geowissenschaften, der Vulkanologie. Zu ihren wichtigsten Forschungsergebnissen gehören neben den Möglichkeiten, Vulkanausbrüche vorherzusagen und Schutzmaßnahmen zu treffen, Erkenntnisse darüber, daß Vulkane keineswegs den Menschen nur Tod und Verderben bringen. Sie sind vielmehr Mitgestalter der Erdkruste, Charakteristika eines allgemeinen geologischen Erneuerungsprozesses, bei dem Stoffe und Energie aus den Tiefen der Erde an deren Oberfläche befördert werden. Berge und Gebirgszüge, ja auch Inseln im Weltmeer entstanden im Feuer der Vulkane. In Jahrmilliarden brachten vulkanische Prozesse fast die ganze Vielfalt der Stoffe des Erdinneren in den oberflächennahen Bereich: Lagerstätten von Gold, Silber, Kupfer, Blei, Eisen, Quecksilber und vielen anderen Metallen bildeten sich. Und war nicht selbst die Entstehung des Lebens auf der Erde mit den überaus großen vulkanischen Vorgängen verknüpft, die in der Frühzeit der Erdgeschichte abliefen?

Die Zerstörungsenergie vulkanischer Katastrophen stellt nur einen verschwindend geringen Teil jenes ungeheuren Energiestroms dar, den der Mensch bereits zu nutzen gelernt hat. Auch die Entstehung des »flüssigen Goldes«, des Erdöls, soll ihre primäre Ursache in chemischen Umwandlungen haben, die in der Tiefe vulkanischer Gebiete ablaufen.

In der Familie der Geowissenschaften ist die Vulkanologie ältestes und jüngstes Mitglied zugleich. Sie erlebt heute eine Renaissance, denn die Vulkanologen können vulkanische Erscheinungen nunmehr mit Maßstab und



*Aus Vulkanschloten emporgeschleuderte Lavafontänen gehören zu den eindrucksvollsten Erscheinungen tätiger Vulkane.*

Waage beurteilen, um die an der Oberfläche ablaufenden Prozesse mit denen in Verbindung zu bringen, die tief in der Erde unterhalb der Kruste vor sich gehen. So vielfältig die Möglichkeiten sind, diese Erscheinungen zu untersuchen, so verschiedenartig sind auch die Methoden.

Eine der ersten Fragen, der sich Vulkanforscher gegenübersehen, ist diese: Wie verteilen sich die Vulkane über die Erdoberfläche?

In den letzten sechs bis sieben Jahrzehnten wurden ausgedehnte Vulkangürtel, die »Feuerringe« unseres Planeten, untersucht, die dem Verlauf von Brüchen in der Erdkruste folgen. Es sind Ketten von Vulkanen, die Kontinente und Ozeane durchqueren und sowohl zu den Inselbögen in den Ozeanen als auch zu den Gebirgsrändern der Kontinente in Beziehung stehen. Riesige Felder vulkanischen Gesteins bedecken den Boden der Meere.

Auch alte vulkanische Gürtel wurden nachgewiesen, die die Erdoberfläche vor Dutzenden und Hunderten Millionen, ja sogar vor Milliarden Jahren durchzogen.

Die Erforschung der längst vergangenen und der gegenwärtigen vulkanischen Prozesse läßt uns die geologischen Entwicklungsgesetze unseres Planeten verstehen und zugleich auf die Frage Antwort geben: Waren die Vulkane immer so, wie wir sie heute sehen?

Jeder Vulkan zeigt ein bestimmtes Eruptionsverhalten. Es konnten auch Rhythmen der vulkanischen Aktivität festgestellt werden, die den »Pulsschlag« unseres Planeten widerspiegeln. Die »Pause« zwischen den einzelnen Pulsschlägen liegt zwischen vielen Millionen und einigen wenigen Jahren. Die Rhythmisdauer einer bestimmten Größenordnung reduziert sich im Verlauf der geologischen Erdgeschichte und spiegelt die gesetzmäßige Evolution des Planeten wider.

*Vulkanausbrüche werden stets von gewaltigen Rauchsäulen begleitet. Ausbruch des Vulkans Tolbatschik auf Kamtschatka im Sommer 1975.*





*Der Vulkan Stromboli in Tätigkeit. Auf der gleichnamigen Insel im Mittelmeer nördlich Sizilien gelegen, zählt er zu den aktivsten europäischen Vulkanen.*

Das besondere Interesse, das die Geologen und gegenwärtig auch Wissenschaftler vieler anderer Fachrichtungen für Vulkane zeigen, steht damit im Zusammenhang, daß uns die Vulkane den Schlüssel zur Erkenntnis der Vorgänge in die Hand geben, die tief im Erdinneren ablaufen. Jeder Vulkan ist nämlich ein natürliches »Bohrloch«, das Tiefen von einigen Kilometern bis zu ein paar Dutzend erreicht. Er fördert aus dem Erdinneren, wo das glutflüssige Magma entsteht, Material an die Erdoberfläche. Vulkane liefern uns damit eine unmittelbare Antwort auf die Frage, woraus die Schalen im Inneren der Erde aufgebaut sind und welche Prozesse dort ablaufen.

---

# Der Mensch und die feuerspeienden Berge

---

## Höllisches Inferno

»Ein Tanz auf einem Vulkan« – das ist eine Formulierung, die drohende Gefahren andeuten soll. In der Tat: Wer kennt nicht die katastrophalen Ausbrüche des Vesuv, des Krakatau, des Ätna, des Katmai, des Mauna Loa, des Unsen und vieler anderer Vulkane? Vulkanische Erscheinungen dieser Art haben seit alters bei vielen Menschen ebenso großes Interesse gefunden wie die Himmelskörper am Firmament.

Einer Eruption geht zuweilen ein Erdbeben voraus. Dies geschah beispielsweise im Jahre 1762 auf den Philippinen. Auch eine der größten Katastrophen des Altertums war von ähnlichen Erscheinungen begleitet. Sechzehn Jahre vor den katastrophalen Eruptionen des Vesuv im Jahre 79 zerstörte ein Erdbeben bereits Teile jener Städte, über die sich dann der Auswurf des Vulkans ergoß. Welch ein Unheil brach über die Bewohner von Pompeji und Herculaneum herein! 25 000 Menschen verloren das Leben. Vulkanische Bomben heißen heute noch in Neapel »Tränen des Vesuv«. Es muß bemerkt werden, daß diese »Tränen«, die bis in eine Entfernung von einigen hundert Metern geschleudert werden, immerhin die Größe eines Eisenbahnwaggons erreichen!

Wohl der gewaltigste Vulkanausbruch seit Menschengedenken ereignete sich vor rund 3 400 Jahren 120 km nordöstlich von Kreta auf der kleinen Insel Thera, die damals einen Durchmesser von 15 bis 17 km hatte. Der Vulkan Santorin, dessen Kegel fast 2 000 m hoch gewesen sein muß, zerbarst mitsamt dem ihn umgebenden Berg-

massiv. Mehr als 130 Kubikkilometer glühenden Gesteins und heißer Asche wurden emporgewirbelt. Eine riesige Flutwelle, die noch auf Kreta eine Höhe von 30m gehabt haben soll, zerstörte ganze Küstenregionen; der durch die Gluthölle auf Thera ausgelöste Feuersturm verheerte sogar die Siedlungen auf Kreta.

Die Asche der Vulkane bildet nicht selten »Glutwolken«. Vom Mont Pelée auf Martinique wälzte sich eine derartige Wolke, die eine Höhe von 4000m erreichte, mit der Geschwindigkeit eines starken Orkans abwärts. Ihre Temperatur betrug 8 km vom Krater entfernt noch 200°C. Die Stadt am Fuße des Vulkans geriet in Brand. Vom Druck der Wolke wurde alles fortgerissen. Selbst tonnenschwere Standbilder wurden weggeschleudert. Menschen und Tiere kamen in den heißen Dämpfen um.

Die bei solchen Eruptionen ausgeworfene Aschemenge kann ungeheuer groß sein und über weite Entfernungen transportiert werden. Im Jahre 1872 überschüttete der Vesuv mit seiner Asche sämtliche Straßen der nahe gelegenen Städte in nur drei Tagen. 1906 brachen wiederum bei einem Ausbruch des Vesuv die Dächer unter der Last der Asche zusammen; die Häuser wurden bis zum ersten Stockwerk verschüttet. Beim Ausbruch des Vulkans Katmai auf Alaska senkte sich für 60 Stunden tiefe Finsternis auf die ganze Gegend herab.

Schiffe vermochten sich kaum ihren Weg durch die Ascheschicht zu bahnen, die 1835 von einem kleinen, nur etwa 160m hohen Vulkan namens Cosegiina am Golf von Fonseca in Mittelamerika ausgeworfen worden war. Die gleichen Schwierigkeiten hatten Seefahrer auch in der Nähe von Sumatera beim Ausbruch des Vulkans Dempo im Jahre 1815. Auf Kalimantan, 1500 km davon entfernt, war der Aschefall so stark, daß die Einheimischen, von dieser Erscheinung überwältigt, ihre Zeitrechnung fortan vom »großen Aschefall« herleiteten.

Bei dem »berühmten« Ausbruch des Vulkans Krakatau im Jahre 1883 mußte ein Schiff in der Bucht von Lapung (Sumatera) seine Fahrt wegen der Dunkelheit unterbrechen, die infolge der dichten Aschewolke hereingebrochen war.

Die Explosionen dieses Vulkans am 26. und 27. August



*Glutwolkenausbruch des Mont Pelée auf der karibischen Insel Martinique vom 16. Dezember 1902. Eine gleichartige Eruption am 8. Mai desselben Jahres hatte die am Fuße des Vulkans gelegene Stadt Saint Pierre mit 28000 Menschen vernichtet.*

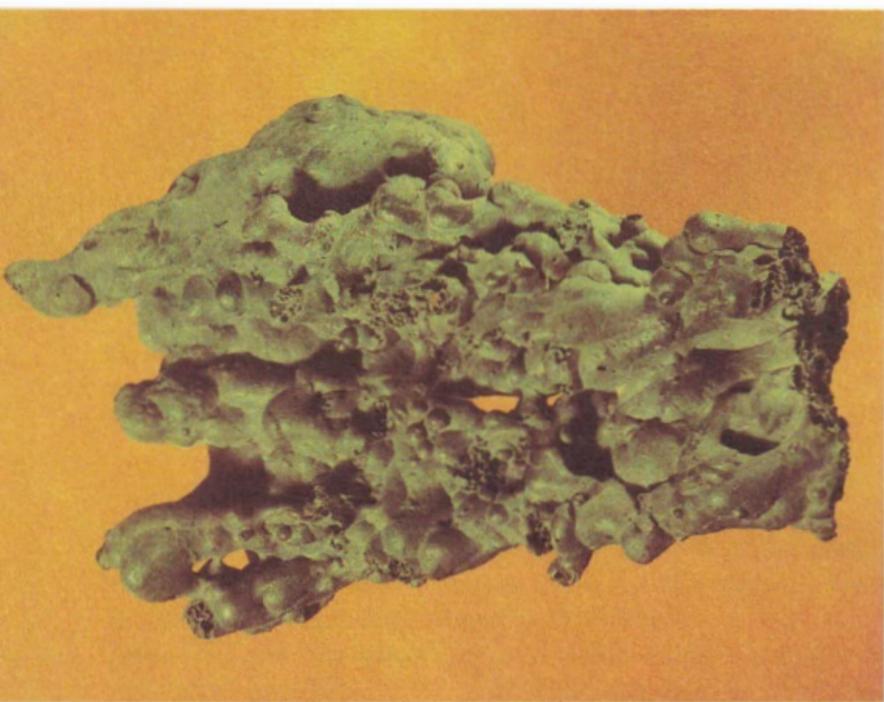
wurden über riesige Entfernungen gehört. Wissenschaftler haben ausgerechnet, daß man sie in der Wüste Sahara, im Ural, auf den Kanarischen Inseln, auf den Azoren sowie in Grönland hätte hören können, wenn sich ihr Ursprung im Zentrum Europas, und zwar in Amsterdam, befunden

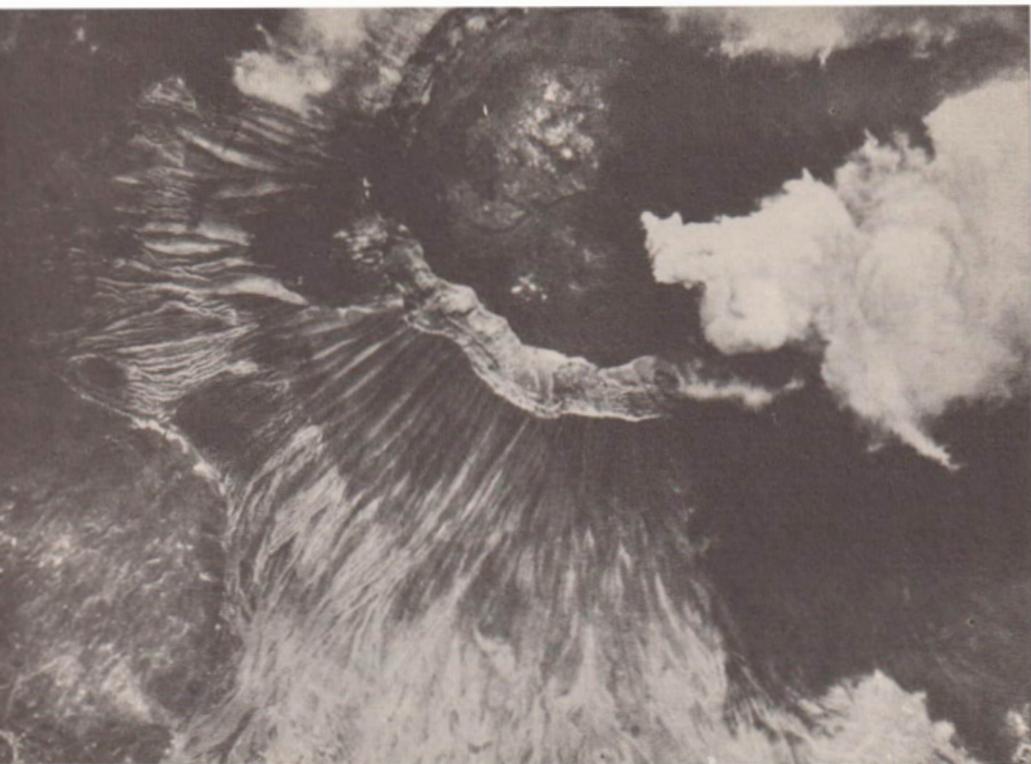
hätte. Die Druckwellen breiteten sich mit Schallgeschwindigkeit aus und umkreisten den Erdball dreimal. Sie drückten Fenster und Türen an Häusern ein, die 800 km vom Eruptionszentrum entfernt waren. In der Flutwelle, die durch die Druckwelle der Explosion bewirkt worden war, kamen auf der Insel Sebesi 35 000 Menschen ums Leben.

Bimssteintrümmer, die die Vulkane bei ihren Eruptionen herausschleudern, schwimmen im Meer und bedecken dessen Oberfläche gelegentlich mit einer so dicken Schicht, daß die Schifffahrt erschwert wird. Nach dem Ausbruch eines Vulkans an der japanischen Küste konnte man auf einer derartigen schwimmenden Schicht von der Küste aus weit ins Meer hinaus laufen.

Neben den Bomben und der Asche werden von einigen Vulkanen riesige Wasserdampfmengen ausgestoßen. Zum

*Vulkanische Bombe vom Vesuv – »Tränen des Vesuv«. Die tropfenförmige Ausbildung der Oberfläche entsteht während des Fluges durch Abkühlung der flüssig ausgeworfenen Lavafetzen.*





*Aus dem Krater des Vesuv aufsteigende Wasserdampfsäule*

Beispiel erzeugt einer der Ätnakrater je Stunde Dampfmen- gen, die etwa  $4000\text{ m}^3$  Wasser entsprechen. Die Dampfsäulen erreichen Höhen von 2, 5, 11 und sogar 30 km (beispielsweise beim Krakatau am 26. August 1883). Wie Augenzeugen berichteten, waren auch die stärksten Sturm- böen nicht imstande, diese riesige Dampfsäule abzulenken oder ins Wanken zu bringen.

Regengüsse und die von ihnen verursachten Ströme vulkanischen Schlamm- sind oftmals noch gefährlicher als die glutflüssige Lava oder die Wolken, die aus heißer Vulkanasche bestehen. Diese dünnflüssigen Schlamm- ströme, die auch Felsbrocken von der Höhe eines zweigeschossigen Hauses mitreißen, stürzen mit ungeheurer Geschwindigkeit die Vulkanhänge hinab. Im Jahre 1122 begrub ein Schlammstrom die kleinen Ortschaften San Sebastiano und Massa unter sich.

Auf Island werden die Täler bei jedem Ausbruch von ungeheuren Strömen überschwemmt, die Eisschollen, Schlacken sowie ganze Felsen mitreißen und alles fortspülen, was sich ihnen in den Weg stellt. Nichts fürchten die Einwohner dieser Insel so sehr wie diese »Wasserlawinen«.

Turbulente Schlammströme, die beim Ausbruch des Vulkans Agun im Jahre 1541 entstanden, zerstörten die Stadt Guatemala. Sie wurde daraufhin am Fuß des Vulkans Fuego neu errichtet, aber wiederum zerstört, diesmal durch den Ausbruch des Vulkans Fuego. Erst jetzt befindet sie sich an einem sicheren Ort.

In Japan erzeugte 1793 der Ausbruch des Vulkans Unsen auf der Insel Kyushu einen Schlammstrom, der Siedlungen überflutete und 53 000 Menschenleben vernichtete.

Im Juni 1840 verhüllten riesige schwarze Wolken den Gipfel des Berges Ararat. In der Umgebung verbreitete sich ein schwefeliger Geruch. Und obwohl die Eruption nicht länger als eine Stunde dauerte, gingen das Dorf Argjure und das berühmte Kloster des Hl. Jacob mit allen Bewohnern unter Strömen von Schlamm, Steinen und Felsblöcken zugrunde.

Kein Zweifel, daß solche schreckenerregenden und nicht selten todbringenden Erscheinungen wie Vulkanausbrüche von alters her bis in die jüngste Vergangenheit hinein die Bildung religiöser Mythen und Legenden förderten. Obwohl wir keine Möglichkeit haben, die Entstehung und Entwicklung der Kulte des »unterirdischen Feuers« in prähistorischer Zeit zu verfolgen, ist am Beispiel so entwickelter Zivilisationen wie der Griechenlands und Roms zu erkennen, wie unsere Vorfahren derartige Mythen schufen. Sie hielten den Eruptionsort für den Eingang in die unterirdische Welt, in der Gott Hades (röm. Pluto) schaltet und waltet. Ein Vulkanausbruch wurde der Tätigkeit des Hephaistos (griech. Gott des Feuers und der Schmiedekunst, in der röm. Mythologie: Vulcanus) zugeschrieben, der die Blitze für Zeus (Jupiter) »fertigt«.

Die Zyklopeninseln am Fuße des Ätna sind der Überlieferung zufolge aus jenen Steinen entstanden, die der Zyklop Polyphem nach den Schiffen des Odysseus geschleudert hat.

Nirgendwo sonst auf dem Erdball gibt es eine so große Anzahl von Ortsbezeichnungen wie »Teufelswand« oder »Teufelsschlucht« wie in vulkanischen Gegenden. Viele geographische Namen auf Kamtschatka und auf den Kurilen enthalten Spuren von Kulturen, die mit dem Schrecken vor der Tätigkeit der Vulkane in Zusammenhang stehen.

Weit verbreitet ist die Vergöttlichung der Vulkane unter den Einwohnern Südostasiens sowie Mittel- und Südamerikas, wo die zerstörerischen Folgen des Vulkanismus besonders verheerend waren.

Auf Djawa war der Vulkan Semeru von den Ureinwoh-

*Mittelalterliche Darstellung vom Ausbruch des Ätna 1637 (einer Darstellung von Kircher 1664 nachgezeichnet)*



nern dem Gott Shiva geweiht, während der Vulkan Sumbing für den »Nagel« gehalten wurde, »mit dem Djawa an die Erde angeheftet ist«.

Bei den Ureinwohnern Neuseelands galt der Vulkan Tongariro als einziger Ort, der würdig war, die Körper berühmter Stammeshäuptlinge aufzunehmen. Die toten Krieger wurden in den Krater geworfen, wo sie sich – so glaubte man – »im Schoße der Götter« befinden würden.

Die Anzahl der Beispiele eines religiösen Verhältnisses zu den Vulkanen ist natürlich unvergleichlich größer, als sie hier genannt worden sind. In diesem Zusammenhang ist es aber besonders interessant, daß es bereits im Altertum – zu der Zeit also, als die religiösen Mythen und Legenden entstanden – Gelehrte gab, die die vulkanischen Erscheinungen als einen natürlichen Prozeß ansahen.

Der griechische Naturphilosoph, Arzt und Dichter Empedokles aus Agrigent (um 495 bis um 435 v. u. Z.) brachte bereits 450 Jahre v. u. Z. den Vulkanismus in Zusammenhang mit der Gebirgsbildung und mit den Erdbeben, deren Ursache er im unterirdischen »Zentralfeuer« sah. Der griechische Historiker und Geograph Strabon (um 63 v. u. Z. bis 19 u. Z.) betrachtete als Ursache der Gebirgsbildung den Druck von Gasen und Dämpfen, die bei Vulkanausbrüchen freigesetzt werden.

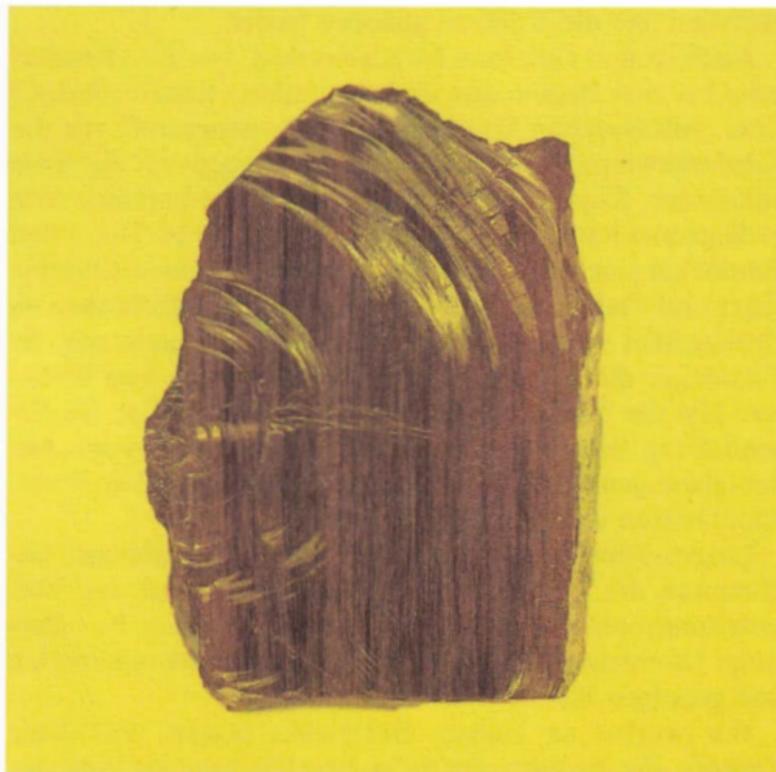
## Lebensatem aus irdischen Tiefen

Ohne Übertreibung läßt sich behaupten, daß nicht nur Katastrophen das Geschick einzelner Städte, mancher Gebiete und vielleicht sogar von Ländern prägten, sondern daß auch die gesamte Menschheitsgeschichte, die Entwicklung materieller Kulturen, mehr oder weniger mit Ergebnissen der vulkanischen und der nachvulkanischen Tätigkeit der geologischen Gegenwart und Vergangenheit in Zusammenhang stand. Beispielsweise eignet sich Vulkanasche als vorzüglicher natürlicher Mineraldünger. Gerade die Fruchtbarkeit der leicht bearbeitbaren Böden vulkanischer Gebiete (besonders in Südostasien) zog viele Menschen in die Nähe der feuerspeienden Berge, ungeachtet der damit verbundenen Lebensgefahr.

Die Ablagerungen junger und alter Vulkane, Erze, gediegenes Gold und Kupfer, aber auch vulkanische Gesteine wie Lava und Obsidian (vulkanisches Glas) waren die ersten und zugleich wichtigsten Bodenschätze in den frühen Jahrtausenden der Menschheitsentwicklung.

Im Alten Orient und im Alten Ägypten begannen die Kupfer- und die Bronzebearbeitung über 1 000 Jahre früher als in vielen anderen Gebieten der Erde. Das lag sicherlich auch mit daran, daß die am leichtesten zu bearbeitenden Kupfererze vulkanischen Ursprungs im Mittelmeergebiet, im Pontos (Südküste des Schwarzen Meeres), auf dem Balkan und in Transkaukasien als erste erschlossen werden konnten. Eine ebenso alte materielle Kultur der Kupfer- und der Bronzezeit weist Indien auf, das Kupfererze aus

*Obsidian aus dem armenischen Hochland. Als begehrtes Arbeitsmittel, durch große Härte sowie scharfkantige und spitze Bruchbildung ausgezeichnet, findet er seit dem 9. Jahrtausend v. u. Z. im Vorderen Orient und in Kleinasien weite Verbreitung.*



Gebieten des tertiären Vulkanismus, aus dem Iran und aus Afghanistan, importierte.

Erze vulkanischen Ursprungs sind nicht selten sehr reich an Metallverbindungen, durch deren Oxydation sekundäre (oxydierte) Erze von leuchtenden Farben an der Oberfläche entstehen. Zweifellos erregte das damals schon die Aufmerksamkeit der Menschen. Dies führte zur schnellen Erschließung des Rohstoffs im Zusammenhang mit der Entwicklung der Zentren jener alten Kulturen in den Erzgebieten des tertiären Vulkanismus: in Transkaukasien, in Kleinasien und auf dem Balkan.

Das älteste Arbeitsmittel, der Stein, war in der Regel vulkanischen Ursprungs: Basalt und Obsidian. Die frühesten Metalle fand man in den Erzen erloschener Vulkane, also in Erzen vulkanischen Ursprungs (vulkanogen). Es handelte sich zunächst um Gold, später um Kupfer, darunter auch um gediegenes Kupfer, und um Silber. In der »Kupferzeit« schärfte und bearbeitete der Mensch mit Werkzeugen aus vulkanischem Gestein Erzeugnisse aus Metallen, die die Vulkane geboren hatten.

Auch in den Gebieten Nordamerikas, wo die »Kupferzeit« bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts währte, dienten Erze vulkanischen Ursprungs als Ausgangsstoff für die Kupfergewinnung; die ältesten der überhaupt auf der Erde bekannten Kupferlagerstätten sind die Vorkommen von gediegenem Kupfer im Gebiet der Großen Seen. Die ersten Entdecker solcher Erze waren in der Regel nomadisierende Jäger und Viehzüchter. Die viehzüchtenden Mormonen im Grenzgebiet der USA und Kanadas waren nicht nur die Entdecker dieser Lagerstätten, sondern auch ihre Wächter: Mit der Waffe in der Hand versuchten sie, die Erschließung der Lagerstätten und den Zustrom von »Andersgläubigen« aufzuhalten, die ihren materiellen Wohlstand hätten untergraben können.

Lagerstätten wurden zu Zentren des Erzabbaus, bestimmten die Standorte der Hüttenwerke und der Verarbeitungsbetriebe sowie das Anwachsen der Bevölkerung: Es entstanden ganze Städte, Zentren der materiellen und geistigen Kultur.

Wir wollen an einigen Beispielen zeigen, daß diese Zentren, die die wirtschaftliche Erschließung der Welt des



*In der Kupfer- und Bronzezeit ausgebeutete vulkanogene Erz-lagerstätten*

Altertums charakterisieren, in der Mehrzahl der Fälle in vulkanischen Gebieten lagen oder auf Handel mit Rohstoffen fußten, die aus vulkanischen Gebieten importiert wurden.

Die Ackerbauern der alten Kulturen im südlichen Zwei-stromland (4. Jahrtausend v. u. Z.) trieben Handel mit den Bergstämmen des Pontos (z. B. in der Türkei und in Transkaukasien). Die bedeutendsten Kulturen der Kupferzeit in Europa entwickelten sich 2800 Jahre v. u. Z. in Griechenland, d. h. in Gebieten, in denen vulkanische Bildungen mit Erzablagerungen intensiv in Erscheinung treten.

2000 Jahre v. u. Z. begann die Kupferzeit im Süden Osteuropas sowie in den vulkanischen Gebieten des Balkans, Transsilvaniens, der Slowakei und Böhmens. In Böhmen wurden Lagerstätten von Zinn entdeckt, einem Rohstoff, der für die Bronzeherstellung große Bedeutung gewann. Ebenso alt ist hier die Gewinnung vulkanischer Gold- und Silbererze, von denen einige auch in der Gegenwart noch abgebaut werden.

Versucht man, Beziehungen zwischen materiellen Kulturen und dem geologischen Aufbau des jeweiligen Gebietes oder — noch konkreter — dem Vorhandensein vulkanogener (durch vulkanische Prozesse entstandener) Erzgebiete für eine bestimmte Epoche, z. B. für die Zeit um 1400 v. u. Z., aufzudecken, dann findet man eine sehr interessante Korrelation. Die Gebiete im Norden Europas (Dänemark, Holland, Belgien, die Ostseeländer), die keine magmatischen Gesteine an der Oberfläche besitzen, befinden sich auf einer Stufe der Steinzeit. Zur gleichen Zeit aber haben Westspanien und Portugal sowie der Alte Ural — Gebiete, in denen gleichartiger und auch gleichaltriger variszischer Vulkanismus und Erzbildung (Kupferkieslagerstätten) auftreten — bereits die Kupferzeit erreicht (der Unterschied in der Entwicklung macht ein Jahrtausend aus), während die Menschen in den vulkanogenen Erzgebieten des Balkans, des Kaukasus und des Schwarzmeerbereiches schon Bronze herstellen und nutzen.

Die Sinai-Halbinsel ist für den ältesten, schriftlich belegten Bergbau in vulkanischen Kupferlagerstätten bekannt. Inschriften aus der Zeit der I. Dynastie des Alten Reiches (etwa 3 000 Jahre v. u. Z.) zeigen, daß bereits damals der Abbau von Türkis erfolgte, der dann auf Kupfer verhüttet wurde.

Im 4. bis 3. Jahrtausend v. u. Z. herrschten im Zweistromland Kupferwaffen vor, die später von Bronzewaffen abgelöst wurden. Mit Kupfer wurde das Zweistromland aus Lagerstätten vulkanischen Ursprungs in der heutigen Türkei versorgt, die ihre ökonomische Bedeutung auch in der Gegenwart noch nicht verloren haben.

Zinn, Arsen und Antimon, die man für den Bronzegeuß benötigt, sind ebenfalls vulkanogen. Sie waren entweder Bestandteil der Primärerze, oder sie wurden in den vulkanischen Berggebieten, z. B. des Irans, für die Bronzeherstellung abgebaut.

An einigen Orten sind bis zur Gegenwart Erz»abfälle« der alten Abbaugebiete erhalten geblieben (etwa 1,25 bis 2 Millionen Tonnen mit einem Kupfergehalt von 2%). Nach den Maßstäben von heute handelt es sich dabei um außerordentlich reiche Erze. Transkaukasien mit seinen jungen und alten Vulkanen war die »Wiege der Metall-

urgie« und so auch der Motor, der die Entwicklung der materiellen Kulturen des Altertums vorantrieb.

Die alten Ägypter verdanken ihre Fertigkeiten in der Metallbearbeitung ohne Zweifel den Erfahrungen und Kenntnissen, die Vertreter einer Völkerschaft aus Transkaukasien mitbrachten. Offenbar waren sie bereits lange vor dem Ende der prädynastischen Zeit in Unterägypten aufgetaucht.

Ebenso alt wie die Kupfergewinnung ist auch der Goldabbau in Armenien. Schon im 3. Jahrtausend v. u. Z. hatte die Ausbeutung der vulkanogenen Lagerstätte von Sod begonnen, die auch heute noch ein wichtiges Objekt darstellt.

Daß die alten Hurriter Armeniens außer Kupfer auch vulkanische Blei-Zink-, Arsen-, Antimon- und Manganerze abbauten, gab ihnen die Möglichkeit, insgesamt 14 verschiedene Bronzen herzustellen. Der Rohstoff dazu stammte aus Lagerstätten in Armenien, Aserbaidschan und Grusinien. Sie werden auch heute noch abgebaut, und an

*Bergbau im antiken Griechenland (nach einer Darstellung aus dem 6. Jahrhundert v. u. Z.)*



ihnen studieren die sowjetischen Geologen sehr erfolgreich theoretische Probleme der vulkanogenen Erzbildung.

Seit dem 3. Jahrtausend v. u. Z. sind frühe (2800 bis 2000 v. u. Z.) und mittlere Bronzekulturen (2000 bis 1500 v. u. Z.) in der Geschichte Griechenlands bekannt. Grundlage der Kupfer- und später auch der Silbergewinnung waren hier wiederum vulkanische Erze. Die Silbergewinnung in den Bergwerken von Laurion im alten Griechenland war ein wichtiger Zweig der Hüttenindustrie. Xenophon, der im Jahre 365 v. u. Z. als erster darüber berichtete, schrieb: »Die Bergwerke werden schon sehr lange ausgebeutet, wie jedermann weiß, und niemand unternimmt auch nur den Versuch, festzustellen, wie lange es her ist, daß man damit begann.«

Zentren früher Kulturen waren auch die Gebiete des alten Vulkanismus in Sibirien, in Kasachstan, im Altai und in Mittelasien. Die ersten Versuche, Kupfer aus oxydierten Erzen zu erschmelzen, gehen im Ural auf den Anfang des 2. oder das Ende des 3. Jahrtausends v. u. Z. zurück. Später dienten diese Erze auch als Rohstoffe zur Silbergewinnung ebenso wie analoge Erze der römischen Bergwerke in Spanien. Daß in Spanien viel Silber gewonnen worden ist und daß sich dort sehr reiche Bergwerke befanden, haben wir von Plinius erfahren. Er berichtet, daß Hannibals Tageseinkünfte aus den Bergwerken 300 Pfund Silber betragen. Gewaltige Einkünfte erlangte N. A. Demidow im 18. Jahrhundert aus den Erzbergwerken im Ural.

Viele interessante Tatsachen, die eine Abhängigkeit der Entwicklung früher Kulturen und Zivilisationen vom geologischen Faktor generell und von der Tätigkeit von Vulkanen im besonderen bezeugen, lassen sich bei einer Analyse der Geschichte des alten China, Japans sowie der Länder Mittel- und Südamerikas finden. Den unvorstellbaren Gold- und Silberreichtum, den sich die Azteken und die Inkas geschaffen hatten, muß man sicherlich mit der erzbildenden Tätigkeit der Vulkane in Zusammenhang bringen, wenn man erklären will, warum gerade in diesen Gebieten so reiche Vorkommen an Edelmetallen zu finden waren. Noch heute gibt es in Bolivien sehr reiche Zinn- und Silbererz-Vorkommen.

Die Aufgabe dieses Buches allerdings ist es nicht, die



*Erzverhüttung und Metallverarbeitung im antiken Griechenland (nach einer Darstellung auf einer Schale vom Ende des 6. Jh. v. u. Z.). Am Schmelzofen zwei Männer mit Schürhaken und Blasebalg*

äußeren Erscheinungsformen der Tätigkeit von Vulkanen zu beschreiben oder eine Übersicht über die Entwicklungsgeschichte der menschlichen Gesellschaft zu geben, so reizvoll dies auch sein mag. Uns geht es vielmehr darum, die Wechselbeziehungen in den vulkanischen Erscheinungen im Laufe der geologischen Entwicklung unseres Planeten aufzuzeigen und den damit verbundenen Evolutionsprozeß zu erläutern. Es ist ein Buch vom geologischen Raum und von der geologischen Zeit, vom Rhythmus und der Nichtumkehrbarkeit der Erdentwicklung, von den Änderungen der Lebensformen und den materiellen Erscheinungsformen des Lebens auf unserem Planeten sowie von neuen Aspekten der ältesten materialistischen Lehren über die »Grundlagen des Weltgebäudes«: Feuer, Luft, Erde und Wasser. War nun Wasser der Urstoff, aus dem alles andere entstand, wie Thales von Milet (um 625 bis 545 v. u. Z.) glaubte? Oder war es das Feuer, wie Heraklit aus Ephesos (um 544 bis um 483 v. u. Z.) lehrte? Oder hatten Empedokles aus Agrigent (um 495 bis um 435 v. u. Z.) und Aristoteles (384 bis 322 v. u. Z.) recht, die alle vier Elemente zu diesen primären Ursachen erklärten? Die Wissenschaft von heute, oder genauer gesagt: die Gemeinschaft der Geowissenschaften, erlaubt es, diese Fragen zum Teil zu beantworten.

---

# Vulkanische Gürtel

---

## Es begann mit einer dünnen Rinde

Die geologische Geschichte der Erde ist im Grunde eine Geschichte der Entstehung und Evolution ihrer oberen geologischen Hüllen: der Basalt- und der Granithülle, des sedimentären Deckgebirges, der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Diese geologischen Hüllen entstehen durch endogene – »aus der Tiefe kommende« – Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge, die von den inneren Teilen des Planeten erzeugt werden. Die eindrucksvollste Erscheinungsform der Wärme- und Stoffübertragung an die Erdoberfläche ist der Vulkanismus. Bereits in den frühesten Perioden der geologischen Geschichte trat er hervor. Die ältesten bekannten vulkanischen Gesteine der Erde sind über 3,5 Milliarden Jahre alt.

Als die Erde noch ihre dünne, nicht konsolidierte, frühe, »primäre« Rinde besaß, traten vulkanische Prozesse gleichmäßig über den ganzen Planeten verteilt auf.

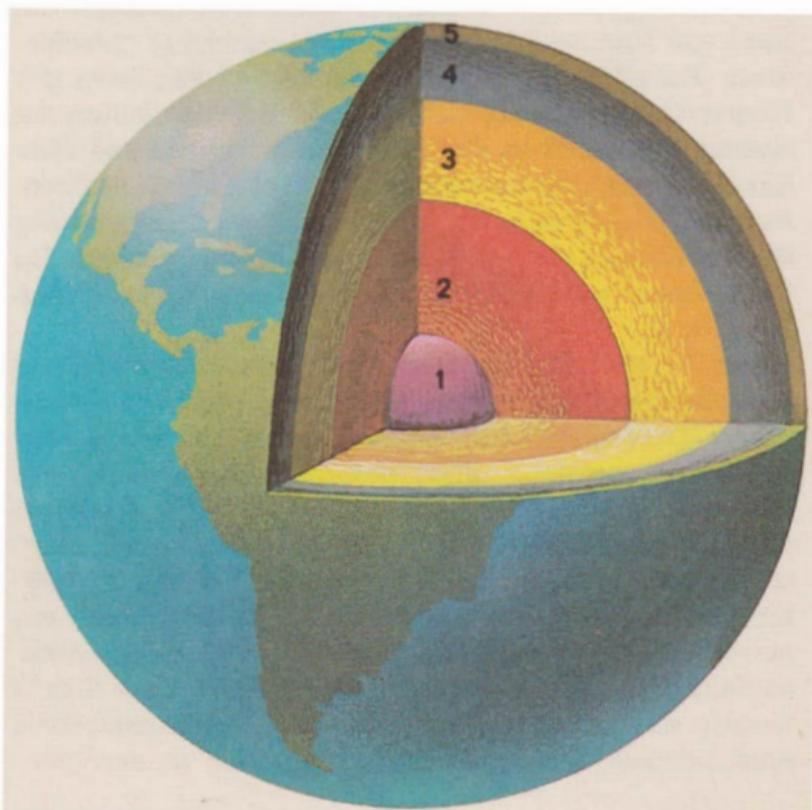
Die primäre Rinde bildete sich im astronomischen (d. h. im prägeologischen) Stadium der Entwicklung unseres Planeten und bestand, wie man annimmt, aus Basalt. Die vulkanische Rinde ist bereits ein sekundäres Gebilde. Sie entstand in Zonen erhöhter Durchlässigkeit, wo die Wärme- und Stoffübertragung aus dem Erdinneren stattfand.

In dem Maße, wie die Mächtigkeit der sekundären Rinde über Gebieten mit einer erhöhten Durchlässigkeit zunahm, entwickelten sich bereits vor 3 bis 2 Milliarden Jahren auf unserem Planeten Regionen, die von den Geologen als Schilde bezeichnet werden. Zu dieser Zeit war das Ober-

flächenrelief noch sehr flach und schwach differenziert. Es war durch Anhäufung vulkanischer Produkte entstanden. Sie rührten von der Tätigkeit niedriger Schildvulkane her, die an der Planetenoberfläche sehr verbreitet waren. Im Verlauf dieser frühen Erdperiode (Protogäikum: vor 3,5 bis 2,1 Milliarden Jahren) war die Wassermenge zwar gering, doch bedeckte sie große Flächen des Planeten. Festland existierte überhaupt nicht bzw. nur in unbedeutendem Umfang, d. h. in Gestalt von Inseln, die von den Gipfeln der größten vulkanischen Gebirge jener Zeit dargestellt wurden. Dies war eine einzigartige, später nicht wiederholte »ozeanische« Etappe in der Erdgeschichte.

Vulkanismus und die damit im Zusammenhang stehende Ablagerung von Sedimenten fanden in flachen Becken von

*Schalenaufbau der Erde. 1 – innerer Kern; 2 – äußerer Kern; 3 – unterer Mantel; 4 – oberer Mantel; 5 – Kruste. Die Gesteinshülle unserer Erde besteht aus der Kruste und den obersten Bereichen des oberen Mantels. Sie ist heute zwischen 80 km und 140 km dick.*



verhältnismäßig geringer Tiefe statt. Doch schon damals, besonders in der zweiten Hälfte des Protogäikums, trat der Vulkanismus nicht selten im Bereich linear ausgedehnter, relativ schmaler Zonen auf, d. h. in Gestalt sogenannter vulkanischer Gürtel.

## Die vulkanischen Kordilleren

Die Geologie der Schilde aus jener frühen Entwicklungsperiode der Erde ist sehr kompliziert, und es fällt schwer, die geologischen Ereignisse von damals am Beispiel nur eines ganz bestimmten Gebietes der Erde zu rekonstruieren. Die Schwierigkeiten werden überdies durch den Umstand verstärkt, daß die Regionen des frühen Vulkanismus (d. h. die Schilde) später zu permanenten Hebungs- und Erosionsgebieten wurden, so daß die versteinerte geologische Geschichtsschreibung zwar nicht ganz verlorenging, doch noch stärker »chiffriert« wurde.

Dessenungeachtet vermag die historische Geologie anhand von Bruchstücken der frühen Geschichte verschiedener Perioden, die in unterschiedlichen Regionen des Planeten erhalten geblieben sind, die Besonderheiten der ältesten vulkanischen Gürtel zu rekonstruieren und viele Rätsel der weiteren Entwicklung unserer Erde zu erklären. Auf dem Territorium der Sowjetunion zeichnet sich der älteste vulkanogene – d. h. durch Erscheinungsformen des Vulkanismus gebildete – Gürtel im Bereich des Baltischen Schildes ab.

Vor 2,1 bis 1,35 Milliarden Jahren (im Deuterogäikum) konsolidierten sich auf der Erdrinde die Gebiete mit erhöhter Durchlässigkeit weiter, in denen intensive Magmabildung erfolgte und ausgeprägter Vulkanismus herrschte. Brüche in der Rinde, die sich später vertieften und ausdehnten, gliederten die Rinde in Blöcke mit unterschiedlicher geologischer Entwicklung. Es kam zur Differenzierung der Erdrinde in die frühen Tafeln (Gebiete mit permanenter Hebungstendenz) und die frühen Geosynklinalen (Gebiete mit Senkungstendenz). Die frühen Tafeln wurden zu Quellen für terrigenes (aus Festlandsmaterial entstandenes) Sedimentmaterial, das sich in den Geo-

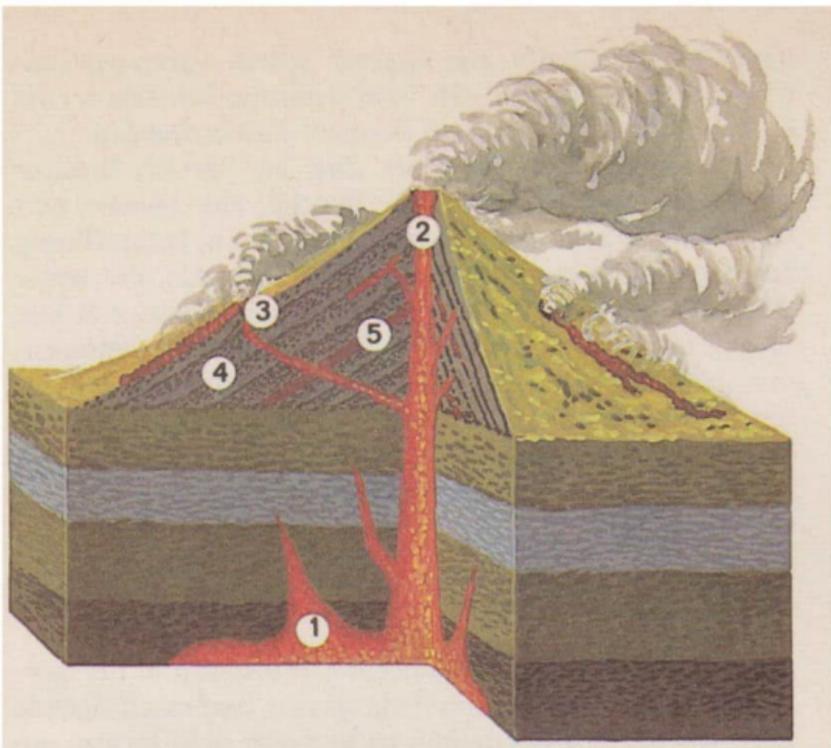
synklinalen anhäufte. Die ältesten Tafeln waren der Baltische, der Kanadische, der Brasilianische Schild u. a., die in der Folgezeit zu Kernen jüngerer Tafeln wurden.

Vulkanismus tritt zu jener Zeit im Bereich linearer Strukturen, d. h. ausgedehnter Brüche, auf. Hierbei entstehen die frühen vulkanischen Kordilleren, kettenförmig aneinandergereihte Zentren des Vulkanismus, die heute durch die erodierten tiefen Herde alter Vulkane, z. B. der Rapakiwi-Granitmassive (1 700 Millionen Jahre), repräsentiert werden. Diese vulkanischen Kordilleren des Deuterogäikums schließen im Grunde genommen die Entwicklung des ältesten vulkanischen Zyklus unseres Planeten ab, der etwa 2 Milliarden Jahre dauerte.

## Explosive Herde

Wenn man von den vulkanischen Prozessen in der geologischen Frühzeit unserer Erde spricht, darf man folgende interessante Besonderheiten nicht außer acht lassen, um die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten der Evolution des vulkanischen Prozesses in der Erdgeschichte besser zu verstehen. In erster Linie denken wir dabei an das Ausmaß der Bildung sogenannter Ignimbrite. Dies sind nach modernen Vorstellungen explosive vulkanische Produkte, die aus oberflächennahen Herden mit gasgesättigten, flüssigen Magmen gefördert werden. Ohne hier auf die Ursachen der Explosionen selbst einzugehen, die auch heute noch ein kompliziertes Problem bilden, wollen wir nur auf die wichtigste Besonderheit dieses Prozesses im Protogäikum und im Deuterogäikum verweisen.

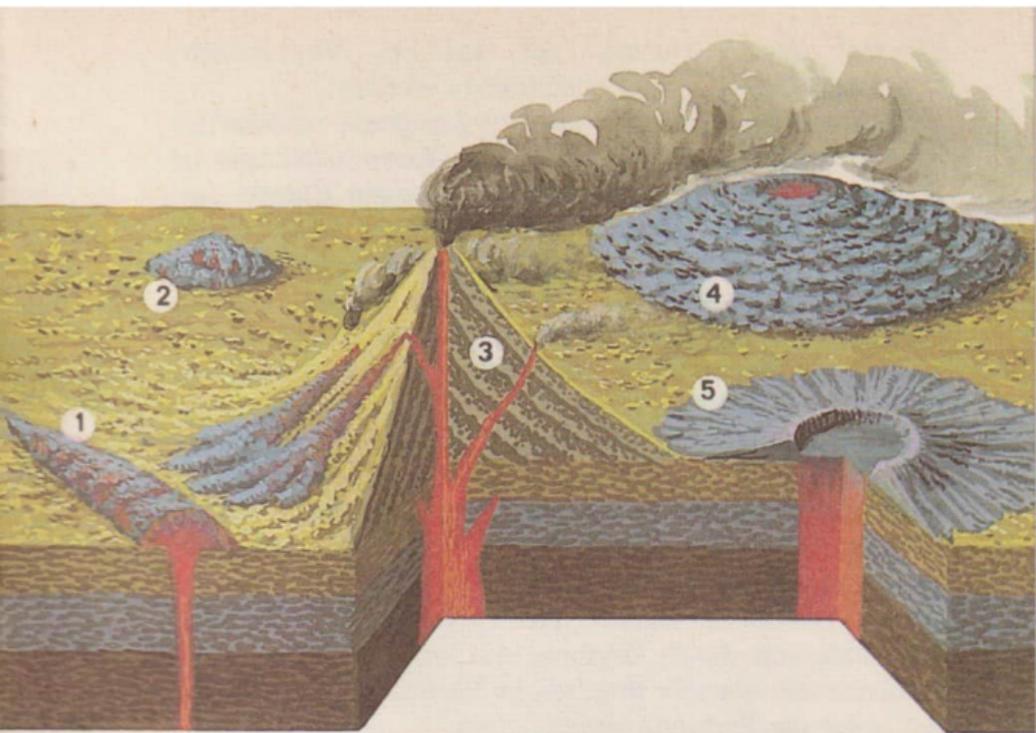
Jene oberflächennahen Herde oder Magmaintrusionen, wie man sie auch bezeichnet, waren sehr viel umfangreicher als die, die man heute durch geophysikalische Verfahren unter den Vulkanen der Gegenwart ermitteln kann. Es waren, wie die Erforscher der Schilde schreiben, oberflächennahe Plutone, deren Fläche jetzt noch im Erosionsanschnitt bis zu 1 000 km<sup>2</sup> beträgt. Explosionen solcher oberflächennahen Plutone verursachten die Bildung riesiger Ignimbritdecken, die später durch Metamorphose (Umwandlung) in sogenannte Metagranite verwandelt



*Aufbau eines Schichtvulkans. 1 – Magmakammer im tieferen Untergrund; 2 – Zentralschlot mit Hauptkrater; 3 – seitliche Ausfuhrkanäle mit Nebenkratern an der Flanke des Vulkans, sog. Parasitärkrater; 4 – Schichten erkalteter Lávadecken und Tuffablagerungen (Aschen); 5 – intrusive, d. h. zwischen die älteren Schichten eingedrungene Schmelzen*

wurden. Diese sind ein Kennzeichen der ältesten kristallinen Schilde unseres Planeten.

Berücksichtigt man diesen Umstand, dann darf man offenbar auch das Volumen der Laven, das während der geologischen Geschichte der Erde ausgeworfen worden ist und mit  $3 \cdot 10^9 \text{ km}^3$  (nach Ferguson) angegeben wird, als zu niedrig ansehen. Zusammen mit der Lava wurde eine Wärmemenge an die Oberfläche befördert, die ausreichen würde, die gesamte Sowjetunion beim gegenwärtigen Stand der Produktion 10 Millionen Jahre lang mit elektrischer Energie zu versorgen. Man könnte die gleiche Wärmemenge gewinnen, wenn man eine Erdölmenge verbrennen würde, die zur Füllung des Ochotskischen Meeres ausreichte.



*Vulkanformen. 1 – Spaltenerguß; 2 – Quellkuppe; 3 – Schichtvulkan; 4 – Schildvulkan; 5 – Maar*

## Beschleunigte Erdgeschichte

Eine andere Besonderheit der frühen Erdgeschichte besteht in der außerordentlich langen Dauer des frühen Zyklus, den die Geologen als tektonisch-magmatischen Zyklus bezeichnen. Sie betonen auf diese Weise die Beziehung zwischen den Bewegungen in der Rinde sowie Erscheinungen der Magmabildung und des Vulkanismus. Diese Periode umfaßt etwa 2 Milliarden Jahre. Wir werden im folgenden sehen, daß sich bei Wahrung einer bestimmten Reihenfolge der vulkanischen Erscheinungen und ihrer Wiederholung in jüngeren vulkanischen Gürteln der tektonisch-magmatische Zyklus hinsichtlich seiner Dauer progressiv vermindert, was eine allgemeine Gesetzmäßigkeit im geologischen Leben unseres Planeten widerspiegelt.

Die Entwicklung eines vulkanischen Gürtels kann am

Beispiel von Gebieten mit aktivem Vulkanismus (Kamtschatka) wie folgt beschrieben werden:

Während der ersten Etappe werden große schildartige Lavavulkane sowie ringförmige vulkanisch-tektonische Strukturen gebildet. Während der zweiten Etappe entstehen innerhalb dieser großen Ringstrukturen stratifizierte, d. h. geschichtete, vulkanische Gebilde, die sogenannten Stratovulkane. Für die dritte Etappe des geologischen Daseins eines Gürtels und seiner einzelnen geologischen Strukturen ist die Bildung von *Kalderen* charakteristisch; das sind ringförmige vulkanisch-tektonische Depressionen (Einbrüche) oder Senken. Sie sind eine Folge der Entleerung oberflächennaher magmatischer Herde unter den Vulkanen. In der vierten Etappe dringen in ringförmige Brüche der Erdrinde zähe Massen magmatischer Schmelze ein, die als Extrusionen (lat. extrudere = ausstoßen) bezeichnet werden. Der vulkanische Zyklus wird abgeschlossen durch Ergüsse von Deckbasalten – Plateaubasalten, die mit Brüchen in Verbindung stehen, die tief unter die Erdrinde hinabreichen.

Die Reihenfolge dieser Ereignisse ist sowohl für die Epoche der alten vulkanischen Gürtel – damals dauerte die Geschichte eines vulkanischen Gürtels Dutzende oder sogar Hunderte von Millionen Jahren – als auch für die vulkanischen Gürtel von heute charakteristisch, deren Existenz nur an wenige Millionen Jahre gebunden ist.

Diese Akzeleration im Ablauf der tektonisch-magmatischen Zyklen bleibt allerdings nicht ohne Folgen. Sie zeigen sich überall im geologischen Prozeß: in der Form seiner Produkte, in deren Zusammensetzung, in den Besonderheiten der Gesteinsmetamorphose sowie der Erzbildung und in vielem anderen. Darüber werden wir in den Folgekapiteln berichten. Eine mehr ins einzelne gehende Betrachtung der Probleme der Entwicklungsgeschwindigkeiten zeigt jedoch, daß die Geochronologie noch nicht ausreichend begründet ist.

*Entstehung einer Kaldera vom sog. Somma-Typ. a – anhäufende vulkanische Aktivität; b – nach Explosion des Vulkankegels Einbruch der schlotnahen Bereiche, die das Volumendefizit im Untergrund ausgleichen; c – in der oftmals mit Wasser gefüllten Kaldera entsteht durch erneute Lavaförderung ein jüngerer Kraterkegel.*





### *Die Kaldera Uson auf Kamtschatka*

Das dritte Megachron der Erdgeschichte, das Neogäikum, begann vor 1,35 Milliarden Jahren und dauert bis heute an. Man kann es in folgende Abschnitte gliedern: das Riphäikum (1,35–0,57 Milliarden Jahre), das Paläozoikum (570–230 Millionen Jahre), das Mesozoikum (230–65 Millionen Jahre) und das Känozoikum (65 Millionen Jahre bis zur Gegenwart).

Die Verlaufsgeschwindigkeiten tektonisch-magmatischer (darunter auch vulkanischer) Zyklen wachsen vom Riphäikum bis heute. Die Abschnitte des Neogäikums treten hinsichtlich des Ausmaßes der Unterschiede im Verlauf der geologischen Prozesse nicht hinter den früheren Zeitaltern zurück. In der Tat sind die Grenzen zwischen dem Riphäikum und dem Paläozoikum einerseits sowie zwischen dem Meso- und Känozoikum andererseits in der Erdgeschichte durch Ereignisse gekennzeichnet, die den



gesamten Planeten erfassen. So erfolgt beispielsweise beim Übergang zum Paläozoikum eine schroffe Änderung in der Zusammensetzung der Atmosphäre. Es wird allgemein angenommen, daß auch die Ozeane zu jener Zeit, d. h. vor etwa 600 Millionen Jahren, ihren heutigen Stand erreichten.

Zur Kreidezeit war der Grund des Weltmeeres Schauplatz stürmischer vulkanischer Tätigkeit. Ihre Spuren haben die Ozeanographen in Gestalt von Lavaströmen und Sedimenten am Fuß aller Bohrungen entdeckt, die über dem Ozeanboden niedergebracht worden sind, beispielsweise auf den weltbekannten Fahrten des Forschungsschiffes »Glomar Challenger«. Es gibt jedoch auch andere Beweise dafür, daß zu diesem Zeitpunkt der Erdgeschichte komplizierte Ereignisse abliefen.

Geologische Daten sprechen dafür, daß sich die Temperaturverhältnisse auf der Erde außerordentlich langsam änderten. Aus diesem Grund liefen die endogenen Dif-

ferenzierungsprozesse im Mantel, die vulkanische Tätigkeit und die Ausbildung der äußeren Hüllen, d. h. der Atmosphäre und der Hydrosphäre, ganz allmählich ab. Die strukturelle Entwicklung der Erde selbst erfolgte ohne Katastrophen etwa in der Art einer Basaltsintflut, wie wir sie aus der Kreidezeit kennen.

Wir müssen hier allerdings feststellen, daß wir dabei nicht an die Ausmaße jener vulkanischen Vorgänge denken, die im Bereich der mittelozeanischen Rücken ablaufen. Wie wir im weiteren Verlauf unserer Betrachtung

*Der neue Krater des Vesuv innerhalb der Kaldera, nach dem explosiven Ausbruch des Jahres 79 u. Z. entstanden*





- mesogäischer Gürtel
- zirkumpazifischer Feuergürtel
- Vulkanismus der mittelozeanischen und kontinentalen Riffe
- große Vulkane

### *Die gegenwärtigen vulkanischen Gürtel der Erde*

tungen noch darlegen werden, unterscheiden sich die vergangenen 25 Millionen Jahre der Geschichte unseres Planeten hinsichtlich der Intensität des vulkanischen Prozesses in den Ozeanen ziemlich deutlich von der früheren Erdgeschichte.

Die Geschwindigkeiten der tektonisch-magmatischen Zyklen nehmen, wie wir gesagt haben, mit fortschreitender Zeit zu, doch unterscheidet sich das Neogäikum nach den vorliegenden Daten nicht von den gleichartigen Perioden der früheren Erdgeschichte.

Es ist durchaus denkbar, daß die Auffüllung des Weltozeans überhaupt sprunghaft verlief, und zwar in Gestalt wiederholter Vorgänge während der Erdgeschichte, entsprechend den großen geologischen Epochen. Dabei muß vermerkt werden, daß in der Geschichte der beweglichen Gürtel der Erde vor 100 bis 150 Millionen Jahren allenthalben ein intensiver submariner Vulkanismus zu verzeichnen war. Dies gilt auch für jene Gebiete, die heute



*Kratersee des erloschenen Mazama-Vulkans im »Crater National Park« in den Cassade-Mountains, Oregon/USA, 589 m tief, von Bergen umgeben, die bis in etwa 3000 m Höhe aufragen*

Festland oder sogar Gebirge darstellen. Hierzu gehören die Krim, der Kaukasus und das Küstengebirge in den Weststaaten der USA sowie viele andere Gebiete des Erdballs.

Beispiele für den Vulkanismus im Neogäikum sind die vulkanischen Gürtel am Baikal, im Ural, im Tjan-Schan, der Tschukotskisch-Katasiatische Gürtel, der Pazifische Gürtel und der Gürtel im Mittelmeer. In jedem dieser Gürtel nahm der vulkanische Prozeß einige Dutzend oder sogar einige hundert Millionen Jahre in Anspruch. Es handelt sich hier um sogenannte langlebige geologische Strukturen, d. h. mobile Gebiete, Zonen mit anhaltender, kontinuierlicher Durchlässigkeit der Erdrinde. Die kaledonischen mobilen Gebiete beendeten ihre Entwicklung und konsolidierten sich bereits vor 400 bis 420 Millionen Jahren (im Silur), die variszischen (herzynischen) vor 270 bis 200 Millionen Jahren, und in den alpinen mobilen Gebieten werden tektonische Bewegungen und vulkanische Aktivität auch in der Gegenwart noch beobachtet. Der pazifische mobile Gürtel mit seinen Vulkanen ist auch als »Pazifischer Feuerring« bekannt.

*Der Vulkan Bromo (Java/Indonesien) in Tätigkeit*

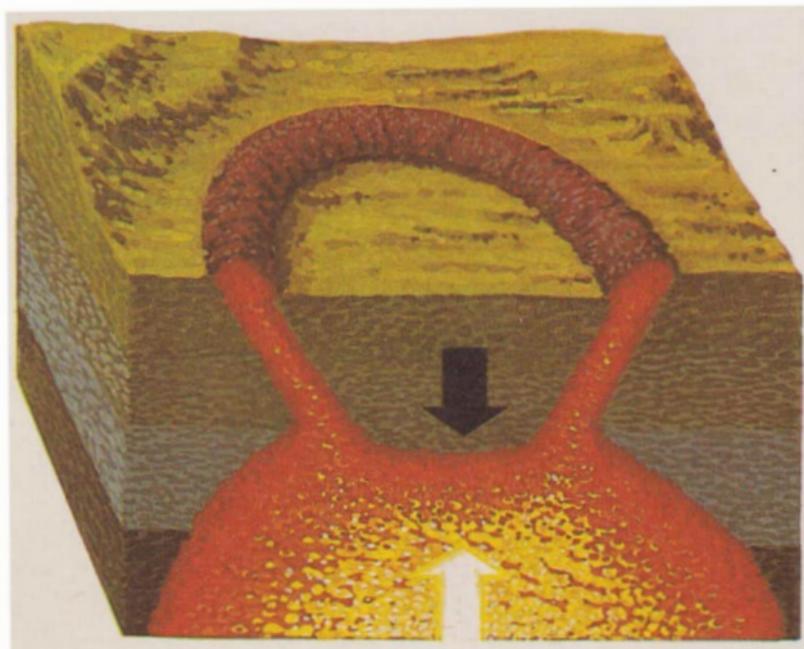


## Kleine Ringe – große Ringe

Wenn man von vulkanischen Gürteln bzw. linearen geotektonischen Strukturen überhaupt spricht, so muß man berücksichtigen, daß mit zunehmender Dicke der Erdkrinde und dem dadurch bedingten Absinken der Entstehungs-herde tektonischer und vulkanischer Prozesse eine *Integration* der einzelnen Mobilitätszentren sowie eine Vergrößerung und Zusammenfassung der Strukturen zu Komplexen von regionalem Maßstab erfolgt. Es bilden sich die sogenannten *Megastrukturen* heraus. In dieser Integration sehen die Forscher sehr häufig nur eine Seite der Erdentwicklung, und sie sprechen davon, daß auf der Grundlage der präkambrischen Schilde, die sich allmählich mit geosynklinalen Faltungsgebilden umgaben, darunter auch mit vulkanogenen Gürteln, große Kontinente entstanden.

In letzter Zeit sind ganz neue Verfahren zur Entschlü-

*Ausbildung von ringförmigen Strukturen in Verbindung mit einsinkenden Blöcken (nach Richey). Der Durchmesser der Ringstruktur ist von der Tiefenlage der Magmenoberfläche abhängig.*



selung geologischer Strukturen aufgetaucht. Diese gehen von Luftbildaufnahmen und/oder von Raumfahrtfotos aus. Sie beruhen auf der Analyse sogenannter Morphostrukturen, der Eigenschaft des Reliefs, Prozesse widerzuspiegeln, die die Tätigkeit tiefer Sphären unserer Erde hervorrufen. Der Einsatz dieser Methoden ließ uns eine wichtige Besonderheit der vulkanischen Prozesse in der Erdgeschichte erkennen.

Im heutigen Bild der Erdoberfläche sind die ringförmigen Morphostrukturen im Relief nicht deutlich ausgeprägt. Nur in vulkanischen Gebieten treten sie erstaunlich deutlich hervor. Hier genügt ein Blick auf Radarluftbilder, um deutlich ringförmige Brüche zu erkennen, die die Eruptionszentren begrenzen. Durch den Einsatz von Spezialverfahren wurde jedoch die Existenz zentralsymmetrischer Strukturobjekte in allen Untersuchungsterritorien nachgewiesen. Wie man vermutet, gehört die Ausbildung derartiger Strukturen zu den typischen und häufigen Erscheinungen der Tektogenese (Gebirgsbildung), und die gerichtete impulsartige Entladung der Tiefenenergie, die in den Prozessen des Vulkanismus zum Ausdruck kommt, ist die Hauptform der planetaren Wärme- und Stoffübertragung.

Der impulsartige Verlauf dieser Prozesse kommt darin zum Ausdruck, daß in Abhängigkeit von der Tiefe jener Quelle, die das vulkanische Magma liefert, ein teleskopartiges System ineinanderliegender zentraler Strukturen ausgebildet wird. Eine große Ursprungstiefe der Strukturen kommt dabei in der Bildung von Ringen großen Durchmessers zum Ausdruck. Auch die Produkte des Vulkanismus innerhalb dieser großen Ringe entsprechen den großen Tiefen, in denen sie gebildet worden sind.

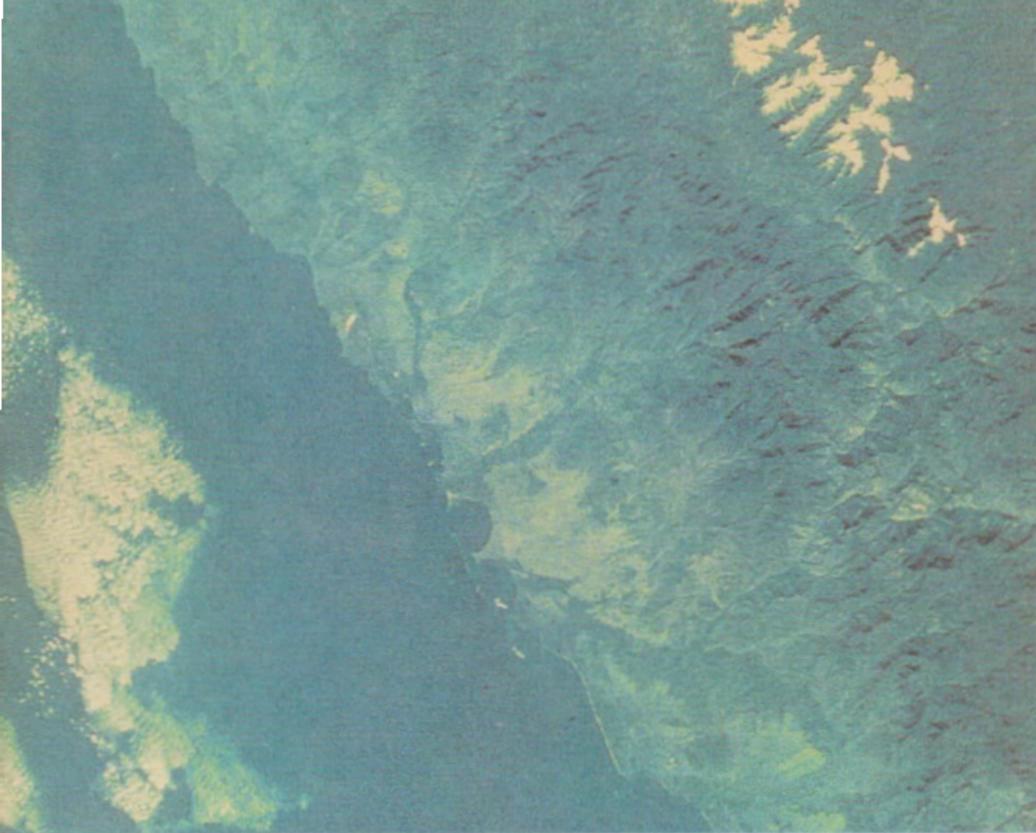
Alle hier aufgezählten Besonderheiten ringförmiger Strukturen sind eine Widerspiegelung des allgemeingültigen Gesetzes, wonach die charakteristische Symmetrieform einer gerichteten Bewegung stets die Kegelsymmetrie ist. Bemerkenswerterweise wurde dies schon 1869 durch den Wissenschaftler Daubree erstmals experimentell gezeigt. Er interessierte sich für den Bildungsmechanismus runder, trichterförmiger Krater und ließ zu diesem Zweck durch lineare Risse in Graniten, in Stahl

sowie in Glas unter hohem Druck hochoverhitztes Gas strömen. Dabei entstanden im Verlauf der Risse Trichter mit kreisrundem Querschnitt, die Daubree Diatreme nannte. Das aus den Trichtern ausgeworfene Material erzeugte um diese herum kegelförmige Gebilde von der Art der Schlackenkegel, wie wir sie aus Gegenden kennen, wo gegenwärtig Vulkanismus angetroffen wird.

Mehr noch: Nun wird klar, warum auch die linearen Strukturen entstehen müssen. Ringförmige, durch vulkanische Eruptionsprodukte gebildete Strukturen sind gut zu erkennen, wenn ihr Durchmesser 1 bis 2 km beträgt. Die geologische Kartierung in kleinem Maßstab erlaubt die Feststellung vulkanischer Ringe mit einem Durchmesser bis 100 km. Beträgt der Durchmesser solcher Ringe jedoch einige tausend Kilometer, wie bei den ringförmigen Megastrukturen (im Pazifik, im Indischen Ozean usw.), dann erfassen wir die vulkanischen Gürtel als lineare Strukturen, obgleich sie tatsächlich Bögen ringförmiger Strukturen von außerordentlich großem Radius sind. Freilich treten – besonders bei den ältesten geologischen Gebilden des Planeten – nur noch Teile großer Megastrukturen in Gestalt von Bögen auf, die sich wirklich beobachten lassen. So ist möglicherweise auch der nordskandinavische vulkanogene Gürtel nur die Nordgrenze einer riesigen Megastruktur, deren südliche Umgrenzung unter der Russischen Tafel verborgen ist.

Vor dem Hintergrund dieser Megastrukturen entwickeln sich kleinere ringförmige Gebilde. Wir hatten bereits gesagt, daß der Durchmesser solcher Strukturen mit der Tiefe ihrer Entstehungsursache in direktem Zusammenhang steht. Je kleiner der Ring ist, um so weniger tief liegt die Energie- und Stoffquelle, die seine Ausbildung bewirkte. Die Kombination vulkanischer Ringe unterschiedlichen Maßstabs ist das Ergebnis der Interferenz (Erscheinung bei Überlagerung von Wellenzügen) von Ringen unterschiedlicher Ursprungstiefe und -zeit. Man kann sich eine Vorstellung von diesen Vorgängen machen, wenn man an die Interferenz von Wasserwellen denkt, die entsteht, wenn man immer kleinere und leichtere Steine nacheinander ins Wasser wirft.

Ein Beispiel für eine geschlossene Megastruktur, deren



*Satellitenaufnahme der pazifischen Küste Perus nördlich Lima aus 200 km Höhe. Das Bild zeigt die schneefreie, 4 bis 5 km hohe, küstennahe Schwarze Kordillere sowie deutlich parallel dazu die schneebedeckte, bis zu 6 700 m hohe Weiße Kordillere.*

Umrandung vulkanische Gürtel bilden, ist die Struktur Alaska–Aleuten–Tschukotska; ihr Durchmesser beträgt etwa 2 400 km. Im Süden wird sie durch den vulkanischen Aleutenbogen begrenzt, im Westen durch die Vulkankette im Korjaken-Gebirge und im Osten durch die Vulkanite von Alaska, die sich im Verlauf bogenförmiger Brüche entwickelt haben.

Die gleiche Größenordnung hat die Megastruktur des Großen Beckens. Der Durchmesser beträgt etwa 1 400 km (wir erinnern daran, daß diese Megastrukturen Bestandteil der noch größeren Struktur des Pazifischen Ringes sind). In ihrem Bereich liegen die vulkanischen Ringe der Sierra Nevada (Durchmesser 600 km), von Sacramento (Durch-



*Die malerische Bucht von Petropawlowsk – Kamtschatka – ist Teil einer ringförmigen Struktur mit über 50 km Durchmesser.*

messer 300 km) und von Columbia (Durchmesser 500 km). Innerhalb dieser Ringe gehören die tektonisch-magmatischen Strukturen des Colorado-Plateaus (San Juan), in denen ebenfalls kleinere vulkanische Ringstrukturen, die sogenannten Kalderen (Silverton, Lake City u. a.), liegen. In analoger Weise finden die Geologen auch in den vulkanischen Gürteln bzw. Bögen (Ochotskisch-Tschukotskischer Bogen, Kamtschatkabogen, Nord-Balchascher Bogen und viele andere) immer elementarere vulkanische Ringe.

## Ringstrukturen auf dem Mond und den Nachbarplaneten

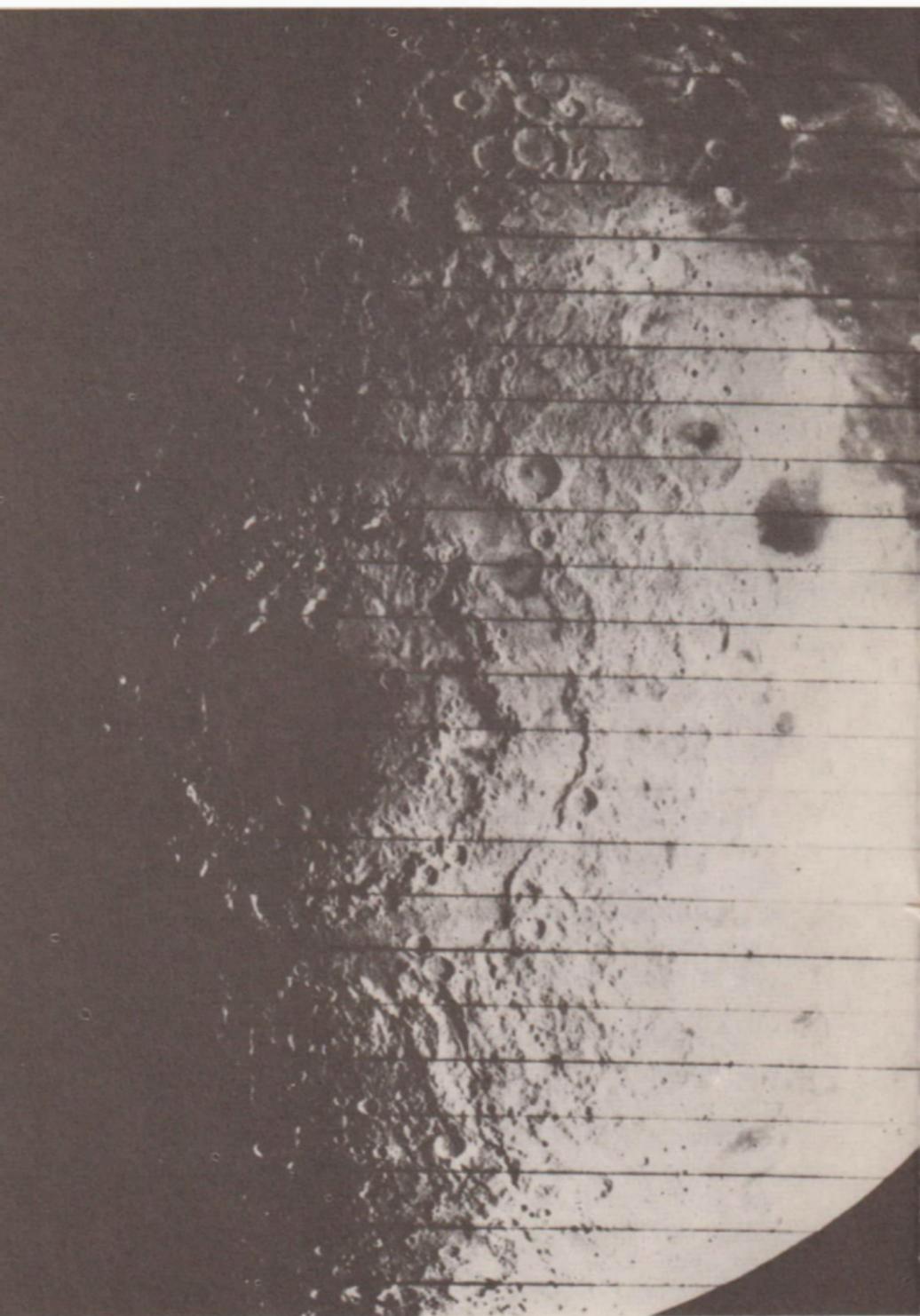
Nachdem wir über ringförmige Strukturen im Aufbau der Erdoberfläche berichtet haben, erscheint es als notwendig,



unseren Planeten unter diesem Aspekt mit dem Mond, dem Mars und der Venus zu vergleichen, wo sich ebensolche ringförmigen Strukturen gezeigt haben.

Vergleichen wir Abbildungen der Planeten des Sonnensystems, die in etwa gleichen Maßstäben gereicht werden, miteinander, so läßt sich recht gut die Gleichartigkeit ihres Aufbaus ermessen. Allerdings sollte uns die Analyse der Ringstrukturen unterschiedlicher Größe auf der Erde zu großer Vorsicht bei der Anwendung eines Begriffes wie Krater auf Ringstrukturen anderer Planeten veranlassen.

Seit langem schon untersucht der Mensch den Mond. In der Antike hat Aristarch – 2 000 Jahre vor Copernicus – eine heliozentrische Hypothese aufgestellt und die Entfernung zwischen Erde und Mond auf 5 % genau berechnet. Demokrit nahm an, daß sich die Unterschiede im Aussehen der Mondoberfläche aus Schatten erklären, da »der Mond Täler und Höhen aufweist«. Die Pythagoreer verfaßten Dutzende, wenn nicht Hunderte von Abhandlungen, in denen sie nachwiesen, daß das Bild der Mondoberfläche,





*Der Krater Yuti auf dem Mars mit einem Durchmesser von 18 km und mit Fließstrukturen in der Umrandung (Aufnahme Viking 1 vom 22. Juni 1976, NASA)*

wie wir es sehen, durch das Relief bestimmt wird. Aristoteles fand in den auf dem Mond zu beobachtenden Linien eine Analogie zu Umrissen auf der Erde und vertrat die Auffassung, daß die Mondoberfläche wie eine »polierte Kugel« die Umrisse irdischer Meere und Kontinente widerspiegele.

Mit der Erfindung des Teleskops begann die eigentliche Entwicklung der Selenographie. Diese Zeit ist mit den Namen von vier großen Forschern des 16. und 17. Jahrhunderts verbunden: Tycho Brahe, Galileo Galilei, Johannes Kepler und Isaac Newton. Galilei, der den Mond als

*Mare Orientale auf der Rückseite des Mondes mit Ringstrukturen bis zu 700 km Durchmesser (Aufnahme Orbiter IV)*

erster mit Hilfe eines Teleskops betrachtete, schrieb: »Ich bin außer mir vor Verwunderung, da ich mich bereits davon überzeugen konnte, daß der Mond einen Körper darstellt, der der Erde ähnelt.« 1647 zeichnete und veröffentlichte Johannes Hevelius die ersten ausführlichen Mondkarten. Zu jener Zeit erhielten auch die hervorstechendsten Objekte der Mondoberfläche ihre Namen: Oceanus Procellarum (Ozean der Stürme), Mare Imbrium (Regenmeer), Mare Serenitatis (Meer der Heiterkeit), Kaukasus, Karpaten, Apenninen u. a.

Die dritte, kosmische Etappe begann in jüngster Zeit: Im Januar 1959 flog die automatische Station Luna-1 in 5 000 km Entfernung am Mond vorüber und übermittelte uns Informationen über das Magnetfeld unseres Begleiters. Im September 1959 landete Luna-2 im Gebiet des Kraters Autolycus. In der Gegenwart werden wir Zeugen der geologischen Etappe in der Erforschung des Mondes. Automatische Stationen haben noch vor der Landung eines Menschen auf dem Mond Zehntausende Aufnahmen der Mondoberfläche zur Erde übermittelt und einige hundert Analysen ihrer chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften vorgenommen.

Die gegenwärtigen geologischen Untersuchungen des Mondes zeigen mit zunehmender Deutlichkeit, daß nicht nur die Erdkruste, sondern auch die Oberfläche des Mondes durch vulkanische Prozesse endogener Natur gebildet worden ist (obwohl nach wie vor auch die »Meteoritenhypothese« vom Ursprung vieler Mondkrater weiterentwickelt wird).

Sowohl auf dem Mond als auch auf der Erde bestehen Systeme ringförmiger tektonisch-magmatischer Strukturen unterschiedlicher Größenordnungen, von einigen wenigen Kilometern bis zu mehreren hundert und tausend Kilometern im Durchmesser. Das Problem ist die Ermittlung ihrer Natur und ihre Systematisierung. Nur die kleineren von ihnen, die man nach ihrer Größe mit irdischen Vulkanen vergleichen kann, lassen sich als vulkanischen Ursprungs definieren.

Die größeren Ringe von einigen hundert oder gar tausend Kilometern Durchmesser wurden bereits von magmatischem (nicht vulkanischem) Gestein gebildet, das

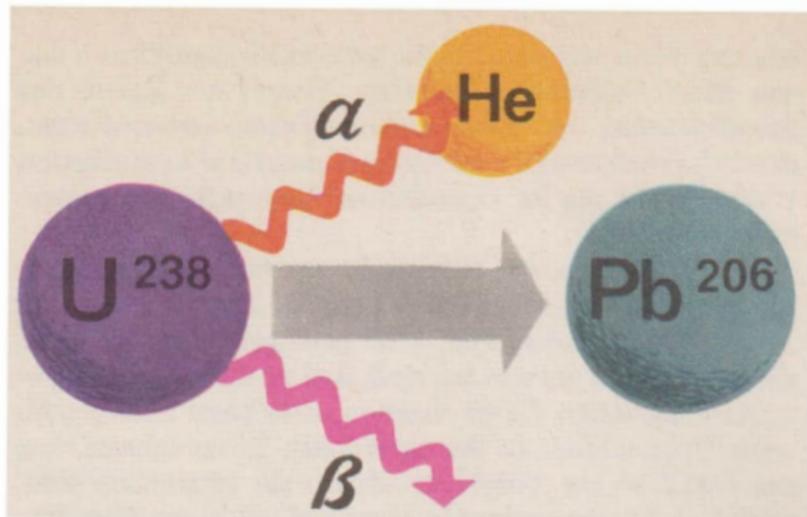
aus der Tiefe stammt. Solche großen Ringstrukturen wie das Mare Orientale (»Östliches Meer«) am Rande der Mondrückseite mit sieben konzentrischen Gebirgsketten, deutlich erkennbaren zahlreichen Rissen und Kraterketten können nicht als im eigentlichen Sinn vulkanisch interpretiert werden.

Bei der Analyse von Ringstrukturen auf anderen Planeten muß auch die Möglichkeit berücksichtigt werden, daß sie nicht zur gleichen Zeit in der geologischen Geschichte dieser Planeten entstanden sind, daß sie ihren Ursprung in unterschiedlichen Tiefen nahmen. Dies hatte naturgemäß auch Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der Gesteine zur Folge, aus denen sie entstanden sind. Offenbar ist die generelle Verwendung eines Begriffes wie »Krater« für die jeweiligen Strukturen auf dem Mond, auf dem Mars oder auf der Venus ebensowenig gerechtfertigt wie seine Anwendung auf die pazifischen Ringstrukturen der Erde.

## Die expandierende Erde

Am Ende dieser kurzen Übersicht über die Erscheinungsformen des vulkanischen Prozesses und über deren Evolution in der Geschichte unseres Planeten müssen wir auch auf die Ergebnisse der ozeanischen Geologie eingehen. Diese Wissenschaft hat heute bei der Erforschung der Ursachen und Formen des Energiehaushalts der Erde große Erfolge erzielt, insbesondere durch die Untersuchung der Wärme- und Stoffübertragung, die bestrebt ist, den Planeten mit dem Weltraum und seiner Umgebung ins thermodynamische Gleichgewicht zu bringen. Wie wir bereits sagten, besitzt die Erde starke endogene Wärmequellen; diese Wärme wird durch vulkanische, hydrothermale postvulkanische Prozesse und mittels Wärmeleitung in der Kruste abgegeben.

Ihren eigentlichen Ursprung hat diese Wärme, wie viele Wissenschaftler annehmen, im radioaktiven Zerfall. Grundsätzlich kann man aber auch einen beliebigen anderen Ursprung für diese Wärme annehmen, z. B. gravitative Kompression. Radiogene Wärme wird im Gesamtvolumen



*Wärmeproduktion durch freigesetzte Strahlungsenergie beim radioaktiven Zerfall des Urans*

des Planeten erzeugt, doch sind nur die äußeren Hüllen an ihrer Abstrahlung beteiligt.

Der endogene Wärmestrom bildet sich nur in den äußeren Planetenschichten (in einer Tiefe um 500 km) aus, während die unterhalb von 1000 km Tiefe gelegenen Schichten an den Wärmeverlusten nicht beteiligt sind, sondern diese Wärme nur erzeugen.

Der innere Bereich der Erde, aus dem die radiogene Wärme nicht abfließen kann, erfährt eine ständige, sehr langsame Aufheizung und daher auch Expansion, während in der Perisphäre (in den äußeren Hüllen) eine derartige thermische Expansion nicht vorliegt.

Da der innere Bereich des Planeten die Perisphäre nach Volumen und Masse erheblich übertrifft, kommt es hier zu Dehnungen und Bewegungen. Die Wärme wird in die mechanische Arbeit der Tektogenese, der Bewegungen der Erdkrinde, umgewandelt. Somit ist die Expansion der Erde die Hauptursache für die geologische Entwicklung unseres Planeten.

Wir haben bereits gesagt, daß die Tektogenese und der

*Mittelozeanischer Rücken im Atlantik. Die zentrale Grabenzone – das Rift – wird an zahlreichen Querstörungen versetzt, in deren Verlauf gleichfalls vulkanische Prozesse ablaufen.*

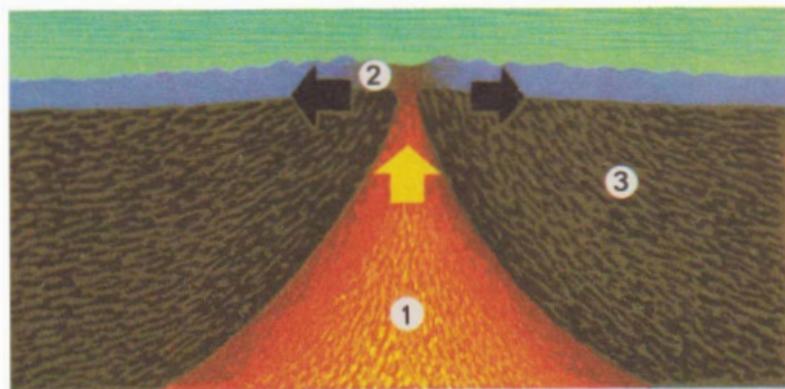


Abfluß endogener Wärme auf den Kontinenten besonders intensiv in den Durchlässigkeitszonen erfolgen, in den mobilen faltbaren Zonen der Erdkruste, wo die vulkanischen Prozesse lokalisiert sind. Über die Formen der Durchlässigkeitszonen haben wir weiter oben gesprochen. Doch auch in der gegenwärtigen Etappe ist die Expansion der Erde nach den Auffassungen von zahlreichen Geologen die entscheidende Triebfeder für die geologische Entwicklung der Erde.

Diese Entwicklung findet in den *gigantischen mittelozeanischen vulkanischen Rücken* statt, die den ganzen Planeten umgeben. Es ist interessant zu bemerken, daß die Hypothese von einer expandierenden Erde noch vor kurzer Zeit viele Gegner besaß, obwohl sie heute von den meisten Forschern nicht nur anerkannt, sondern auch in der Praxis angewendet wird. Die mittelozeanischen Rücken sind ausgedehnte, wallartige Erhebungen am Ozeanboden bis zu 1 500 km Breite und 3 bis 3,5 km Höhe, die ein einheitliches gesamtplanetares System von etwa 60 000 km Länge bilden, das die ganze Erdkugel umgibt.

Die Gesamtfläche der mittelozeanischen Erhebungen beträgt etwa 30% der Fläche der Ozeane, was ungefähr die Gesamtfläche aller Kontinente ausmacht. Eine Vielzahl von Brüchen gliedert sie in eine große Anzahl von Kämmen und in Rifttäler mit Tiefen bis zu etwa 2 km. Nur die

*Mittelozeanischer Rücken im Profil. 1 – aus dem oberen Mantel aufsteigendes Magma; 2 – Riftzone mit ausfließender Lava; 3 – entstehende Kruste, vom Rift sich ausbreitend (ocean-floor-spreading)*





*Im Jahre 1963 im Atlantik entstandene Vulkaninsel Surtsey (der Name wurde von dem des Feuerriesen der nordischen Mythologie, Surt oder Surtr, »der Schwarze«, abgeleitet). Die Eruptionen dauerten bis zum Jahre 1967. Über der Riftzone etwa 30km vor der Südküste Islands häuften sich in wenigen Jahren Lavamassen (vor allem Tephra, lockere vulkanische Auswurfprodukte) durch intensive und schnelle Förderung bis zur Inselbildung an. Obwohl nun vor allem die winterliche Brandung an der Süd- und Westküste der Insel nagt (nur am Nordrand wird Sand angeschwemmt), wird die mit ihrer höchsten Erhebung 154m den Meeresspiegel überragende Insel einige Jahrhunderte überstehen.*

allerhöchsten Gipfelgruppen erreichen den Wasserspiegel des Ozeans. Die Eigenart des Reliefs der mittelozeanischen Rücken besteht darin, daß es in jüngster Zeit durch neogenquartäre tektonische und vulkanische Prozesse entstanden ist.

Die mittelozeanischen Rücken zeichnen sich durch einen verstärkten Wärmestrom aus, besonders in den axial verlaufenden Riftzonen. Die Intensität des Vulkanismus in den mittelozeanischen Rücken, die nichts anderes darstellen als ozeanische vulkanische Gürtel, ist so groß, daß

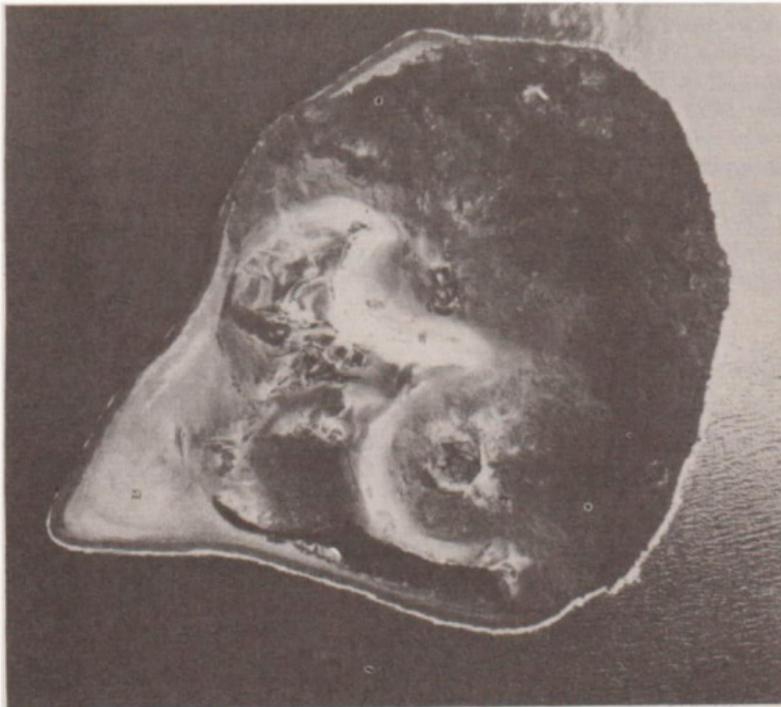
hier allein das im Känozoikum aufgetretene Volumen der basaltischen Laven  $2 \cdot 10^7 \text{ km}^3$  beträgt.

Unterhalb dieser Basalte liegt bereits der Mantel. Wenn man bedenkt, daß während der gesamten Erdgeschichte, d. h. in  $3,5 \cdot 10^9$  Jahren, insgesamt  $3 \cdot 10^9 \text{ km}^3$  Lava durch Eruptionen an die Erdoberfläche befördert wurden, so ist der Anteil der jungen mittelozeanischen vulkanischen Rücken am Gesamtvulkanismus der Erde beträchtlich.

Angemerkt sei, daß die submarinen ozeanischen Erhebungen und vulkanischen Gürtel nicht isoliert von den oberirdischen Gürteln sind, sondern sich unter den Kontinenten fortsetzen.

Eine wichtige Aufgabe der Geologie besteht darin, diese Fortsetzungen zu verfolgen und die Ergebnisse dieser

*Ein Luftbild der isländischen Landvermessung aus dem Jahre 1975 zeigt die etwa 240 Hektar umfassende, in ihrer längsten Erstreckung in Nord-Süd-Richtung rund 1800 m große Vulkaninsel Surtsey mit den zwei mächtigen Kratern Surtur I und Surtur II und einigen Nebenkratern.*



Erscheinung ausfindig zu machen. So setzen sich der Kamm und der Osthang des östlichen Pazifischen Rückens unter Mexiko und im Anschluß daran unter dem Colorado-Plateau sowie unter sämtlichen Weststaaten der USA von Kalifornien bis Utah fort. Diese Gebiete sind jedoch die Schauplätze verbreiteter, intensiver, auf dem Festland verlaufender vulkanischer Prozesse. Gleichzeitig handelt es sich hier um die reichsten Erzprovinzen Mexikos und des Westens der USA, wo wir vulkanische Lagerstätten von Gold, Silber, Quecksilber, Blei, Zink, Kupfer, Molybdän und vielen anderen Metallen finden.

Von ihnen und weiteren Erzen wird im nächsten Kapitel die Rede sein.

---

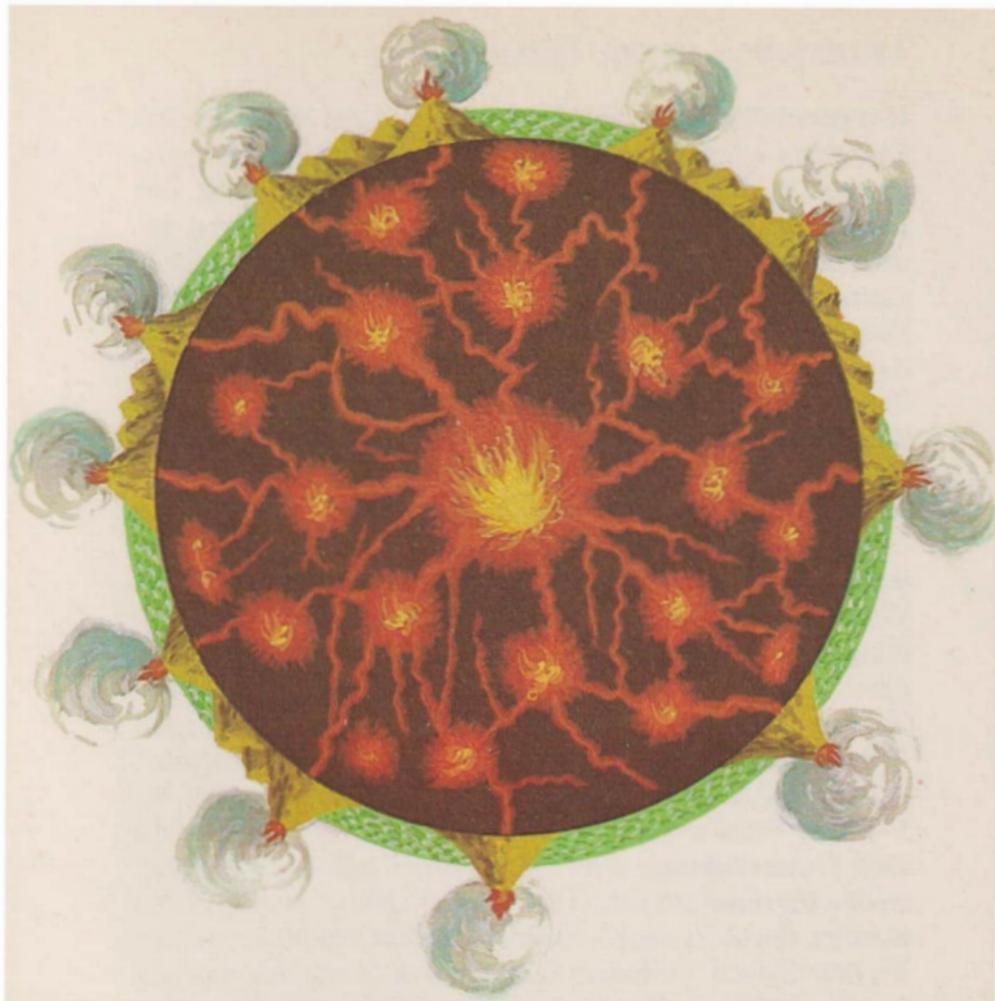
# Flüchtig und flüssig

---

## Die zweite Komponente

Manche Wissenschaftler, die den vulkanischen Prozeß richtig als physikalisch-chemischen Vorgang definieren, verstehen ihn jedoch als Transport von Material aus den inneren Teilen der Erde an deren Oberfläche, wobei diese Stoffe gleichzeitig entgast werden. Das ist jedoch nicht ganz exakt. Die Entgasung des Mantels ist bereits an und für sich eine Form der Wärme- und Stoffübertragung. Während seiner Bewegung zur Planetenoberfläche bewirkt ein derartiger als intratellurisch bezeichneter Energie- und Stoffstrom in den Zonen erhöhter Durchlässigkeit Magmabildung und erfährt dabei selbst eine Evolution. Im Ergebnis der auf bestimmten Niveaus in den geologischen Hüllen der Erde ablaufenden physikalisch-chemischen Reaktionen entstehen sowohl eine gasgesättigte Silikatschmelze – das Magma –, die *erste Komponente* des vulkanischen Prozesses, als auch ein endogenes Fluid, seine *zweite Komponente*.

Sobald das Magma in die Nähe der Oberfläche kommt, wo ein geringerer Druck herrscht, als zur Erhaltung seiner flüchtigen Bestandteile nötig wäre, verliert es ebenfalls fluide und gasförmige Stoffe. Allerdings machen sie nicht die zweite Komponente aus, sondern nur einen unbedeutenden Teil davon. Deshalb muß nochmals unterstrichen werden, daß in diesem Kapitel nicht von der flüchtigen Komponente der Magmaschmelze die Rede sein wird, die selbst bei den am stärksten gasgesättigten Magmaarten nur 1 bis 2 Volumenprozent erreicht. Wir wollen vielmehr von einer zweiten Komponente des vulkanischen Prozesses



*Mittelalterliche Vorstellungen über den Bau unserer Erde und die Ursachen des Vulkanismus. Ein Zentralfeuer im Erdinnern versorgt über Zwischenherde und Kanäle die Vulkane an der Oberfläche (nach einer Darstellung in »Mundus Subterraneus« von Athanasius Kircher, 1664).*

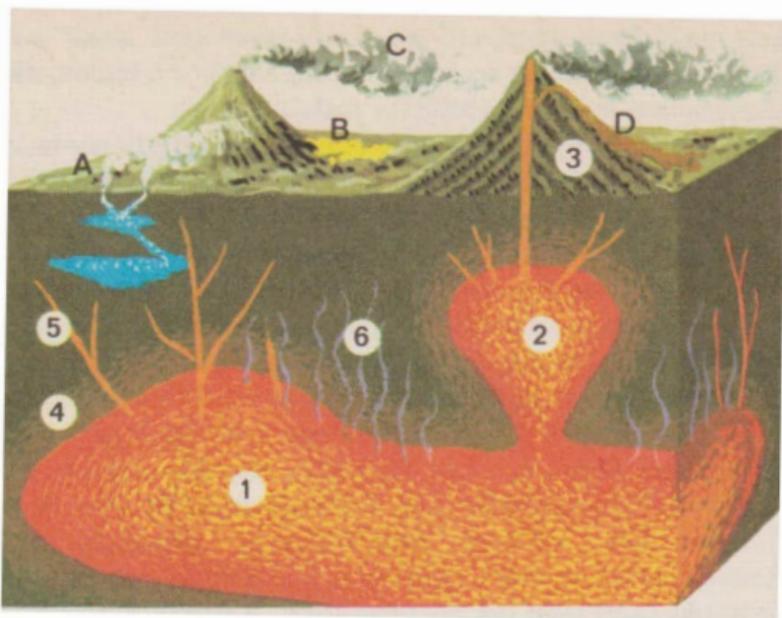
sprechen, die hinsichtlich ihrer energetischen (thermischen) Leistung mit den eigentlichen vulkanischen Erscheinungen vergleichbar ist. Der grundsätzliche Unterschied zwischen den flüchtigen Stoffen aus dem Magma und dem Fluid ist sehr groß und macht sich bei allen Aspekten der endogenen Vorgänge unseres Planeten bemerkbar.

## Transporte in der Gasphase

Mengenmäßig erreicht die Gasphase des Magmas bei Eruptionen außerordentliche Werte. So hat man ausgerechnet, daß der mexikanische Vulkan Paricutin, der 1943 plötzlich auf einem Maisfeld entstanden war, innerhalb von acht Jahren, d. h. bis Ende 1951, eine Gesamtgasmenge (umgerechnet auf Wasser) von 39 Millionen Tonnen freigesetzt hat, während die Menge von Lava und Asche 3 556 Millionen Tonnen betrug. Und nur diese 39 Millionen Tonnen flüchtiger Stoffe machen jenes eine Prozent aus, das im Magma gelöst war und bei dessen Eruption instabil wurde und entweichen konnte.

Wir haben bereits von den ungeheuren Wasser- und Dampfmen gen gesprochen, die der Ätna ausstößt. Gewöhnlich findet man in derartigen vulkanischen Gasen Wasserdampf, Kohlendioxid, flüchtige Schwefelverbindungen und Chlorwasserstoff. Die Untersuchung der Gase, die aus dem Lavasee im Krater des Vulkans Nyiragongo (Afrika) entweichen, ergab, daß sie zum überwiegenden Teil aus Kohlendioxid (bis 87 %) bestehen und in geringeren Mengen Schwefeldioxid (bis 8 %), Kohlenmonoxid (bis 5 %) und Wasserstoff (bis 2 %) enthalten. Überhaupt sind viele Untersuchungen der eigentlichen vulkanischen Gase an den verschiedensten Orten unseres Planeten ausgeführt worden, darunter auch von sowjetischen Wissenschaftlern an den tätigen Vulkanen Kamtschatkas und der Kurileninseln. Dabei stellte sich heraus, daß zu den aus dem Magma freigesetzten Gasen auch  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Br}_2$  und  $\text{J}_2$  gehörten. In den vulkanischen Gasen, z. B. des Sjova-Sendzan (Japan), sind auch flüchtige Metallverbindungen mit Zn, As, Sn und Ag zu finden. In den Gasen des Vulkans Kljutschewski auf Kamtschatka wies man ebenfalls metallhaltige Anteile nach.

Die aus dem Magma freigesetzten Gase ermittelt man, indem man die in erstarrter Lava »konservierten« Einschlüsse untersucht. Die Hauptmenge bilden Wasser (80–99 %, je nach Zusammensetzung der Lava),  $\text{CO}_2$  und CO (ihr Anteil ist in den Basalten größer als in sauren Laven). Der Gehalt an  $\text{H}_2$  und  $\text{N}_2$  sowie  $\text{Cl}_2$  und  $\text{F}_2$  ist veränderlich. Erwähnt sei, daß man in Tiefengesteinen



*Magmatische Prozesse in und auf der Erdkruste. 1 – Magmaintrusion in die Erdkruste, Bildung von Tiefengesteinen; 2 – Anlage von Magmakammern unter den Vulkanen; 3 – ausfließende Lava, Bildung der vulkanischen Gesteine; 4 – Veränderung der Nebengesteine, Kontaktmetamorphose; 5 – Aufstieg und Absatz von Restschmelzen und flüchtigen Komponenten aus dem Magma in Spalten und Gängen; 6 – Aufstieg und Absatz des endogenen Fluids aus tieferen Bereichen. A – Geysire und heiße Quellen; B – Solfatarenfeld; C – Gasaushauchungen; D – Laven und Tuffe*

des Mantels, die nicht zur Eruption gelangt waren, auch auf wasserstoffgefüllte Hohlräume stieß.

An der Oberfläche des Halemaumau-Lavasees (Hawaii) kann die Verbrennung von Wasserstoff und anderen brennbaren Gasen beobachtet werden, wobei die Flammen eine Höhe bis zu 4 m erreichen. Freilich vermag der Wissenschaftler bei der Untersuchung von Gas-, Gas-Flüssigkeits- und sogar Schmelzeinschlüssen in Laven und Gesteinen nicht immer mit Sicherheit zu behaupten, daß er es wirklich mit den Gasen desselben Magmas zu tun hat. Die gemeinsam mit dem Magma entstehenden Fluide dringen nämlich in Gestalt eines Stroms sogenannter transmagmatischer Lösungen durch das Magma hindurch bis an die Oberfläche. Auch sie können im Gestein konserviert werden und eine außerordentliche Vielfalt von gasförmigen

gen, gasförmig-flüssigen, geschmolzenen und sogar aus drei und vier Phasen bestehenden Einschlüssen bilden, die nicht selten auch Erzminerale enthalten.

Es wurde festgestellt, daß während der Eruptionsphase aus dem Basalt gemeinsam mit den Gasen z. B. auch *Kupfer, Lithium, Beryllium, Blei, Zinn, Silber, Zink, Kobalt, Nickel, Molybdän, Wismut, Gallium, Tellur, Chrom, Vanadium, Barium* und *Strontium* als Chloride entweichen. In einigen Sublimaten (aus Gasen gebildeten Niederschlägen) ist die Kupferkonzentration im Vergleich zum normalen Kupfergehalt in den Basalten 1 000mal so groß.

In Gestalt von Fluorverbindungen verflüchtigen sich Eisen und Silizium  $\text{FeF}_3$  und  $\text{SiF}_4$  aus den Laven des Vulkans Kljutschewski auf Kamtschatka. In den Sublimaten des Vulkans Schewelutsch, ebenfalls auf Kamtschatka, wurden außerdem Vanadium – in einigen Sulfaten fand man bis zu 12%  $\text{V}_2\text{O}_5$  – sowie Bleisulfide festgestellt.

Die Zusammensetzung der vulkanischen Gase hängt von vielen Faktoren ab, von der Zusammensetzung des Magmas, der Austrittstemperatur des Gasgemisches, der seit dem erfolgten Austritt verstrichenen Zeit usw. Mit zunehmender Temperatur steigt die Konzentration von Metallen und wenig flüchtigen Komponenten in den vulkanischen Gasen. Verschiedene Eruptionen ein und desselben Vulkans sind von der Freisetzung unterschiedlicher Gase begleitet.

In den trockenen Rückständen der Kondensate des Vulkans Nyiragongo fand man Zn, Be, Ti, Sc, Pb, Cu, Ag, Co, Ni, V, Sr, Zr, Mo und Sn. In den Gasen des Vulkans Sjova-Sendzan auf der japanischen Insel Hokkaido sind enthalten: Zn, Cu, Ge, As, Sn, Ag, Pb, Bi, Cr, Ni, Mo, Rn und Re. In den Sublimaten des Vulkans Schewelutsch auf Kamtschatka entdeckte man noch höhere Konzentrationen von Zi, Be, Rb, Sn, Ag, Zn, Co, Ni, Zr, Mo, Bi, Te, Cr, Ga, W, Ba, Sr, As und Cd. In der Umgebung der Fumarolen des Vulkans Schiran in Japan stellte man in Aluminiumsulfaten eine hohe Nickelkonzentration (bis 1,64%) fest. Die Sublimate von der Weißen Insel, einem Andesitvulkan auf Neuseeland, enthalten vergleichsweise hohe Konzentrationen von Pb (bis 1%), V (0,03%), B (5%), Cu (0,4%), As

(0,3%), Zn (0,3%) und Sn (0,5%). Auf dem Vesuv fand man nach der Eruption des Jahres 1906 in den vulkanischen Gläsern Eisen- und Kupfersulfid in Gestalt des Minerals Chalkopyrit und in den Fumarolen Bleisulfid (Galenit). Im Tal der Zehntausend Dämpfe in Alaska wurden im Fumarolenmagnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) hohe Konzentrationen an Cu, Zn, Mn, Mo, Rb, As, Sb, Sn, Ag, Ni, Co, Ti, Bi, Se und Te festgestellt. Bei einem submarinen Vulkan der Neuen Hebriden entdeckte man, daß die Fumarolen Kupfer ausstragen, wobei der Kupfergehalt in den Niederschlägen 12,3% erreicht.

Ergänzend sei festgestellt, daß erhebliche Metallmengen in Gestalt von Chloriden, Fluoriden, Bromiden u. a. an der Oberfläche vulkanischer Aschepartikeln absorbiert sind. Durch wäßrige Auszüge solcher Aschen wurden z. B. nach Ausbruch des Vulkans Besymjanni auf Kamtschatka im Jahre 1956 etwa 20 Millionen Tonnen leicht löslicher Stoffe weggeführt.

Diese kurzen Angaben über die chemische Zusammensetzung der flüchtigen Stoffe, die sich während der Eruption vom Magma trennen, zeigen: Wenn diese anschließend in den Kreislauf der Natur eintreten, können sie die chemische Zusammensetzung des Wassers im Weltmeer sowie der hier entstehenden Sedimente beeinflussen, und sie beeinflussen sie, besonders bei submarinen Vulkanen, auch tatsächlich, obwohl die Bedeutung dieses Prozesses von vielen Forschern aller Wahrscheinlichkeit nach überbewertet wird.

## Flüssige Schatzkammern

Sehr viel wichtiger und von Bedeutung für den Planeten insgesamt ist eine andere Form des vulkanischen Prozesses, die gleichzeitig mit der Bildung feuerflüssiger Schmelzen auftritt und dieser nach Wärmeinhalt, ja sogar nach der Masse der beteiligten Stoffe gleich ist. Das ist die *zweite Komponente* des endogenen Prozesses, die *hydrothermale Wärme- und Stoffübertragung* in den obersten Hüllen unseres Planeten, die nicht nur für die Bildung der Hydro- und Atmosphäre, sondern auch für die Entstehung

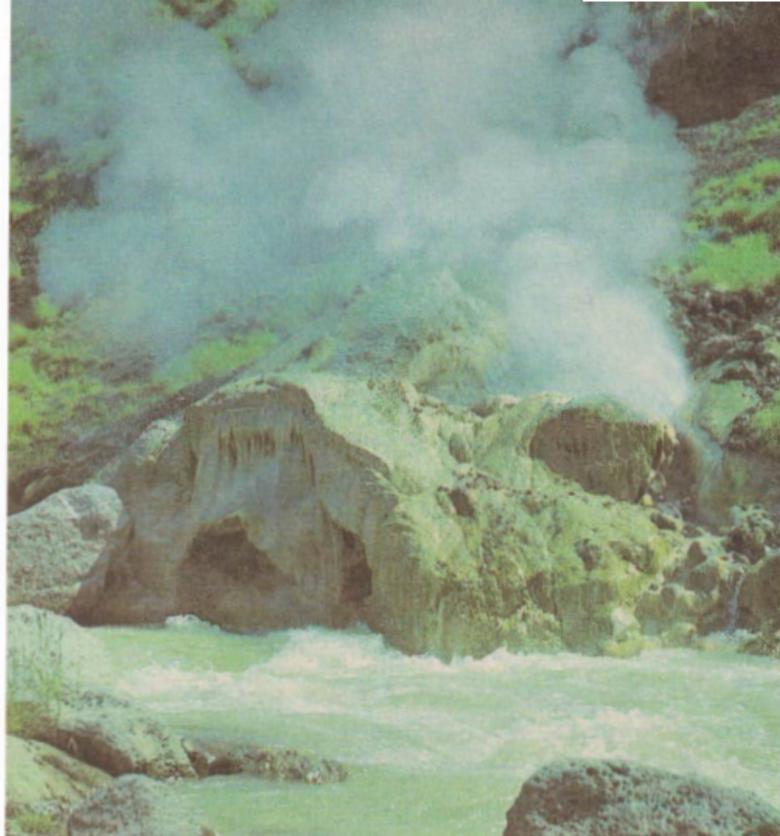
sämtlicher mineralischer Reichtümer der Erde verantwortlich ist.

Ebenso wie die vulkanischen Gase und Exhalationen fördern die hydrothermalen Quellen viele Metalle aus den Tiefen der Erde an die Erdoberfläche und dann weiter ins Weltmeer. Im Wasser des heißen Sees am Vulkan Semjatschik fand man (in mg/l): Cu – 0,4; Zn – 2,2; Pb – 1; Ni – 3; Co – 0,8; Sb – 6; Mn – 16 und Fe – 1 086. In den wohlbekanntesten Quellen der Kaldera Uson sowie im Tal der Geysire auf Kamtschatka ermittelte man folgende Konzentrationen (in mg/l): As – bis 40; Zn – bis 0,4; Cu – bis 0,1; Sb – bis 0,6; Ag – bis 0,015; Mo – bis 0,014; Hg – bis 0,012 und Pb – bis 0,05. Nicht selten zeigen diese Wässer auch erhöhte Konzentrationen an B, Li, Pb und Cs. Im Wasser der Hydrothermen von Paushet, wo das erste Erdwärmekraftwerk der UdSSR errichtet wurde, findet man hohe Konzentrationen von As, Mo, Cu, W und in den Heilquellen von Paratun auf Kamtschatka Ag, As, Mo, Cu, Zn, Pb und W. Aus dem Wasser vieler heißer Quellen scheiden sich erzhaltige Minerale mit Arsen, Quecksilber, Antimon sowie gediegenes Kupfer und Gold und noch vieles andere ab und reichern sich in den Ablagerungen stark an.

In den Beppu-Quellen in Japan beträgt die Goldkonzentration im Wasser nur 0,000 04 g/t, in den Silikatsedimenten dieser Quellen jedoch 55 g/t. Das gleiche Bild beobachten wir bei Quellen auf Neuseeland. Im Quellwasser sind etwa 0,000 04 g/t Gold enthalten, in den Niederschlägen (Geysiriten) dagegen 85 g/t. In den Niederschlägen der bekannten heißen Mineralquellen Stimbout (USA) beträgt der Goldgehalt 9 g/t und bei den Anaconda-Quellen 24 g/t, und zwar in Eisenhydroxidniederschlägen, den sogenannten Limoniten. Ebenso hoch ist häufig auch der Gehalt an Silber, Kupfer und anderen Metallen in derartigen Niederschlägen.

## Spuren heißer Wässer

Spuren älterer hydrothermalen Tätigkeit als die, die wir heute beobachten, finden sich in vulkanischen Gebieten in Form chemisch veränderter vulkanischer Gesteine, durch



*Heiße Quellen mit kupferhaltigen Sinterbildungen im Tal der Geyshire auf Kamtschatka*

die diese Lösungen hindurchgesickert sind. Die Gesteine verändern sich, weil bestimmte Komponenten ausgetragen werden, während neue Komponenten hinzukommen.

Die eigentlichen mineralisierten heißen Wässer kann der Geologe in solchen Gebieten bereits nicht mehr beobachten. Doch die Spuren ihrer erzbildenden Tätigkeit machen sich sehr deutlich bemerkbar. In diesen Gesteinen findet man Erzminerale, die bei entsprechenden Druck- und Temperaturverhältnissen entstehen konnten. Darunter sind Zinnober ( $\text{HgS}$ ), Antimonit ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), Realgar ( $\text{AsS}$ ), Auripigment ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), Galenit ( $\text{PbS}$ ), Sphalerit ( $\text{ZnS}$ ), Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ), Molybdänit ( $\text{MoS}_2$ ), gediegenes Gold, Silber und Kupfer.

Gewiß, Erzminerale zeigen in den heutigen vulkanischen Gebieten, von seltenen Ausnahmen abgesehen, keine

großen Anhäufungen, die wirtschaftliche Bedeutung hätten. Eine Ausnahme bilden das Quecksilbervorkommen von Monte Amiata in Italien, das 30 000 Jahre alt ist, und die Lagerstätte Sulphur Bank in den USA. Man hatte hier zunächst mit dem Abbau einer Lagerstätte von elementarem Schwefel begonnen. In der Tiefe fand man dann aber auch Quecksilbererze (Zinnober), die einige Zeit hindurch abgebaut wurden, obwohl heißes, mineralisiertes Wasser in die Schächte eindrang.

Spricht man von der gegenwärtigen oberflächennahen Tätigkeit der Hydrothermen in vulkanischen Gebieten, so muß man auch auf Lagerstätten von elementarem Schwefel eingehen. Nach Meinung einiger Fachleute übertreffen die Vorräte an vulkanischem Schwefel die Ressourcen der sogenannten sedimentären Schwefellagerstätten auf den Tafeln, von denen viele einige hundert Millionen Tonnen enthalten.

Das Fehlen großer Anhäufungen von Erzmineralen in den heutigen vulkanischen Gebieten bedeutet ganz und gar nicht, daß die ausgebrachte Metallmenge für die Bildung von Lagerstätten, d. h. ökonomisch nutzbaren Objekten, ungenügend sei. Wir wollen zu überschlagen versuchen, welche Gold- oder Bleivorräte beispielsweise im Verlauf der Tätigkeit hydrothermalen Quellen gebildet werden können, wenn man von der Förderung dieser Quellen ausgeht und sie als verhältnismäßig konstant ansetzt. Die Zahlen – für einen Zeitraum von einer Million Jahren – zeigen folgendes Bild:

Pb	$3,15 \cdot 10^6$ t
Sb	$18,9 \cdot 10^6$ t
As	$1,73 \cdot 10^6$ t
Zn	$6,93 \cdot 10^6$ t
Cu	$1,26 \cdot 10^6$ t
Ni	$9,45 \cdot 10^6$ t
Ag	$1,0 \cdot 10^6$ t

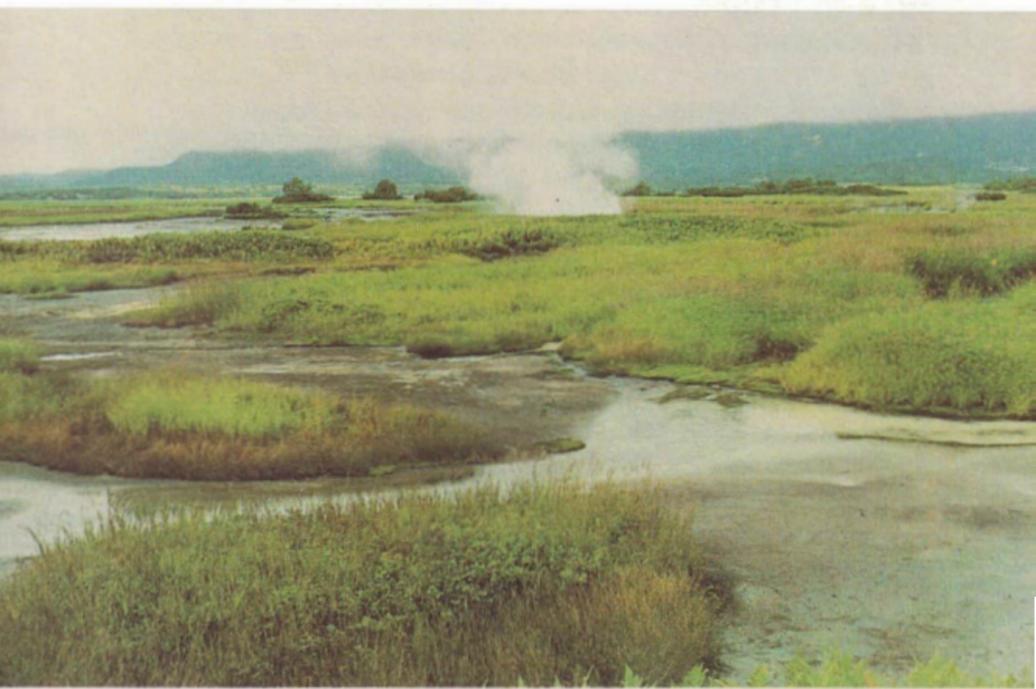
Diese Daten zeigen, daß auch im gegenwärtig ablaufenden hydrothermalen Prozeß sogar sehr große Lagerstätten entstehen könnten, wenn die erforderlichen Bedingungen für die Akkumulierung der Metalle in Form von Mineralen gegeben wären, die unter oberflächennahen Verhältnissen

beständig sind. Diese Bedingungen sind jedoch leider nicht vorhanden, und fast alle der oben aufgezählten Elemente werden vom Wasser gelöst, in das Weltmeer getragen und dort angereichert. Diese unerschöpfliche Schatzkammer wird in Zukunft sicherlich nutzbar gemacht werden.

Einige Metalle, wie beispielsweise Kupfer und Blei, fallen dort aus, wo das Wasser der Flüsse aus den vulkanischen Gebirgen in den Ozean mündet. Hier entstehen in den Sedimenten des Deltas der Flüsse sogenannte Infiltrations-Sediment-Lagerstätten, d. h. Flußdelta-Sandsteine, die mit Kupfermineralen, insbesondere Chalkosin ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), getränkt sind und ebenso wunderliche Gestalt annehmen können wie das Delta selbst.

Die meisten Metalle aber bilden in Lösung beständige Verbindungen, und es bedarf besonderer Bedingungen, um diese Metalle aus ihren natürlichen Lösungen ausfallen zu lassen. So verhält es sich heute, in der gegenwärtigen Epoche des Vulkanismus.

#### *Geysir in der Kaldera Uson auf Kamtschatka*



## Geysire – Zeichen erlöschender Vulkane

Die heutigen Verhältnisse in Oberflächennähe sind vor allem durch niedrigen Druck gekennzeichnet. Er bewirkt die Instabilität der flüssigen Phase, d. h. der fluiden Metallverbindung, aus der im allgemeinen die Abscheidung von Erzmineralen bei Temperaturen von 200 bis 250°C erfolgen kann. Bei niedrigem Druck und der genannten Temperatur siedet die Lösung und verdunstet. Es entsteht Gas, zur Erzbildung jedoch kommt es nicht.

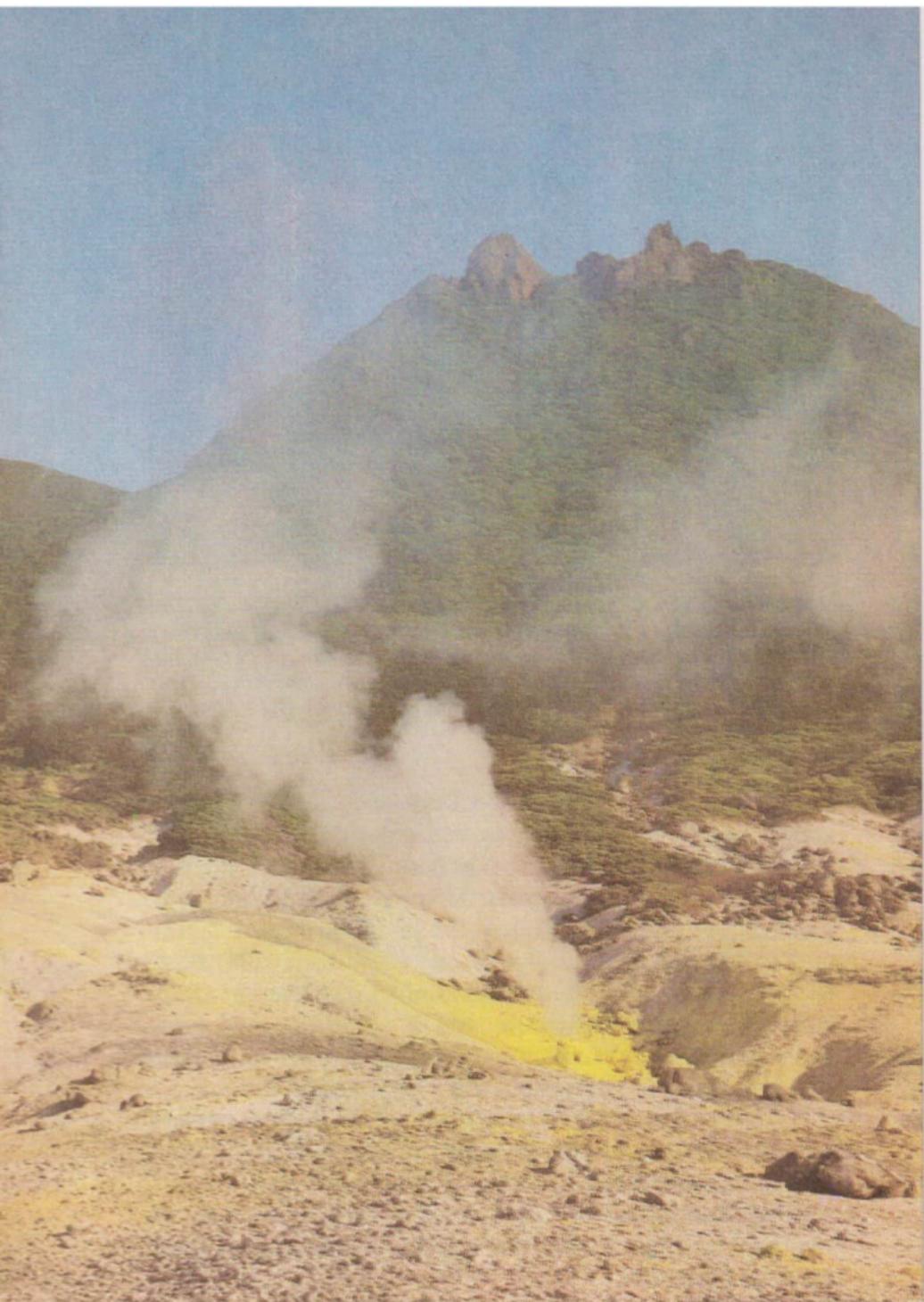
Die Kondensation des Fluids in Durchlässigkeitszonen heutiger vulkanischer Gebiete erfolgt, sobald die Temperatur auf 100°C gesunken ist, nur an der Oberfläche und auch nur im späten Existenzstadium des hydrothermalen Systems, wenn dieses »erkaltet«. Unter diesen Verhältnissen können nur Minerale entstehen, die bei den relativ niedrigsten Temperaturen beständig sind, also elementarer Schwefel, Zinnober, Antimonit, Realgar, Auripigment, Eisensulfide und Minerale, die keine Erze sind: Sulfate (Alunit), Opal sowie verschiedene Tonminerale.

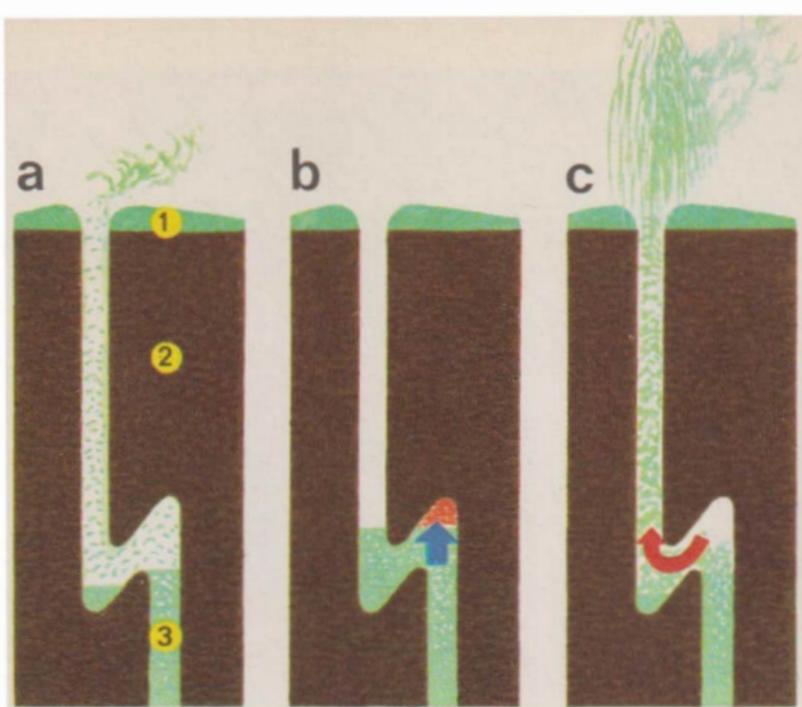
Alle diese Produkte lassen sich gegenwärtig auf den Solfataren-Feldern der Vulkane beobachten. Wirtschaftlich nutzbare Akkumulationen bildet hier, wie bereits gesagt wurde, in der Regel nur der elementare Schwefel.

Es sei hervorgehoben, daß das endogene Fluid nur in den Abschlußetappen der tektonisch-magmatischen Entwicklung vulkanischer Gürtel und der Zentren, aus denen diese bestehen, in derartige thermodynamische Verhältnisse gerät. Die früheren Etappen des tektonisch-magmatischen Zyklus sind dadurch gekennzeichnet, daß die Blöcke der Erdkruste, in denen die endogene Wärme- und Stoffübertragung stattfindet, eine größere Spannung aufweisen, die jedoch gleichmäßiger über das Volumen jedes einzelnen Blocks verteilt ist. Die Durchlässigkeit ist geringer, bzw. das System, in dem das Fluid »wirkt«, ist insgesamt, wie die Geologen sagen, »geschlossener«.

Am wichtigsten ist für uns natürlich die Entstehung nutzbarer Anhäufungen von Erzmineralen, die Erz-

*Elementarer Schwefel im Solfatarengebiet des Vulkans Mendelejew auf der Insel Kunaschir (Kurilen)*





*Geysirtätigkeit. 1 – Sinterablagerungen – Geysirite; 2 – Gestein; 3 – aufsteigendes heißes Wasser mit Gasen; a – Dampf und Gase können entweichen; b – Wasseranstieg verhindert weiteres Entweichen. Dampf- und Gasdruck steigen im Hohlraum (rot) an; c – der entstehende Überdruck stößt das Wasser durch die nach oben offene Röhre an die Oberfläche.*

lagerstätten formieren. Große Drücke in den Wirkungszonen des endogenen Fluids bedingen die Existenz der hydrothermalen Lösungen bei höheren Temperaturen. Aus diesen Lösungen fallen große Mengen von Erzmineralen, Gold, Silber und deren Sulfosalze aus. In größeren Tiefen und früher geschieht dies mit den Blei-, Zink- und Kupfersulfiden, die nicht selten ökonomisch interessante Gold- und Silberanteile enthalten, und noch früher und noch tiefer wird Kupfererz häufig mit einem Anteil von Molybdän und anderen Elementen zum wichtigsten Erz.

Es gibt einige Dutzend oder gar einige hundert Beispiele für Erzlagerstätten der genannten Typen und für ihre zonale raum-zeitliche Anordnung in vulkanischen Gürteln, z. B. auf Zentralkamtschatka, auf den Kurilen, in Japan, im Ural und im Tjan-Schan. Wir werden im nächsten Kapitel darüber berichten.

Hier ist es dagegen wichtig, die allgemeine Tendenz in der Entwicklung des endogenen Prozesses während der diskontinuierlich-kontinuierlichen Geschichte des tektonisch-magmatischen Zyklus zu unterstreichen. Diese Tendenz ist das ständige Bestreben des genannten Prozesses, an die Oberfläche des Planeten vorzudringen, ein Streben, das von Perioden tektonischer Ruhe unterbrochen wird. Diese gerichtete Entwicklung verwirklicht sich in der Erdgeschichte innerhalb der geologischen Zeitalter in Etappen. Gegenwärtig erleben wir die Abschlußetappe des jüngsten tektonisch-magmatischen Zyklus.

Während früherer Etappen gab es die heute zu beobachtenden Erscheinungen an der Erdoberfläche nicht, wie seltsam dies auch nicht nur dem Leser, der kein Fachmann ist, sondern sogar dem Erzgeologen und besonders dem Vulkanologen erscheinen mag. Vor 20 bis 30 Millionen Jahren hätte ein Geologe auf Kamtschatka beispielsweise die an die Oberfläche tretenden Erscheinungsformen des endogenen Fluids, also die heißen hydrothermalen Systeme, die eindrucksvollen Geysire und die heute stattfindende Erzmineralisierung, nicht vorgefunden. Der Entleerungsprozeß hydrothermalen Systeme fand damals in großer Tiefe (und je früher um so tiefer) statt.

## Woher kam das Wasser?

Die raum-zeitlichen Besonderheiten der Evolution des endogenen Fluids sind jedoch weitaus interessanter, wenn man sie in den ältesten vulkanischen Gürteln unseres Planeten zurückverfolgt. Wenden wir uns einmal den Anfängen der geologischen bzw., genauer gesagt, der vulkanischen Geschichte der Erde zu. Es gab einmal eine Zeit, als auf unserer Erde keine Ozeane existierten und wo es nicht einmal den Raum gab, wohin sich das Wasser hätte ergießen können. Nur zu berechtigt sind daher Fragen nach der Art, wie sich die Senken der Ozeane gebildet haben, wie sie sich mit Wasser füllten, woher dieses Wasser kam und wann, aber auch, warum dies geschah.

Die Erdgeschichte begann, als unser Planet in der Morgenröte seiner Existenz (vor 4,5 bis 3,5 Milliarden

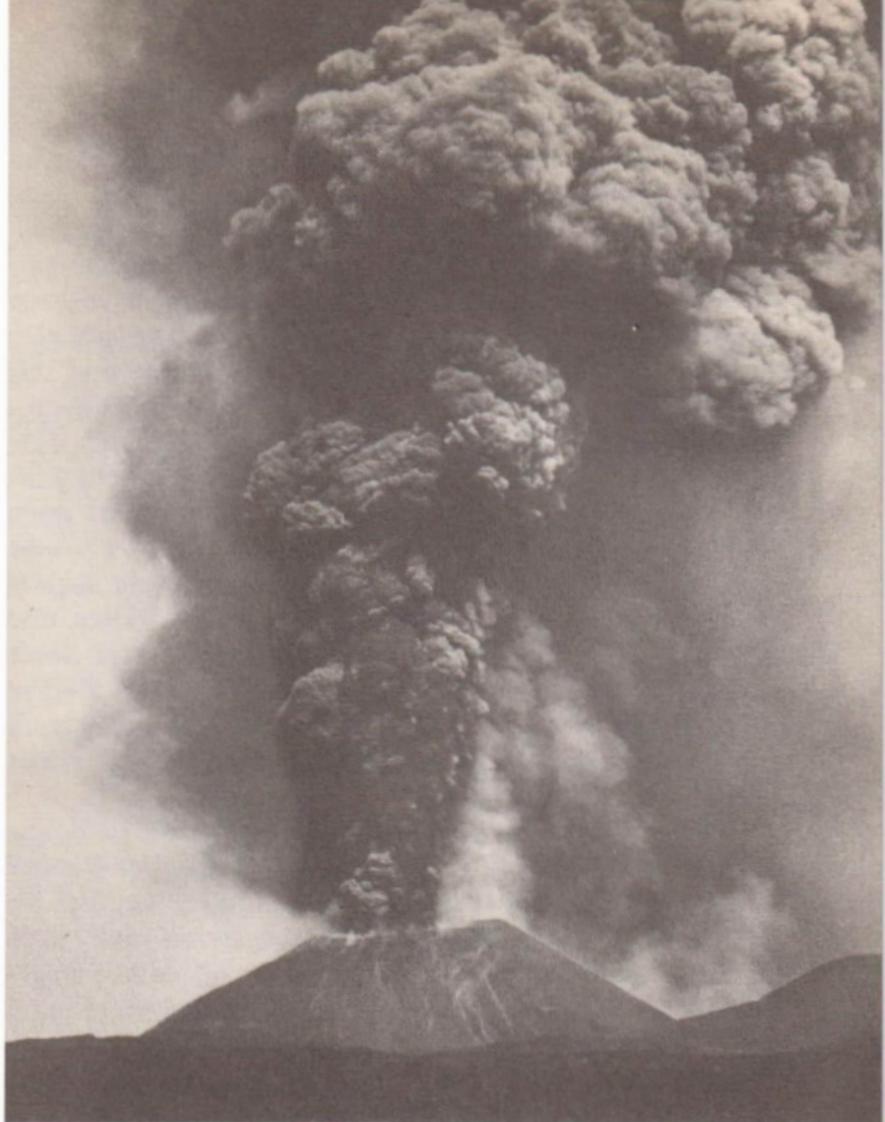
Jahren) das Stadium der gravitativen Kontraktion und der Auftrennung des Materials nach seiner Dichte und seinem potentiellen Energiegehalt durchlaufen und eine kompliziertere, dabei aber deutlicher ausgeprägte schalenartige Struktur gewonnen hatte. Aus einem Planeten mit einer relativ schwach differenzierten Perisphäre (äußeren Hülle) war ein Planet mit einem vielschichtigen Mantel und der anfänglichen »gravitativen« Rinde geworden.

Die Entgasung des Mantels ließ zugleich im Verlauf der gesamten Erdgeschichte bei vulkanischen Eruptionen gemeinsam mit der Silikatschmelze auch Wasser an die Oberfläche treten, dessen Löslichkeit in Schmelzen, abhängig von deren Zusammensetzung, zwischen 3 und 5% schwankt. Auf dieses »synvulkanische« Wasser ist jedoch im Verlauf der Erdgeschichte, wie entsprechende Berechnungen zeigen, höchstens die Hälfte (tatsächlich aber wesentlich weniger!) des Wassers zurückzuführen, das die Weltmeere heute enthalten. Aus diesem Grunde glauben die Wissenschaftler, daß die Hydrosphäre unserer Erde sowohl durch den Austritt von Wasser gemeinsam mit dem Magma (»juveniles« Wasser) als auch durch Kondensation von Wasserdampf in der primären Atmosphäre gebildet worden ist.

In dem Maße, wie die Sonne der Erde ihre dichte Nebeldecke entriß, die aus Wasserstoff und Helium entstand, fuhr die mit großer Geschwindigkeit rotierende Erde fort, ungeheure Mengen von Dampf und anderen Gasen auszustößen, die in die primäre Gashülle der Erde eingingen. So begann unsere heutige Atmosphäre zu entstehen. Später verdichtete sich der Dampf, und Regen von einer Stärke, wie es ihn vorher nicht gegeben hatte und auch später nie mehr geben sollte, ergoß sich auf die dunkle, höckerige Erde. Wasser »schoß« auch aus den Vulkanen, aus heißen Löchern und dampfenden Rissen.

Aber es war ein anderes Wasser, als wir es heute kennen. Die »ersten Regenfälle« brachten nicht nur das Wasser auf die Erde, sondern auch Elemente und Nichtmetallverbindungen mit der Eigenschaft von Erzen, die in jener mineralstoffreichen und heißen Lösung, wie sie der Protozean darstellte, beständig waren.

Gewiß: Im Verlauf der Erdgeschichte fand eine ge-



*Ausstoß großer Dampf- und Gasmengen während der Eruption des Vulkans Tolbatschik auf Kamtschatka im Juli 1975*

richtete Änderung der »Beteiligung« des vulkanischen Wassers bzw. des endogenen Fluids an der Entstehung des Weltmeeres statt. Die Verstärkung der vulkanischen Tätigkeit im Neogäikum und insbesondere in der neuesten Zeit der Erdgeschichte, als etwa zwei Drittel des Gesamt-Lava-Volumens der Erde ausgestoßen wurden, erlaubt die Feststellung, daß der Anteil »vulkanischen« Wassers an der

Auffüllung des Weltmeeres wuchs und daß sein Hauptanteil am Ende des Neogäikums entstand.

Eine sehr bedeutsame Rolle hat das endogene Fluid auch bei der Entstehung der Erdatmosphäre gespielt. Ausgehend von der Zusammensetzung der gasförmigen Ausscheidungen heute tätiger Vulkane und der Zusammensetzung jener flüchtigen Stoffe, die vom Magma bei dessen Kristallisation in Mineralen konserviert werden, läßt sich annehmen, daß im Verlauf des Protogäikums und des Deuterogäikums Wasserdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  sowie geringe Mengen solcher Verbindungen wie  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{SO}_2$  in die Atmosphäre eingebracht wurden. Freien Sauerstoff gab es in dieser Atmosphäre noch nicht. Im Wasser der Ozeane hatten die Säuren ein sehr deutliches Übergewicht. Es war ein chemisch sehr aggressiver Ozean, der das ursprüngliche Festland löste und Elemente wie Na, K, Ca, Fe und Mn in Gestalt ihrer Chloride, Fluoride und Borate vereinnahmte. Das gleiche endogene Fluid, das den Ozean entstehen ließ, trug auch zur Lösung solcher Verbindungen wie  $\text{SiO}_2$  im Wasser des Ozeans bei.

Um viele Besonderheiten der endogenen Erzbildungsprozesse zu verstehen, von denen wir im folgenden Kapitel berichten werden, ist der Hinweis von Interesse, daß die klimatischen Verhältnisse im Protogäikum und aller Wahrscheinlichkeit nach auch im Deuterogäikum »super-tropisch« waren. Die Temperaturen auf der Oberfläche und im Ozean lagen bei  $50^\circ\text{C}$  und höher. Die Erdrinde war stark aufgeheizt; Wissenschaftler nehmen an, daß ihr geothermischer Gradient damals fünf- bis sechsmal so groß war wie heute. Dies bedeutet, daß jene endogenen Prozesse, die gegenwärtig in großen Tiefen ablaufen, zu Zeiten des Protogäikums und des Deuterogäikums an der Erdoberfläche stattfinden konnten.

In der zweiten Hälfte des Protogäikums tauchen die ältesten Algen und Bakterien auf. Dies war eine Entwicklung mit sehr bedeutsamen geologischen Folgen. Durch die Algen begann die intensive Fotosynthese mit der Produktion von Sauerstoff, dessen Anteil nun in der alten Atmosphäre und im Ozean beträchtlich zunahm. Durch die Oxydation des  $\text{CO}$  zu  $\text{CO}_2$  steigt der Kohlendioxidgehalt

der Atmosphäre sprunghaft. In dieser Atmosphäre konnte der Partialdruck des  $\text{CO}_2$  einige Dutzend Atmosphären erreichen. Erst mit der Entwicklung kalkbildender Organismen und der dann im großen Umfang eintretenden Fällung von Karbonaten kommt es zu einer Verschiebung in der Zusammensetzung der im Seewasser gelösten Salze in Richtung auf eine Zunahme des relativen Gehalts an Chloriden (vor allem  $\text{NaCl}$  und  $\text{MgCl}_2$ ). Zu Beginn des Riphäikums, als die oberflächennahe Schicht des Meeres von Phytoplankton besiedelt wird, nimmt die Fotosynthese weiter an Umfang zu, und gleichzeitig wird das gasförmige Kohlendioxid der Atmosphäre fossilisiert, d. h. in den Karbonatskeletten der Organismen gebunden. In der Atmosphäre treten eine Akkumulation von Sauerstoff und die relative Zunahme des an geochemischen Prozessen unbeteiligten Stickstoffs ein. Im späten Paläozoikum wird vermutlich die Zusammensetzung der heutigen Atmosphäre erreicht.

## Heilquellen – Geschenk der Natur

Die Vulkane ließen auch natürliche Heilstätten für die Menschheit entstehen. Mediziner erforschen die balneologischen Eigenschaften vulkanischer Hydrothermen; in bestimmten Fällen können solche Hydrothermen die Grundlage für die Einrichtung von Kurorten bilden.

Die heilkräftigen hydromineralischen Reichtümer nicht nur neuerer, sondern auch alter vulkanischer Gebiete sind sehr groß. Schwefelwasserstoff-Kohlendioxid-Thermen kennt man in der Nähe vieler Vulkane.

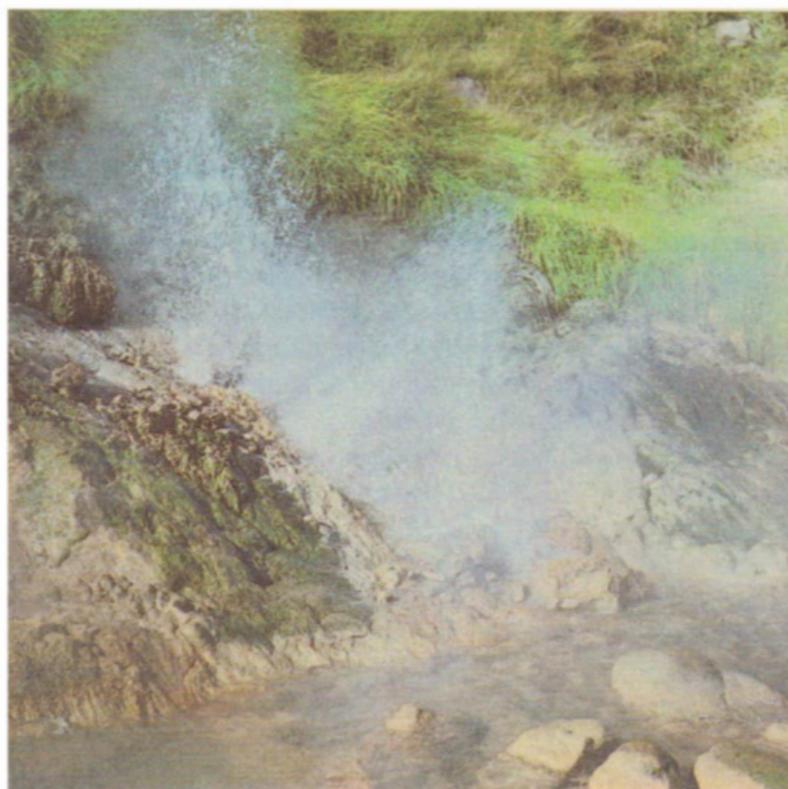
Großer Popularität erfreuen sich vulkanische mineralisierte Stickstoff-Kohlendioxid-Quellen. Auf Kamtschatka haben solche Quellen und Geysire den größten therapeutischen Effekt; sie enthalten Natriumchlorid und -sulfat,  $\text{SiO}_2$  und Bor. Allerdings ist auch die Kühlung dieser Wässer ein Problem. Man benutzt dazu gewöhnlich Wasser aus kleinen Flüssen in der Nachbarschaft, was allerdings den therapeutischen Wert des Quellwassers herabsetzt.

Größte balneologische Bedeutung haben nach Meinung

der Fachleute Kohlendioxid-Thermalwässer, die in Felsentälern und Senken in solchen Schichten wasserführender Gesteine entstehen, die mit den nicht erkalteten Wurzeln der Vulkane in Berührung kommen. Kohlendioxidhaltige Quellen entspringen sowohl am Fuß tätiger Vulkane als auch in alten vulkanischen Gebirgszügen. Die Mineralzusammensetzung solcher Wässer ist das Ergebnis einer in der Tiefe stattfindenden Auslaugung verschiedener Gesteinstypen unter Beteiligung von Kohlendioxid und ist deshalb sehr vielfältig. Diese Wässer enthalten Bor, Arsen, Silikate und diverse Spurenelemente.

Die besonders wertvollen kohlendioxidhaltigen Quellen müssen in erster Linie erschlossen werden, besonders dann, wenn sie in gut zugänglichen und landschaftlich reizvollen Gegenden vulkanischer Gebiete liegen.

#### *Mineralisierte Thermalquellen auf Kamtschatka*



---

# Alles Gold dieser Welt

---

## Die Hand des Zufalls?

Im Grunde genommen sind alle mineralischen Erzreichtümer der Erde direkt oder indirekt mit dem Vulkanismus oder mit der endogenen Wärme- und Stoffübertragung verknüpft, deren eine Form der Vulkanismus ist; wir werden dies an Beispielen zeigen.

Freilich machen wir uns immer ein Vergnügen daraus, die Reichtümer der Bergwerke zusammenzurechnen, obwohl, wie bereits 1802 G. Pleifer zu Recht bemerkte, die Natur überhaupt nicht weiß, was Reichtum ist.

Berücksichtigt man die Entwicklungsrichtung auf unserem Planeten mit ihrer Tendenz, die Erzkomponenten während sämtlicher Entwicklungsetappen der Erde an die Oberfläche zu bringen und im Weltmeer zu zerstreuen, so erscheint allein die Bildung sehr großer Anhäufungen von Erzen eher als eine Abweichung von der allgemeinen Gesetzmäßigkeit als die Regel.

Aber selbst Abweichungen der planetaren Prozesse bilden für die Menschheit Quellen unerschöpflicher Reichtümer. Dabei verändert sich auch der Begriff »Reichtum«. In den Interessenkreis des Menschen werden neue chemische Elemente einbezogen: Rohstoffe, die gestern noch keine Verwendung fanden und auf der Halde landeten.

Auch die Erzkonditionen ändern sich. Viele Lagerstätten, die früher wegen ihres geringen Metallgehaltes als ökonomisch uninteressant galten, bilden heute die Grundlage nationaler Naturreichtümer.

Die Zeit ist nicht fern, in der auch die Nutzung des

Meerwassers als Erz rentabel geworden sein wird. Wahrscheinlich wird dereinst das Gold nicht mehr Maßstab der vergegenständlichten Arbeit und Maß des Reichtums sein. Dann wird W. I. Lenins Vorhersage eintreffen, daß aus dem schönen, nützlichen und dann auch billigen Gold die Menschheit Gegenstände für den Haushalt herstellen wird.

Noch sehr lange aber werden sich viele Generationen von Menschen jener unikalenen Metallagerstätten bedienen, die die Natur zufällig schuf. Unser Leser möge sich nicht an diesem Wort stoßen. Auf keinem anderen Gebiet der Naturwissenschaft läßt sich die materialistische Kategorie, wonach der Zufall nur eine Erscheinungsform der Gesetzmäßigkeit ist, so eindrucksvoll demonstrieren wie in der Wissenschaft von den Gesetzmäßigkeiten der Erzlagerstättenbildung und ihrer Verteilung in Zeit und Raum, der *Metallogenie*. Die auf Erzvorkommen spezialisierten Geologen erweitern ihre Kenntnisse über die Bedingungen, unter denen solche Zufälligkeiten eintreten, und machen auf dieser Grundlage Voraussagen darüber, wo sich Erzlagerstätten befinden.

## Erzbildungen, von Vulkanen beeinflusst

Ehe wir über Erzlagerstätten berichten, deren Entstehung mit Erscheinungsformen des Vulkanismus verknüpft ist, wollen wir kurz bei den Kriterien verweilen, durch die diese Beziehung bestimmt wird, sowie bei den Formen solcher Beziehungen.

Unter den Erzlagerstätten läßt sich eine Gruppe erkennen, bei der die Beziehung zum Vulkanismus eindeutig feststeht. Es handelt sich um die sogenannten *synvulkanischen* Lagerstätten. Ihre Bildung erfolgt gleichzeitig (synchron) mit dem vulkanischen Prozeß.

Hierzu gehören die im eigentlichen Sinn vulkanischen oberirdischen sowie die vulkanogen-sedimentären Lagerstätten. Diese entstehen submarin durch Ausfällung von Produkten bei Reaktionen zwischen Stoffen, die von den Vulkanen abgegeben werden, und dem Seewasser; die Niederschläge setzen sich am Meeresboden ab.



*Tuff-(Aschen-)Förderung während vulkanischer Eruptionen*

Es ist schwer zu sagen, an welchen Erzlagerstätten speziell sich die Verbindung mit dem Vulkanismus besonders deutlich dokumentiert. Kein Zweifel besteht allerdings dahingehend, daß kiesige Kupfer- und Polymetallerze des sogenannten Kuromono-Typs zu den besonders charakteristischen vulkanischen Erzen gehören. Dies gilt vor allem für ihre schichtförmigen Spielarten, deren vulkanogen-sedimentärer Ursprung heute anerkannt ist.

Nach Auffassung japanischer Geologen lassen sich in der Entwicklung jedes Zentrums vulkanischer Tätigkeit mehrere Stadien erkennen. Das erste Stadium wird durch starke submarine magmatische Explosionen glutflüssigen Magmas charakterisiert. Hierbei kommt es zur Anhäufung von vulkanischen Gesteinsschichten. Während des zweiten Stadiums dringen Lavakuppeln in diese Schichten ein. An den Flanken dieser Kuppeln kommt es zu Dampf-

explosionen. Im letzten Stadium der vulkanischen Aktivität treten heiße Quellen in Erscheinung, die dann auch unmittelbar nach den Dampfexplosionen zur Bildung der Lagerstätten führen. Nach dem Erzbildungsprozeß klingt die vulkanische Tätigkeit ab.

Gleiche Erscheinungen lassen sich auch bei den Vulkanen von heute beobachten, die sich auf dem Festland befinden. Dampfausbrüche und Solfataren-Aktivität stellen das Stadium dar, in dem die vulkanische Tätigkeit erlischt.

Kieslagerstätten gehören vor allem zum synvulkanischen Typ. Die geologischen Bedingungen, unter denen man Kieslagerstätten vorfindet, sind in der ganzen Welt erstaunlich konstant. Sie gehören fast ausschließlich zu submarinen, d. h. vulkanogen-sedimentären Gesteinskomplexen. Die Austragung der erzbildenden Komponenten durch die vulkanischen Exhalationen (Gasaushauchungen) führt dazu, daß sich am Boden des betreffenden Meeres ganz besonders charakteristische vulkanogene Lagerstätten ausbilden. Die Produkte der submarinen vulkanischen Sublimate fallen aus, sobald sie in das schroff andersartige physikalisch-chemische Milieu des Meeresbereiches geraten. Die Besonderheit solcher Lagerstätten besteht darin, daß sie nicht selten von Kieselschiefern mit Radiolarien – Organismen, die ihr Skelett aus  $\text{SiO}_2$  aufbauen – überlagert werden.

Die zweite Lagerstättengruppe umfaßt die *postvulkanischen* und ist mit der Wirkung der *zweiten Komponente* verknüpft. Innerhalb der zweiten Gruppe unterscheiden die Geologen *epithermale*, *mesothermale* und *hypothermale* Lagerstätten, um die Tiefe zu berücksichtigen, in der die Ausfällung der erzführenden Fluide erfolgt.

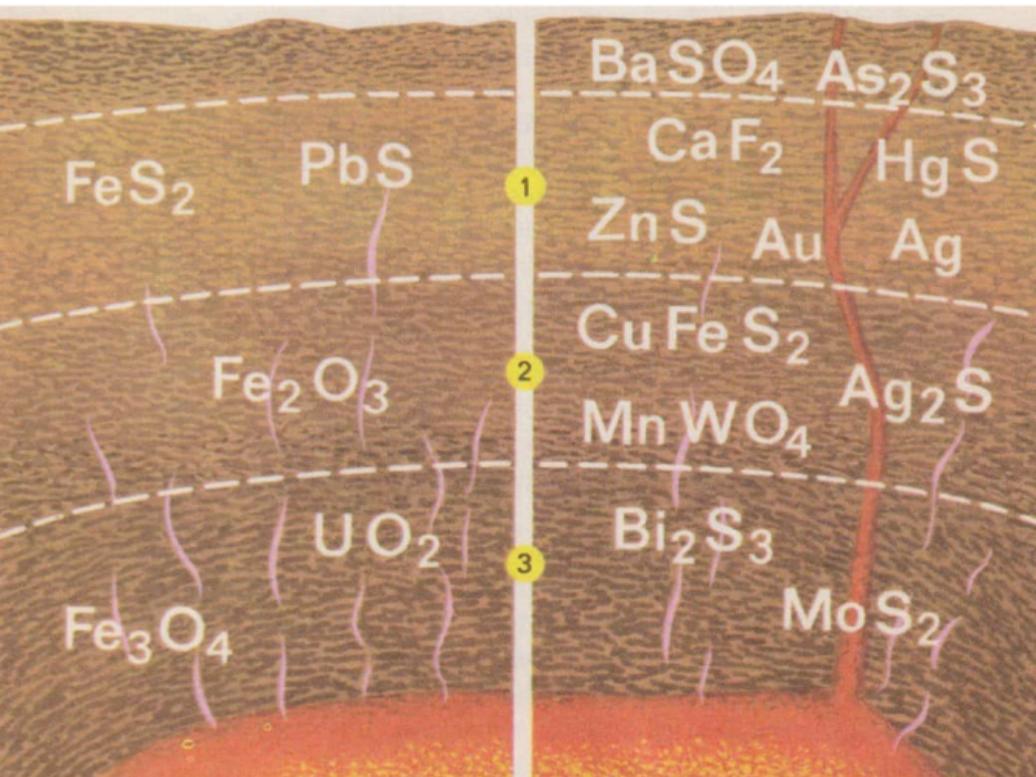
*Epithermale Lagerstätten* (grch. *epi* = über; *therme* = Wärme) entstehen in der Regel in geringer Tiefe (bis etwa 1 km unterhalb der Oberfläche) in einem Temperaturintervall von 100 bis 200 °C. Charakteristisches Merkmal dieser Lagerstätten sind ausgedehnte vulkanische Strukturen, die im Grunde genommen mit den erzführenden Strukturen übereinstimmen. Epithermale Lagerstätten überwiegen in den jungen, spätmesozoischen und känozoischen vulkanischen Gürteln. Räumlich sind sie oftmals mit aktiven

heißen Quellen verbunden, die die Entwicklung des Vulkanismus abschließen.

Die typischen metallfreien Minerale werden durch den Quarz repräsentiert, häufig in Form von Amethyst und Chalzedon, durch den Tieftemperatur-Kaliumfeldspat Adular, durch Kalzit, Rhodochrosit, Baryt und Fluorit. Die Liste der auftretenden Erzminerale ist außerordentlich groß. Wir finden Sulfoantimonide und Sulfoarsenide des Silbers (Polybasit, Stephanit, Pearceit, Pyrargyrit, Proustit u. a.), Antimonit, Argentit, Zinnober, gediegenes Quecksilber, Telluride von Gold und Silber (Petzit, Sylvanit, Calavarit, Hessit). Sehr verbreitet sind Gold- und Silber-selenide. Charakteristisch sind auch die gewöhnlichen Sulfide von Blei, Zink und Kupfer.

Epithermale Lagerstätten leisten einen merklichen

*Epithermale (1), mesothermale (2) und hypothermale (3) Lagerstätten mit charakteristischen Erzmineralen. Sie haben sich in Gängen oder fein verteilt im Gestein abgesetzt.*



Beitrag zur Weltproduktion von Gold und Silber. Zu ihnen gehören auch Vorkommen von Quecksilber, Antimon, Fluorit, Kupfer (Kupfer-Zeolith-Erze), gelegentlich auch komplexe polymetallische Erze (Cu, Pb, Zn, Au, Ag) und sogar Vorkommen seltener Metalle (W, Be, Sn).

*Mesothermale Lagerstätten* (grch. mesos = mitten) entstanden in mäßigen Tiefen bei etwa 200 bis 300°C. Mesothermale Verhältnisse charakterisieren oftmals die tiefliegenden Horizonte epithermaler Lagerstätten.

Die Beziehung zum Vulkanismus ist bei mesothermalen Lagerstätten recht deutlich ausgeprägt, wenn auch vulkanische Produkte im eigentlichen Sinn in den durch Erosion freigelegten Erzfeldern dieser Lagerstätten meist fehlen und nur an der Peripherie beobachtet werden.

Unter den typischen Bodenschätzen mesothermalen Lagerstätten lassen sich ebenfalls Kupfer, Blei, Zink, Silber und Gold nennen.

Die Erzminerale jedoch, aus denen diese Erze aufgebaut sind, müssen höheren Temperaturen zugerechnet werden und sind in ihrer Zusammensetzung weniger kompliziert. Meist handelt es sich um einfache Sulfide, wie Galenit (PbS), Chalkopyrit (CuFeS<sub>2</sub>) und Sphalerit (ZnS). Anwesend sind auch Energit, Bornit, Tetraedrit und Tennantit (Fahlerze); unter den Mineralen, die keine Erze sind, finden wir vor allem Quarz und Karbonate.

Und schließlich die *hypothermalen Lagerstätten* (grch. hypo = unter). Sie entstehen bei hohen Temperaturen und in großen Tiefen. Allgemein beträgt das Temperaturintervall, in dem sie entstanden sind, 300 bis 500°C. Gelegentlich beobachtet man mit zunehmender Tiefe Übergänge von mesothermalen Erzen zu hypothermalen, obwohl ebenso wie im ersten Fall die tieferliegenden Erze auch die älteren sind und daher einem früheren tektonisch-magmatischen Zyklus angehören.

Hypothermale Lagerstätten sprechen für einen sehr tiefen Erosionsanschnitt. Vulkanische Strukturen im eigentlichen Sinn lassen sich hier in der Regel nicht beobachten. Aufnahmen aus dem Weltraum lassen jedoch ebenso wie regionale geologische Analysen in kleinem Maßstab zentrale Strukturen erkennen, die vulkanisch-tektonischen Strukturen homolog sind.

Bei den hypothermalen Lagerstätten handelt es sich um Erze von Gold, Wolfram, Nickel, Blei, Zink und anderen Metallen. Die Erzkörper sind meist tiefenunabhängig persistent (lat. *persistere* = ausharren), also »dauerhaft«, zeigen eine große Ausdehnung, und ihr Gehalt an den gewünschten Metallen ist stabil.

Ganz für sich allein steht eine Art von vulkanogenen Lagerstätten, die durch Ablagerung von Erzkomponenten aus thermalen Oberflächenwässern entstanden sind.

Der sowjetische Wissenschaftler K. K. Selenkow hat dieses Problem eingehend untersucht. Er stellte fest, daß leichtlösliche Alkalimetallhalogenide und -sulfate auch im Wasser der Abflußgebiete gelöst bleiben und deren Salzgehalt auffüllen. Selbst der überwiegende Anteil von  $\text{SiO}_2$  bleibt gelöst; generell können natürliche Wässer, darunter auch das Meerwasser, ungewöhnlich viel  $\text{SiO}_2$  aufnehmen. Ein ganz anderes Schicksal wird dagegen dem Eisen und dem Aluminium zuteil, wenn sie mit Thermalwässern auf Reisen gehen. Dort, wo die thermalen Ströme ein geringes Volumen aufweisen, erfolgt bei der Oxydation von Eisen aus der zwei- in die dreiwertige Stufe seine rasche Ausfällung in Gestalt von rotbraunem Limonit an den Hängen der Schluchten und in den Tälern von Bächen und kleinen Flüssen. Größere Ströme transportieren die suspendierten Eisenhydroxide ins Meer. Dabei ist eine intensive Rotbraunfärbung der deltanahen Teile des Meeres zu beobachten. Die Menge des auf diesem Wege ausgetragenen Eisens kann erstaunlich groß sein. K. K. Selenkow hat ausgerechnet, daß allein das Fließchen Jurewa auf der Kurileninsel Paramuschir, das am Vulkan Ebeko entspringt, in nur 24 Stunden 35 t Eisen und 65 t Aluminium ins Meer trägt.

Japanische Wissenschaftler haben festgestellt, daß Oberflächenwässer neben dem Eisen und dem Aluminium auch Eisensulfide ins Meer befördern. Sie verweisen auch auf die ständige Ablagerung von bleihaltigem und gelegentlich radioaktivem Baryt und  $\text{SiO}_2$  im Bett eines Flusses, der an den Thermalquellen des Tamagawa im Gebiet vulkanischer Berge entspringt. Nunmehr wollen wir einige besonders interessante Beispiele für die bisher aufgezählten Lagerstättentypen behandeln.

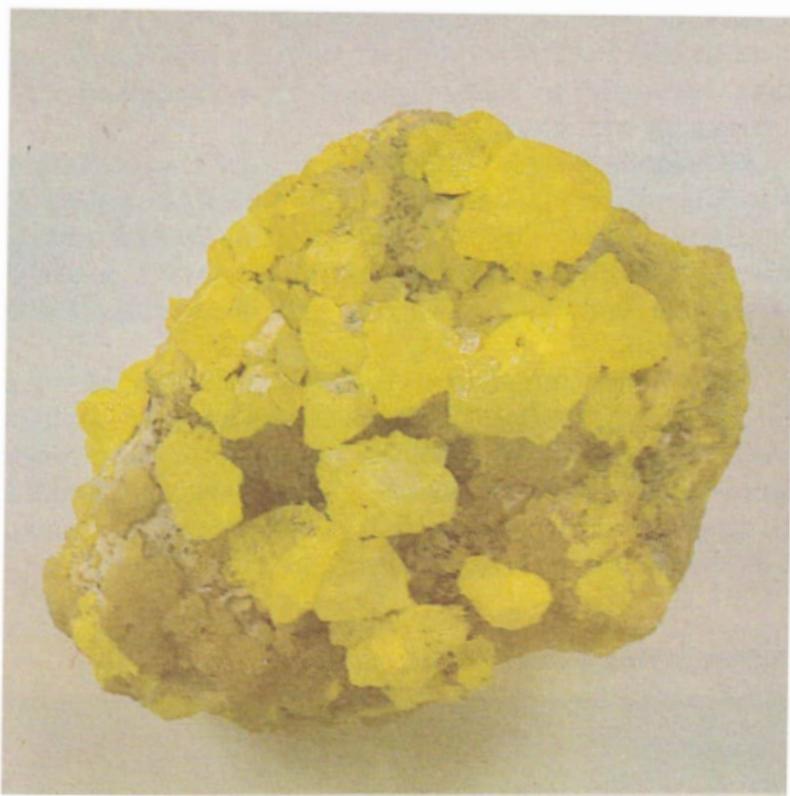
## Lagerstätten vulkanischen Ursprungs

Zu den im eigentlichen Sinne vulkanischen Lagerstätten auf dem Festland gehören vor allem Vorkommen von elementarem Schwefel. Exhalationsvorkommen von Schwefel sind praktisch für sämtliche tätigen Vulkane charakteristisch und werden in Gestalt leuchtendgelber, orangefarbener oder grünlicher Anhäufungen beobachtet. Die Vorräte an Schwefel betragen selten mehr als einige tausend Tonnen und nur manchmal einige zehntausend Tonnen. Für Schwefel sind dies sehr kleine Werte. Solche Schwefelanhäufungen wurden früher im Familienbetrieb von Bewohnern vulkanischer Inseln abgebaut.

Wo freilich schwefelhaltige Gase und Lösungen in lockere vulkanische Gesteine mit großer Mächtigkeit eindringen konnten, bilden sie Lagerstätten, deren Vorräte einige Dutzend Millionen Tonnen betragen. Wir haben es hier mit sogenannten Verdrängungslagerstätten zu tun. Man findet sie in der UdSSR auf Kamtschatka und den Kurilen, außerdem auch in Japan, Chile und Indonesien. Sehr interessante Erscheinungen lassen sich beobachten, wenn ein Vulkan zu neuem Leben erwacht, bei dem einzelne Horizonte bereits früher mit Schwefel angereichert wurden. Die erneute Erhitzung dieser Lagerstätten führt dazu, daß der elementare Schwefel herausgeschmolzen wird; Ströme flüssigen Schwefels überschwemmen dann Flußtäler und Schluchten. So war es beispielsweise auf der Insel Hokkaido in Japan, als aus dem Vulkan Yo-Zan 200 000 t Schwefel austraten.

Aber Vulkane können nicht nur Schwefel hervorbringen. Im Norden Chiles befindet sich der Vulkan Lascar, der ein Erzmagma an die Oberfläche förderte, das im wesentlichen aus Magnetit und Hämatit mit einer geringen Menge Apatit bestand. Die Masse des durch Eruption an die Oberfläche geförderten Erzes wird auf 70 000 t geschätzt. Die Natur dieser Erscheinung ist allerdings noch nicht enträtselt worden. In Afrika kennt man Vulkane, die Karbonatlava produzieren.

Es gibt weiterhin eine komplizierte Gruppe von Lagerstätten, die sich schlechthin in exhalativ-sedimentäre und sedimentäre Lagerstätten unterscheiden, deren erz-



*Kristallisierter Schwefel vulkanischen Ursprungs*

bildende Elemente vulkanischen Ursprungs sind. Oft fällt es den Geologen schwer, die Natur der einen oder anderen schichtförmigen Lagerstätte eindeutig festzustellen. Es ist keine Übertreibung, wenn man sagt, daß es bezüglich ihrer Genese fast immer zwei Standpunkte gibt. Die einen vertreten eine syngenetische (grch. syn = zusammen; genesis = Entstehung) Bildung gemeinsam mit den Sedimenten, die anderen dagegen eine epigenetische (grch. epi = danach) im Zusammenhang mit Prozessen, die später, d. h. nach Ausbildung der Sedimentgesteine, abliefen.

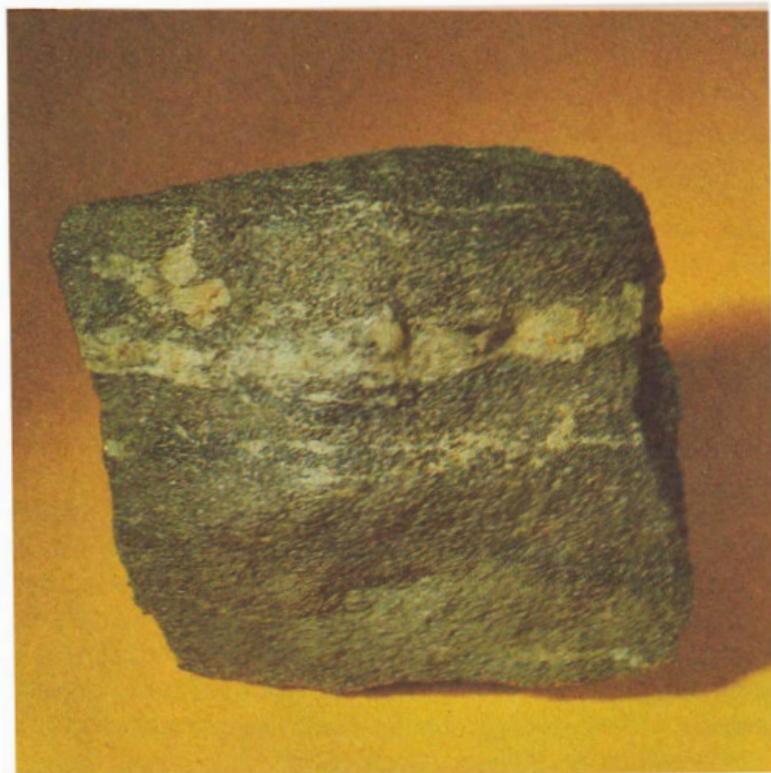
Dessenungeachtet können wir Beispiele für Lagerstätten von Eisen, Mangan, Kupfer sowie einigen komplexen Erzen nennen, die zweifelsfrei mit der Tätigkeit von Vulkanen und mit dem endogenen (grch. endon = innen; genesis = Entstehung), aus der Tiefe kommenden Fluid im Zusammenhang stehen. Ohne auch nur einen kurzen

Überblick über das Problem insgesamt geben zu wollen, beabsichtigen wir hier, von einigen typischen und besonders interessanten Fällen vulkanogen-sedimentärer Erz-bildung zu berichten.

*Eisenlagerstätten*, Lagerstätten der sogenannten Eisenformation: Das Eisen liegt in diesen Gesteinen als Magnetit, Limonit, Hämatit und zum Teil als Pyrit bzw. in Form kompliziert aufgebauter Hydrosilikate vor, in denen das Eisen sowohl in zwei- als auch dreiwertiger Form enthalten ist.

In der Eisenformation treten in der Regel keine organischen Rückstände auf. Sie entstanden ausschließlich im Präkambrium. Die Forscher fanden, daß eine so kolossale Anhäufung von Eisenmineralen unter ganz spezifischen Bedingungen stattfand, die sich später nicht wiederholten. Um welche Bedingungen handelte es sich dabei?

#### *Erz der präkambrischen Eisenformation*





präkambrische Massive
  Eisenvorkommen

*Die bedeutendsten Eisenerzlagerstätten der Erde und ihre Beziehung zu den präkambrisch gebildeten Massiven*

Wir haben in den vorangegangenen Kapiteln über die Besonderheiten der Hydrosphäre und Atmosphäre des Deuterogäikums berichtet und über die ungeheure, den gesamten Planeten betreffende Bedeutung des Auftauchens der ersten Algen und des Beginns der Fotosynthese für die geologischen Prozesse. Typische Sedimente des chemisch aggressiven Protoozeans im Deuterogäikum sind nun gerade diese silizium- und eisenhaltigen Sedimente (Jaspilite) und chemogene Niederschläge mit einem hohen Gehalt an Tonerde. Die Oxydation des Eisens durch Sauerstoff aus der gerade einsetzenden Fotosynthese führte zur Minderung der Eisenlöslichkeit im Wasser und zur Ausfällung von Eisenverbindungen in denjenigen Bezirken (Senken), wo erhöhte Eisenkonzentrationen bestanden. Eine derart massenhafte Ausfällung von Eisenmineralen wiederholte sich später nie. Bereits im Riphäikum verschwinden die für das Deuterogäikum charakteristischen chemogenen Fe- und Al-Sedimente.

Die Eisenformation ist ein direktes Ergebnis vulkani-

scher Tätigkeit, das Resultat der Austragung von Eisen und  $\text{SiO}_2$  durch vulkanische Emanationen. Sehr häufig ist die räumliche Nähe von Becken mit den Sedimenten einerseits und vulkanischen Gebieten andererseits festzustellen, wobei diese Gebiete zur selben Zeit aktiv waren, als die eisen- und siliziumhaltige Jaspilitformation entstand.

Eisenquarzit- bzw. Jaspilitlagerstätten sind außergewöhnlich groß. Die Metallvorräte zählen nach Milliarden Tonnen. Allein die Lagerstätten im Gebiet des Oberen Sees (USA/Kanada) lieferten bis zu den sechziger Jahren unseres Jahrhunderts etwa 3,5 Milliarden Tonnen Eisenerz. Zu diesen Lagerstätten gehören auch die Vorkommen in der UdSSR und in Indien (etwa 4 Milliarden Tonnen 60%igen Erzes) in der Hämatit-Quarzit-Schicht innerhalb der Sediment- und Effusivfolgen des Archaikums.

*Manganlagerstätten:* Ähnlichen vulkanogen-sedimentären Ursprung besitzen offenbar auch die ältesten Manganvorkommen, die heute als Sedimentvorkommen angesehen werden. Man nimmt an, daß sie durch Oxydation primärer chemogener Sedimente und durch deren Anreicherung mit Manganmineralen entstanden, als  $\text{SiO}_2$  und Tonerde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aus diesen Sedimenten ausgetragen wurden. Diesen Charakter zeigen die Lagerstätten in Indien (Madras), an der Goldküste (die größte Mangangrube der Welt Nzuta liefert jährlich 500 000 bis 600 000 t Erz mit 50 bis 53 % Mangan Gehalt) und in Brasilien (Miñas, Bahia u. a.; hier betragen die Erzvorräte in manchen Bergwerken bis 6 Millionen Tonnen bei einem Mangan Gehalt von 48 bis 51 %).

Anders als bei den Eisenlagerstätten der Eisen-Silizium-Formationen werden schichtförmige Mangan- und Eisen-Mangan-Lagerstätten auch im Zusammenhang mit dem paläozoischen, dem mesozoischen und dem känozoischen Vulkanismus beobachtet. Überdies entstehen Manganerze in außerordentlich großem Maßstab am Boden des Ozeans und stehen hier im Zusammenhang mit dem submarinen Vulkanismus der Gegenwart.

*Kupferlagerstätten:* Stratiforme (schichtförmige) Kupfererzlagerstätten sind weit verbreitet. Ihre Bildung steht im Zusammenhang mit der Tätigkeit submariner Vulkane ganz unterschiedlichen Alters. Oft werden diese Erze am



*Abbau präkambrischer Eisenerze in Kiruna (Schweden)*

Boden der Meere sedimentiert, wobei es zu einer Kombination von Fällungsvorgängen sowohl wegen einfacher Übersättigung als auch infolge chemischer Reaktionen unter Beteiligung endogener erzführender Fluide kommt. Die sogenannten exhalativ-sedimentären Kupferkonzentrationen treten gemeinsam mit Eisensulfid (Pyrit) praktisch in sämtlichen Kupferkies- und Polymetallkieslagerstätten der Welt während der frühen Stadien des Erzbildungsprozesses auf. Später werden diese exhalativ-sedimentären Erze von epigenetischen hydrothermalen Prozessen überlagert, die zur Ausbildung von Blei-Zink-Erzen (vergesellschaftet mit Gold, Silber und anderen Metallen) führen.

Einige Wissenschaftler halten auch die Blei-Zink-Erze für synvulkanisch und bringen sie mit der Tätigkeit submariner heißer Quellen in Verbindung, wobei sie die Erze

als submarine Travertine definieren (Travertin: von lat. lapis Tiburtinus, Stein aus Tibur, aus Lösungen und Quellwässern abgesetzter poröser Kalk, der auch zahlreiche überkrustete Pflanzenreste enthält).

Vulkanogene exhalativ-sedimentäre Kupferlagerstätten sind praktisch in allen Ländern der Welt bekannt, und zwar in vulkanischen Gürteln der unterschiedlichsten Altersstufen, von den Kaledoniden bis zur Gegenwart. Und in allen Ländern – vielleicht mit Ausnahme der USA – gehören sie zu den wichtigsten Kupfervorkommen überhaupt. Hierher gehören die Lagerstätten des Ural und des Kaukasus in der UdSSR (paläozoische und mesozoische Lagerstätten), Spaniens und Japans.

## Erze auf dem Meeresboden

Am Ende unseres kurzen Berichts über vulkanogen-sedimentäre Erzbildung wollen wir bei einigen interessanten Beispielen für submarine Erzbildung in der Gegenwart verweilen. Aktuelle Prozesse führen »vor unseren Augen« zur Bildung von Lagerstätten, die nach Metallvorräten und Gesamtwert dieser Metalle in der geologischen Geschichte nichts ihresgleichen haben. Sie sind durchaus gesetzmäßig und spiegeln die gerichtete Evolution der Erzbildung in der Entwicklungsgeschichte der Erde wider, die Aufstiegtendenz der Erze zur Erdoberfläche und zum Austritt an die Erdoberfläche. Spezifische submarine Bedingungen haben eine Konzentration von Metallen möglich werden lassen, die, wie wir uns erinnern, unter oberirdischen Verhältnissen bei der Ausfällung der erzführenden Fluide nicht gegeben ist.

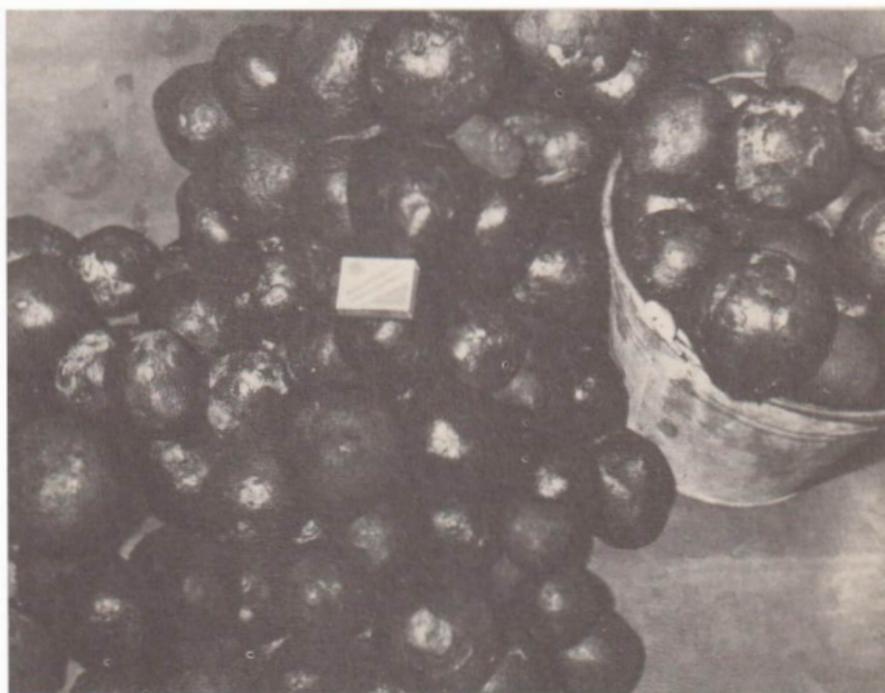
Der Ozean ist eine grandiose Schatzkammer mineralischer Reichtümer. Von den fünf Bereichen, die man im Ozean nach den dort herrschenden physikalisch-chemischen Verhältnissen betrachtet (Küstenzone, Kontinentalschelf, Meerwasser, Bodensediment und Muttergestein, das unter dem Sediment lagert), interessieren uns vor allem die Bodensedimente. Hier wurden nämlich in den letzten Jahren kolossale Vorräte mineralischer Rohstoffe von großer wirtschaftlicher Bedeutung gefunden. Im Vergleich

zu den kontinentalen hydrothermalen Lagerstätten haben die Bodensedimente des Ozeans den Vorzug einer ganz gleichmäßigen Verteilung der Nutzkomponente. Ohne die terrigenen (lat. terra = Erde; grch. genesis = Entstehung) Sedimente zu betrachten, die in Küstennähe verbreitet sind, sowie die Schlämme und Tone pelagischer (küstenferner) Sedimente, wenden wir uns den Mangankonkretionen zu, deren Beziehung zum submarinen Vulkanismus unzweideutig ist (Konkretion: lat. concretio = Zusammenballung).

Erstmals wurden Konkretionen aus Mangandioxid von der Challenger-Expedition der Jahre 1873 bis 1876 im Ostteil des Pazifiks (im Gebiet der ostpazifischen ozeanischen Rücken) gefunden. Später entdeckte man sie auch am Boden des Indischen Ozeans.

Oxide von Mangan und Eisen bilden am Ozeanboden Körner, Konkretionen, Tafeln und Krusten, die das anstehende Muttergestein bedecken. Felsen am Ozeanboden

#### *Mangankonkretionen vom ozeanischen Meeresboden*



sind mit einer Mangan- und Eisenoxidkruste bedeckt, deren Dicke 10 bis 15 cm erreicht.

Die Form der Konkretionen und ihre Größe sind unterschiedlich; wir finden Globula (kleine, sehr dichte Zusammenballungen), deren Durchmesser nur Millimeterbruchteile (0,5 mm) beträgt, aber auch ovale Gebilde mit einer Masse von 1 t. Wenn die Entstehungsbedingungen für die Konkretionen günstig sind, kann ihr Durchmesser einige Meter erreichen.

Verteilung und Konzentration der Mangankonkretionen werden durch ihre submarine Ausbildung bestimmt. Man fand, daß höhere Konzentrationen und Vorräte an Mangankonkretionen (100 Milliarden Tonnen) im südwestlichen Teil des pazifischen Beckens vorliegen. Im Pazifik insgesamt gibt es 1 700 Milliarden Tonnen. Berücksichtigt man, daß das Material der Konkretionen auch höhere Konzentrationen an Vanadium (bis 0,11%), Kobalt (bis 2,3%), Nickel (bis 2,0%), Kupfer (bis 1,6%), Molybdän (bis 0,15%), Silber (im Mittel 0,0003%), Blei (bis 0,35%) sowie viele andere Metalle wie Beryllium, Niobium, Zinn, Wolfram, Quecksilber, Uran u. a. enthält, so kann man sich vorstellen, welche Vorräte an diesen Metallen der Ozeanboden birgt. Allein die Silbermenge im südwestlichen Teil des Pazifiks beträgt 30 bis  $45 \cdot 10^6$  t.

Bereits heute erkennen wir auf dem Ozeanboden metallogene Provinzen mit einem hohen Gehalt an Eisen, Mangan, Nickel, Kupfer, Kobalt usw.

Analoge Konkretionen fand man auch verschiedenenorts am Boden des Indischen und des Atlantischen Ozeans.

Die Untersuchung der Mangankonkretionen zeigt deren enge Beziehung zu den Produkten submariner vulkanischer Eruptionen. Man kam zu dem Schluß, daß diese kolossalen Erzvorräte im Gefolge des submarinen Vulkanismus bei intensiver Wechselwirkung zwischen heißen Laven und Seewasser sowie zwischen Seewasser und vulkanischen Emanationen (darunter auch mit dem endogenen Fluid) entstanden. Die überwiegende Masse der Produkte aus diesen Reaktionen, d. h. die Erze, fiel am Ozeanboden nahe den submarinen Eruptionszentren aus und bildete die Konkretionen.

Die erzführenden Sedimente allein in einer von drei Senken des Roten Meeres, in der Senke Atlantis II, werden bereits heute nach G. Bischoff und F. Mannheim auf 2,5 Milliarden Dollar geschätzt. Die genannten Forscher haben den mittleren Metallgehalt in den drei Hauptsedimenttypen errechnet. Anschließend ermittelten sie unter Berücksichtigung der Verbreitungsfläche und der Mächtigkeit der Sedimente den Erzgehalt. Danach betragen die Gesamtvorräte an Erzmineralen in der Senke Atlantis II  $1\,183 \cdot 10^6$  t. Das Gesamtvolumen der Erzsedimente beträgt  $48 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>. Der Wert dieser Vorräte nach den einzelnen Metallen beträgt allein in den obersten 10 m der Sedimentschichten:

Zn	860 Millionen Dollar
Cu	1 270 Millionen Dollar
Pb	22 Millionen Dollar
Ag	280 Millionen Dollar
Au	50 Millionen Dollar

Der Gesamtwert aller Erze dieser Lagerstätte beträgt 2480 Millionen Dollar. Jeder Kubikmeter dieser Bodensedimente kostet 5,2 Dollar.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Mächtigkeit der erzführenden Sedimente, die mittels seismischer Verfahren (Reflexionsverfahren) nachgewiesen wurde, 20 m und in einzelnen Fällen auch 100 m erreicht.

Wie aber sind diese so außerordentlich reichen Lagerstätten entstanden, deren Erschließung durch den Menschen noch bevorsteht?

Ohne die geologische Situation im Gebiet des Roten Meeres im einzelnen zu erläutern, sei nur darauf hingewiesen, daß die Struktur des Roten Meeres ein *Rift* darstellt, d. h. einen Bezirk der Erdkruste, wo Expansionsvorgänge der Erde und des ocean-floor-spreading (Meeresbodenausbreitung) am intensivsten in Erscheinung treten. Diese Gebiete sind überall auf der Erde durch intensiven Vulkanismus sowie durch andere Formen der Wärme- und Stoffübertragung bei Austreten des endogenen Fluidstroms charakterisiert. Auch das Rift des Roten Meeres macht da keine Ausnahme. Der Vulkanismus begann hier mit der Eruption von Basalten und setzte sich später,

nämlich im frühen Tertiär, mit der Eruption saurer Effusiva (Ergußgesteine) fort.

Im Miozän (vor 25 Millionen Jahren) begann hier der sogenannte Adensche Vulkanismus, der bis zur Gegenwart andauert. Die jungen Adenschen Vulkanite sind unmittelbar mit dem Riftsystem Rotes Meer – Ostafrikanische Gräben verknüpft.

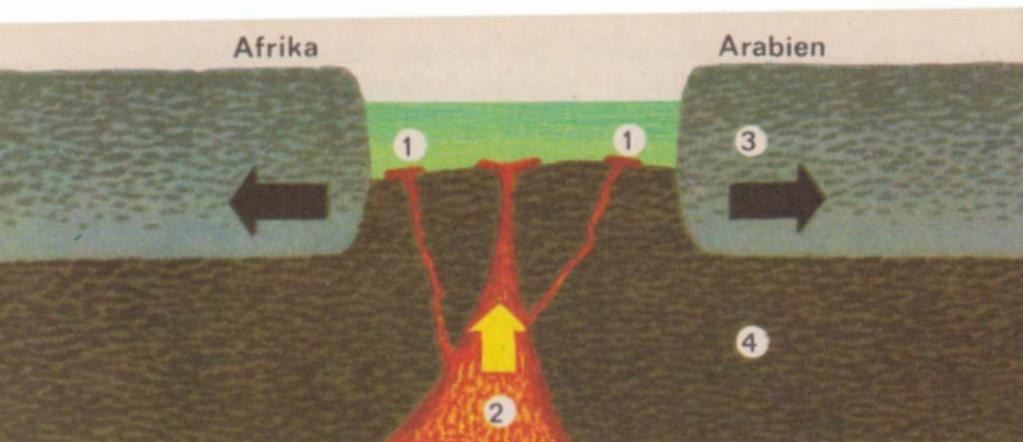
Die Lösungen, deren Bildung mit hydrothermalen vulkanischen Aktivitäten in Zusammenhang steht, steigen über Kanäle aufwärts, die am Boden der Senke Atlantis II austreten.

## Wichtige Erzlagerstätten

Im folgenden werden wir über die eindrucksvollsten und berühmtesten Lagerstätten von Gold, Silber, Quecksilber, Molybdän, Zinn, Kupfer und anderen Metallen berichten, die mit dem Vulkanismus im Zusammenhang stehen. Wir haben deshalb Vorkommen als Beispiele gewählt, in denen die Verbindung mit dem Vulkanismus besonders deutlich hervortritt. Es soll aber erwähnt werden, daß dieser Zusammenhang in älteren Lagerstätten oftmals nur schwierig zu erkennen ist, obwohl dieselben geologischen Ereignisse abgelaufen sind. Aus diesem Grund gehören die unten angeführten Beispiele zu den jungen (mesozoisch-känozoischen) Vorkommen. Es würde sich nichts Wesentliches ändern, wenn wir auch die große Zahl von Beispielen alter Lagerstätten der gleichen Metalle heranzögen, doch zeigen diese kein so deutliches Bild.

*Gold- und Silbervorkommen:* Epithermale Gold- und Silbervorkommen sind in jungen vulkanischen Gürteln außerordentlich verbreitet. Wir kennen sie in der Sowjetunion, in Nord-, Mittel- und Südamerika, in Europa, in Südostasien und in Neuseeland. Gewöhnlich sind diese Vorkommen sehr erzeich, weisen aber einen nur unbedeutenden Gesamtmetallvorrat auf, d. h., sie erschöpfen sich, von wenigen Ausnahmen abgesehen, rasch.

Und doch stammten die unermeßlichen Reichtümer der Azteken und Inkas gerade aus Erzen solcher Vorkommen. Bei einigen europäischen Lagerstätten begann der Abbau ebenfalls schon vor vielen Jahrhunderten (in Transsilva-



*Profil durch das Rote Meer. 1 – Austritt heißer erzhaltiger Lösungen, sog. hot brines; 2 – Magmaaufstieg in der Riftzone; 3 – kontinentale Kruste; 4 – ozeanische Kruste*

nien, der Slowakei und in Böhmen). Das Vorkommen von Sod in Armenien wird bereits seit dem 3. Jahrtausend v. u. Z. abgebaut.

Nun einige Beispiele.

Die Lagerstätte der transsilvanischen Erzregion befindet sich in einem Gebiet, in dem junger miozäner Vulkanismus im Bereich des aktiven Mittelmeergürtels auftritt.

Das in den Bergen von Apuseni zwischen den Flüssen Muresul und Ariesul gelegene Gebiet ist unter der Bezeichnung »Goldenes Viereck« bekannt. Man fand hier vulkanische Gesteine in großen Mengen sowie paläovulkanische Strukturen – Kalderen und oberflächennahe Intrusivgebilde (Dacite). Sie bilden eine Vielzahl von Kuppeln und Schloten, in denen sich zumeist die erzführenden Adern und Adersysteme befinden.

Bei den Vorkommen unterscheiden wir folgende Haupttypen:

1. Vorkommen von gediegenem Gold, Gold (mit einem Silbergehalt bis 30%) in Gestalt von Nadeln und dünnen Drähten, sogenanntes Fadengold, und Schuppen in Quarzadern.
2. Sulfidvorkommen mit gediegenem Gold. In diesen Erzen finden wir Galenit, Sphalerit und Sulfosalze von Silber.

3. Goldtelluridvorkommen. Sie werden durch folgende Minerale repräsentiert: Nigiagit, Sylvanit, Petzit, Krennerit und Hessit.

In den *Rocky Mountains, Colorado (USA)* kennt man viele sehr reiche Gold- und Silbervorkommen. Eines von ihnen ist das Vorkommen am Cripple Creek, wo 64 Gruben in Betrieb waren. Einzelne Gruben lieferten für 10 bis 30 Millionen Dollar Gold.

Diese Lagerstätte befindet sich in 3000 m Höhe in Eruptivgesteinen, die den Vulkan von Cripple Creek aufbauen. Eine Explosion im Krater des tertiären Vulkans ließ den Brekzienschlot Cresson entstehen.

Dieses Vorkommen ist nicht nur seines Reichtums wegen berühmt, sondern auch deshalb, weil das wichtigste Erzmineral Goldtellurid, nämlich Calaverit ( $\text{AuAgTe}_2$ ), ist. Calaveritdrusen entstanden in Hohlräumen und Rissen. Man fand geradezu phänomenal reiche Adern und Höhlen. Eine einzige calaveritgefüllte Höhle lieferte für 1,2 Millionen Dollar Gold. Der auch als Bonanza bezeichnete Cresson-Schlot wird auf 35 Millionen Dollar geschätzt. Die Arbeiter, die die Eisenbahnwagen zum Transport des Erzes aus diesen Bonanzas (am. *bonanza* = ergiebige Mine) auskehrten, lasen dabei Gold auf.

Bei dem *Erzbezirk von San Juan, Colorado*, handelt es sich um einen Bezirk mit tertiärem Vulkanismus, dessen Fläche etwa 10 000 km<sup>2</sup> beträgt. Der Erzabbau begann hier 1873 mit der Silbergewinnung. Später entdeckte man reiche Vorkommen an Gold, Kupfer, Blei und Zink. Von 1873 bis 1964 wurden hier 31 340 kg Gold, 5 000 t Silber, 100 000 t Kupfer, 630 000 t Blei und 320 000 t Zink gewonnen.

Im Gebiet von San Juan ist der tertiäre Vulkanismus sehr stark ausgeprägt. Die wichtigsten Zentren sind die Kalderen von Silverton und Lake City. Die vulkanischen Gesteine werden durch Andesite, Dacite, Rhyolithe und ihre Tuffe repräsentiert. Im abschließenden Stadium der Struktur von San Juan drangen saure Intrusiva (lat. *intrudere* = hineindrängen) in das vulkanische Gestein ein.

Die Erzkörper lassen sich bei einer Ausdehnung bis zu 3 000 m bis in eine erhebliche Tiefe (800 m) verfolgen und abbauen.

Die polymetallischen Erze bestehen aus Blei-, Kupfer- und Zinksulfid. Silberreiche Erze enthalten außerdem viel silberhaltigen Tennantit, Tetraedrit und Proustit.

Gediegenes Gold wird, mit Quarz vergesellschaftet, in den zuletzt gebildeten Adern beobachtet.

Da die bloße Aufzählung der amerikanischen epithermalen Vorkommen zuviel Platz beanspruchen würde, seien hier nur die bekanntesten genannt: Tonopah (Nevada), das bereits bis zu den vierziger Jahren unseres Jahrhunderts für 33 500 000 Dollar Gold sowie 47 113 t

### *Der Vulkan Cotopaxi in Ekuador*



Silber geliefert hat; Comstock (Nevada), wo allein in den ersten 50 Jahren (ab 1859) Gold und Silber für 388 400 000 Dollar gewonnen worden sind, und Goldfield (Nevada).

Die Gold- und Silberlagerstätten in Japan (Toi u. a.), Neuseeland (Hauraki), Sumatera (Red'jang-Lebong) und Chile (Guanako) zeigen viele Gemeinsamkeiten in bezug auf Struktur und Entwicklung der bereits genannten Vorkommen. Auch in der UdSSR sind analoge Lagerstätten bekannt und von wirtschaftlicher Bedeutung.

Aber selbst wenn man die beträchtliche Ähnlichkeit vieler Lagerstätten dieser Art berücksichtigt, kann man doch nicht umhin, auf die berühmten Silbervorkommen Mexikos mit den Argentitadern ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) einzugehen. Es handelt sich um die seit ältesten Zeiten abgebauten Erzbezirke von Patshuca (Real del Monte), Guanajuato, Fresnillo, Zacatecas, Chihuahua del Oro u. a. Seit 1570 wurden im Bergwerk von Zacatecas 5 350 t Silber gewonnen (man baute hier auch Blei, Zink und Kupfer ab). Die Länge der Bergwerksstollen von El Potosi (Chihuahua) beträgt 800 km. Diesem Bezirk wird eine Metallproduktion im Werte von 300 Millionen Dollar zugeschrieben.

Der Bezirk von Patshuca (einschließlich Real del Monte) diente seit seiner Entdeckung im Jahre 1534 fast ohne Unterbrechung dem Silberabbau; der Wert dieses Silbers wird auf 400 Millionen Dollar beziffert. Das Gebiet von Guanajuato lieferte seit 1548 für eine halbe Milliarde Dollar Silber.

Die Geologen suchen gewöhnlich die Hauptader. Eine solche, die berühmte Veta Madre (Mutterader), gibt es in Guanajuato. Ihre Länge beträgt 25 km und ihre mittlere Mächtigkeit 6 bis 8 m. Das Erz ist in Körpern von 200 bis 400 m Länge und bis zu 200 m Tiefe konzentriert.

Es ist nicht unsere Absicht, hier eine Übersicht über Edelmetallagerstätten zu geben. Wichtig für uns ist nur ihre Beziehung zum Vulkanismus. Deshalb wollen wir unseren Überblick über diese Lagerstätten mit einem Beispiel für eine Lagerstätte eines höheren Temperaturbereichs abschließen, die auch eine etwas andere Vererzungsstruktur aufweist; wir meinen die Silber-Zinn-Lagerstätten von Potosi in Bolivien. Dieses Gebiet ist als das silberreichste



*Der Krater des Cotopaxi in 5890 m Höhe*

der Welt bekannt und der Berg Cerro Potosi als der »reichste Berg«. Seit 1544 wurden hier über 30 000 t Silber gewonnen. Der kegelförmige vulkanische Gipfel des Cerro Potosi (4800 m über dem Meeresspiegel) besteht aus Rhyolith (Quarzporphyr).

Eine Vielzahl streifiger oder drusiger Adern durchsetzt den Potosiberg. Nach oben hin verzweigen sich die Adern, und so besteht ein großer Teil dieses Berges aus Erz. Die oxydierten Erze enthalten 3 kg Silber je t Erz.

Man kennt in Bolivien auch weitere Beispiele derartiger Vorkommen, z. B. Oruro.

Lagerstätten des sogenannten bolivianischen Typs gibt es auch in anderen Ländern, darunter in der UdSSR. Doch das Potosivorkommen selbst ist einmalig. Es gibt keines, das ihm gleicht.

**Quecksilberlagerstätten:** Eine Verbindung zwischen Quecksilberlagerstätten einerseits und dem Magmatismus andererseits festzustellen gelingt oftmals überhaupt nicht. Aus diesem Grunde gehören viele Quecksilberkonzentrationen zur Klasse der telethermalen Vorkommen, die niedrigen Temperaturbereichen angehören und vom mag-

matischen Herd weit entfernt sind. In einigen Fällen kann die Verbindung mit dem Vulkanismus bei Lagerstätten ganz bestimmter Typen anhand einer Reihe von Merkmalen eindeutig nachgewiesen werden, so z. B. für das größte Quecksilbervorkommen der Welt, Almaden.

Diese Lagerstätte befindet sich an den Hängen der Sierra Morena, fast im Zentrum Spaniens. Das Bergwerk ist bereits seit über 2000 Jahren in Betrieb und enthält noch immer die größten von allen bekannten Quecksilbervorräten; es könnte die ganze Welt noch für viele Dutzend Jahre mit Quecksilber versorgen.

Die Erze von Almaden sind Quecksilbersulfide (Zinnober), die in alten sedimentären Quarziten auftreten. Das Alter des Zinnobers selbst ist gering. Seine Entstehung steht im Zusammenhang mit dem tertiären Vulkanismus, der zum Eindringen vulkanischer Quarzporphyre in die Quarzitschichten geführt hat. Ein Hinweis auf den vulkanischen Ursprung des Quecksilbers ist auch das Vorhandensein vulkanischer Explosionsschlote in der Lagerstätte von Almaden.

Im Bezirk Monte Amiata (Italien) befindet sich das Quecksilberbergwerk Abbadia San Salvador, das zweitgrößte in der Welt überhaupt. Hier haben bereits die Griechen und Römer Abbau betrieben. Die Lagerstätte steht im Zusammenhang mit der Tätigkeit des auch heute aktiven Vulkans Monte Amiata, obwohl sich die Erze in älterem Kalkstein befinden, der unter den vulkanischen Gesteinen liegt. Das Alter der Lagerstätte beträgt 30 000 Jahre.

Die Vorkommen im Bezirk von Opalit befinden sich an der Grenze der Staaten Nevada und Oregon in den USA. Selbst die ältesten Gesteine dieses Bezirks sind junge Miozänvulkanite, deren Zusammensetzung vom Basalt bis zum Rhyolith reicht. Zu Beginn der vulkanischen Tätigkeit entstand eine horizontal liegende Folge vulkanischen Gesteins von 1 km Mächtigkeit. Diese Schicht wurde später durch Brüche zerstört, und es drangen erneut Rhyolithe ein. Zu diesen Rhyolithen gehören große Erzkörper.

Die Vererzung läßt sich in verquarzten Rhyolithlinsen beobachten. Die Erzkörper sind röhrenförmig und spiegeln so die Form der Kanäle wider, durch die die erzführenden

Lösungen eindringen. Der Quecksilbergehalt in diesen Erzen beträgt etwa 5,5 kg je Tonne Erz.

Spricht man schließlich von Quecksilber- und Antimonlagerstätten, so muß man unbedingt auch diejenige Gruppe unter ihnen erwähnen, deren Bildung in der Gegenwart mit der Tätigkeit vulkanischer Thermalquellen verknüpft ist und die möglicherweise den Lagerstätten in den Bodensedimenten des Pazifiks und des Roten Meeres ähnlich sind.

Dazu gehören die Lagerstätten an der Westküste der USA. Erzvorkommen des gleichen Typs kennt man auch auf Kamtschatka in der UdSSR sowie in anderen Ländern.

Die Erzvorkommen von Amedi liegen in Ostkalifornien. Die Quecksilberminerale Zinnober und Metacinnabarit bilden Überkrustungen an Gesteinen, die die Austrittsöffnungen der Quellen unmittelbar umgeben. In der Nachbarschaft dieser Quellen fand man in Sedimentgesteinen Kügelchen von gediegenem Quecksilber. Ähnlich tritt das Erz an den Quellen von Boiling und Koso auf.

Auch die Quellen von Stimbout in Nevada lagerten vor nicht allzu ferner Vergangenheit Zinnober ab. Gegenwärtig tritt noch Antimonit ( $Sb_2S_3$ ) aus.

Riesige Quecksilbermengen wurden durch die Quellen von Sulphur Bank gefördert. Die oberen Horizonte dieser Lagerstätte wurden, wie wir bereits erwähnt haben, zunächst als Schwefelerze abgebaut.

*Zinnlagerstätten:* Noch vor 20 Jahren nahm Malaysia mit seinen umfangreichen Zinnseifen den ersten Platz unter den kapitalistischen Ländern der Welt in bezug auf die Zinngewinnung ein. Den zweiten Platz hatte Bolivien mit seinen jungen vulkanischen Lagerstätten inne. Rund 60% bolivianischen Zinns stammen aus der Lagerstättengruppe Unsija-Llalagua. Das Erz steht hier mit einem System von Gängen in Verbindung, die im Inneren eines subvulkanischen, oberflächennahen Stocks aus tertiärem Quarzporphyr verlaufen. In den mächtigsten Adern findet man das Erz säulenförmig eingelagert, wobei einige Teile davon geradezu phänomenal reich sind und 90 bis 120 cm lange Kassiteritkörper enthalten. Silber fehlt. Die Erze der oberen Horizonte enthielten im Mittel 8 bis 12% Zinn.

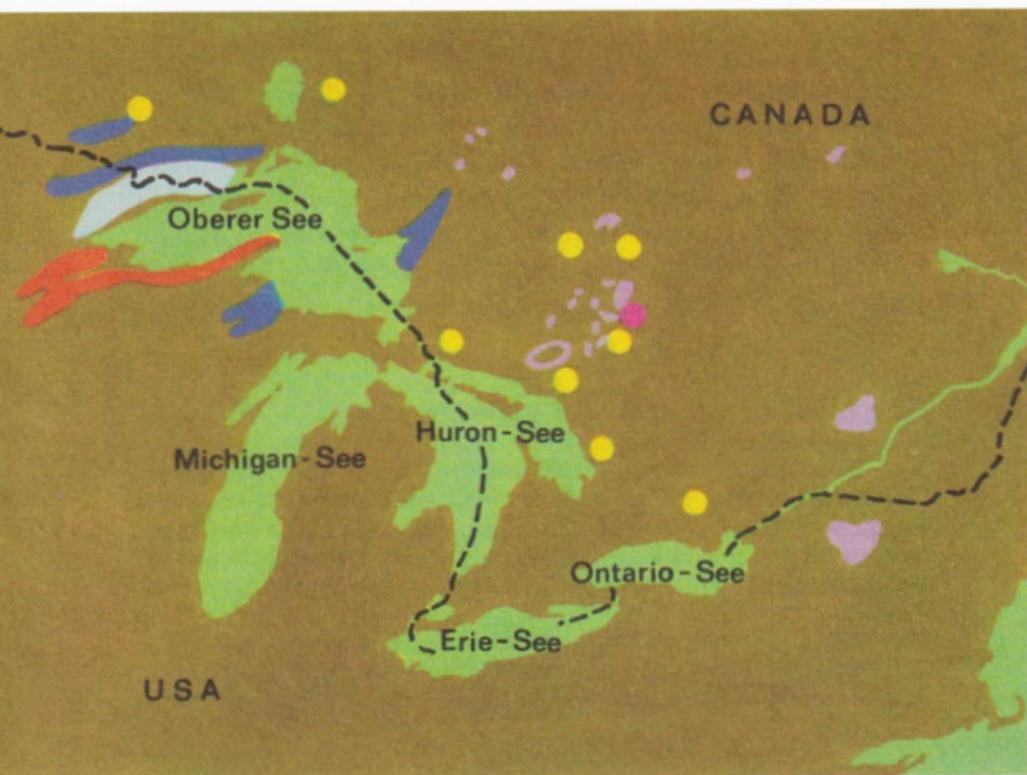
Dazu muß gesagt werden, daß Vorkommen mit 1% Zinn-  
gehalt bereits als reich gelten.

Abschließend berichten wir noch über solche Giganten unter den Erzlagerstätten wie die Kupfervorkommen von Butte im Staate Montana in den USA, über das Gebiet des Oberen Sees, über die Molybdän- und Uranlagerstätten von Climax in Colorado sowie schließlich über die Gold- und Uranvorkommen von Witwatersrand in Südafrika. Die letztgenannte Lagerstätte allerdings ist kein Beispiel für eine direkte Beziehung zum Vulkanismus, doch hat der älteste Vulkanismus unserer Erde an der Formierung dieses Vorkommens ohne Zweifel mitgewirkt, wenn auch nur indirekt.

Das *Gebiet des Oberen Sees* galt noch bis vor kurzem als zweitgrößtes Kupfergebiet der Welt. Es ist auch heute noch das größte Vorkommen von *gediegenem Kupfer*. Die Lagerstätten befinden sich auf der Halbinsel Keweenaw im nordwestlichen Teil von Michigan und am Nordufer des Oberen Sees. Die Vorkommen treten innerhalb eines Gürtels von 3 bis 65 km Breite und 160 km Länge auf. 42 von diesen 160 km waren hochproduktiv. Die Ausbeutung dieses Gebiets begann schon in prähistorischer Zeit. Später wurde es im 17. Jahrhundert von den Jesuiten wiederentdeckt. Gegenwärtig sind die Vorkommen am Oberen See fast vollständig abgebaut. Rund 100 Gesellschaften waren hier am Abbau beteiligt; die Erze enthielten im Mittel 1,27% Cu. Das Gebiet ist aus präkambrischen Basaltlavaströmen mit Sandstein- und Konglomeratzwischenschichten aufgebaut. Die Erzlager, die die Hauptmasse des Erzes enthalten, sind Schichten von porösen Basalten, in denen als mandelförmige Ausfüllungen Kalzit, Epidot, Adular, Zeolithe und gediegenes Kupfer auftreten.

In den Lagerstätten finden wir Lager und Gänge vor. In einigen Gängen erreichten die Ansammlungen gediegenen Kupfers ein Gewicht von 500 Tonnen. Sie enthalten auch gediegenes Silber sowie eine gewisse Menge an Sulfiden und Arseniden.

Bedeutende Forscher bringen diese einmaligen Lagerstätten von gediegenem Kupfer mit sehr früher vulkanischer Tätigkeit in Verbindung. W. Lindgren vermutet



**Cu**      **Fe**      **Ni, Ti**      **Au**      **Ag, Co**

*Die Lagerstättenprovinz im Gebiet der Großen Seen Nordamerikas*

beispielsweise, daß diese Lagerstätten bei Temperaturen von höchstens 250°C kurze Zeit nach dem Lavaerguß entstanden sind und das Kupfer und die übrigen Elemente aus den Laven selbst stammen.

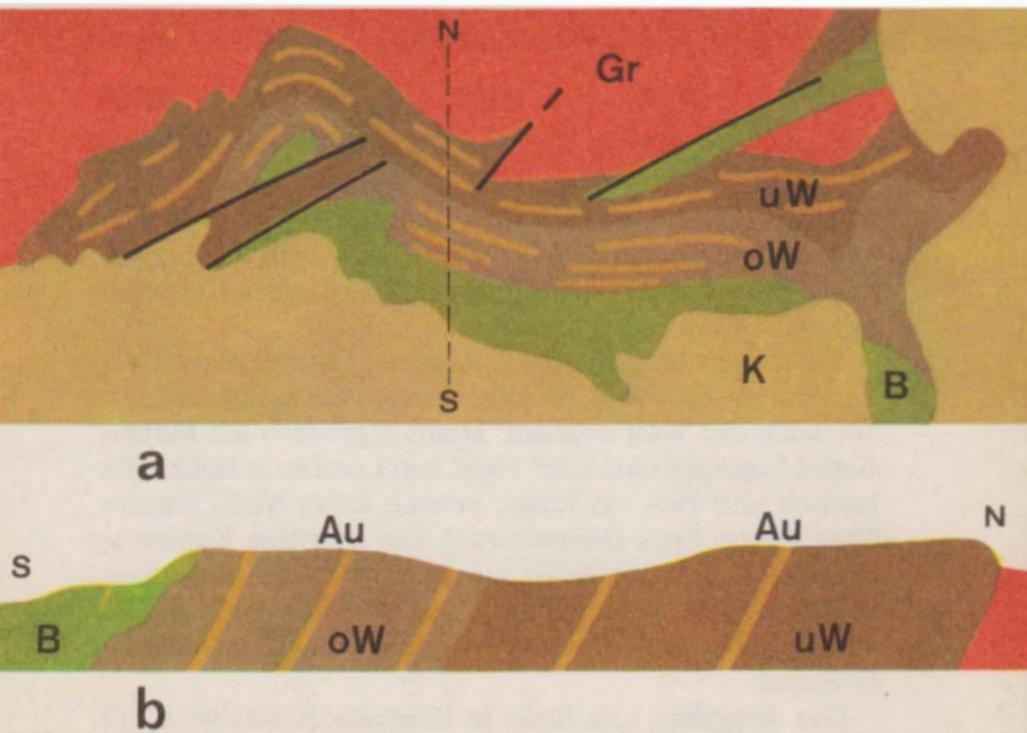
Das Auftreten gediegenen Kupfers, assoziiert mit Tieftemperatur-Zeolith-Mineralen, ist auch aus vielen anderen Gebieten der Welt bekannt. Hierher gehören die Montecatini-Lagerstätten in der Nähe von Livorno in Italien. Es handelt sich hier um junge, eozäne Erze. Noch jüngere Erze dieses Typs (Miozänerze) sind von den Kommandeur-Inseln bekannt. Paläozoische Lagerstätten findet man in der UdSSR in Kasachstan sowie in den USA in den Appalachen, in Virginia, Pennsylvania und in anderen Gebieten.

Das *Erzgebiet von Butte* in Montana (USA) wird auf

einer Fläche von nur etwa 18 km<sup>2</sup> bei einer Vererzungstiefe von 1 km von über 1 600 km unterirdischen Schächten und Strecken durchzogen. Seit 1879 lieferte dieses Gebiet Kupfer für insgesamt 2,3 Milliarden Dollar. Davor (1864 bis 1867) wurden hier Goldseifen abgebaut und später (seit 1874) Silbervorkommen. Bis 1964 hatte man insgesamt 7,4 Millionen Tonnen Kupfer, 2 Millionen Tonnen Zink, 1,7 Millionen Tonnen Mangan, 370 000 Tonnen Blei und 1 800 Tonnen Silber gewonnen. In seinem Reichtum steht

*Die goldreichste Lagerstätte der Welt: Witwatersrand in Südafrika. a – Verbreitung der goldführenden Horizonte bei Johannesburg; b – Nord-Süd-Profil. Innerhalb präkambrischer Konglomerate (Witwatersrandformation) befinden sich goldführende Horizonte, sogenannte Reefs, mit max. 10 g Au/t. Im Süden und im Osten werden die steilstehenden Schichten von karbonischen Sedimenten der Karrooformation überlagert, die noch weitere Goldvorkommen verdecken.*

*Au – Gold; Gr – Granit; uW – untere Witwatersrandformation mit 2 Reefs; oW – obere Witwatersrandformation mit 3 Reefs; B – basaltische Ergußgesteine; K – Sedimente der Karrooformation*



dieses Gebiet nur hinter dem goldenen Witwatersrand in Afrika zurück.

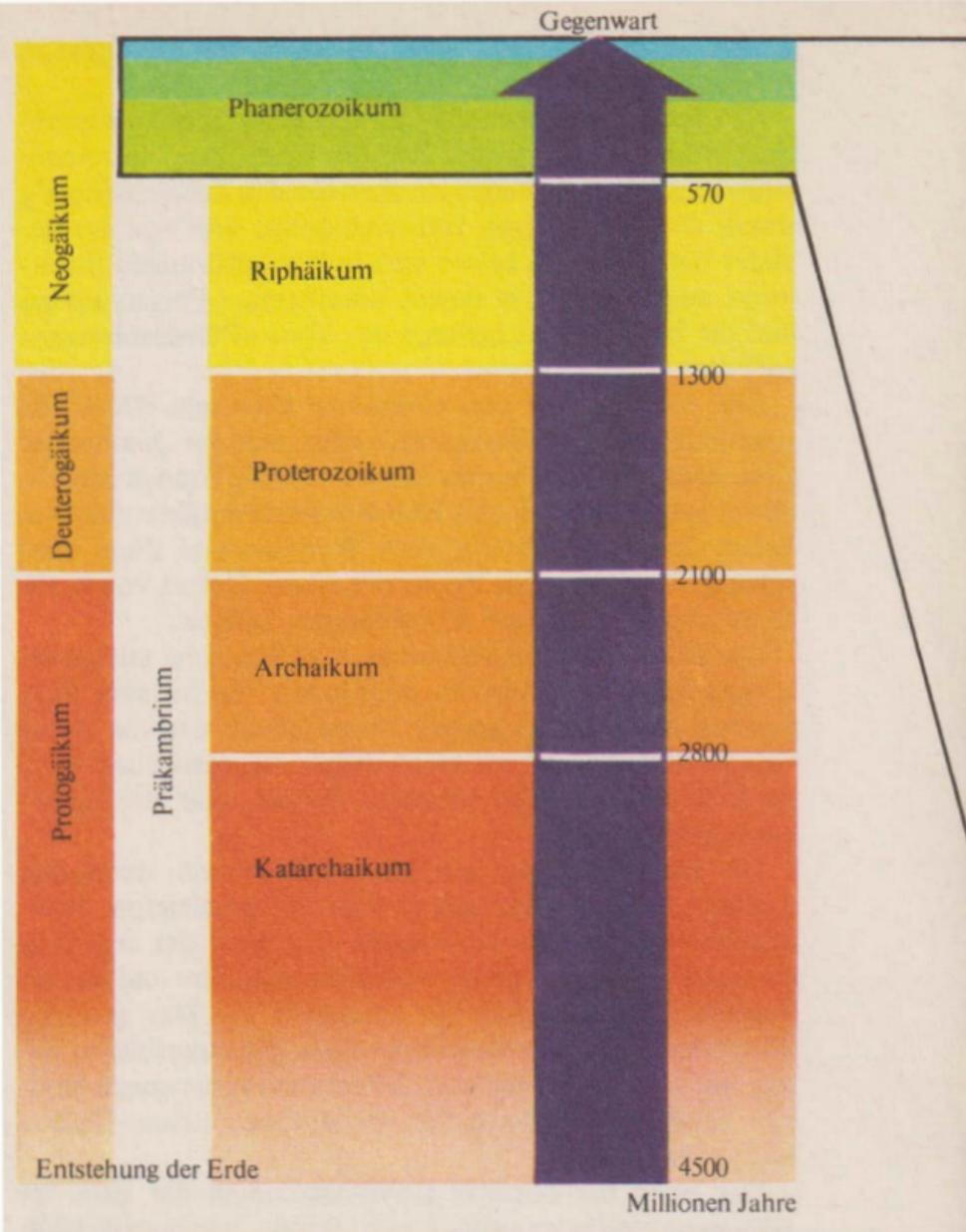
Die geologische Struktur des Gebietes ist sehr kompliziert. Hier sei nur gesagt, daß die Erzbildung mit einem lange existierenden magmatischen Herd in Zusammenhang stand, der den riesigen Intrusivbatolith von Boulder gebildet hat. Die Erze haben sich in kuppelförmigen Strukturen angereichert, in denen aderförmige Porphyrgänge und die berühmten Erzgänge des Typs »Pferdeschwanz« auftreten.

Das Vorkommen von *Climax* in Colorado (USA) ist sowohl nach seinen Vorräten als auch nach der Qualität der Erze einmalig. 1966 waren bereits 453 000 Tonnen Molybdän abgebaut worden. Als Nebenprodukt entzieht man den Erzen dieser Lagerstätte auch Wolfram und Zinn. Man schätzt den Vorrat an Erzen mit einem Gehalt von 0,4% Molybdänit ( $\text{MoS}_2$ ) auf 400 Millionen Tonnen.

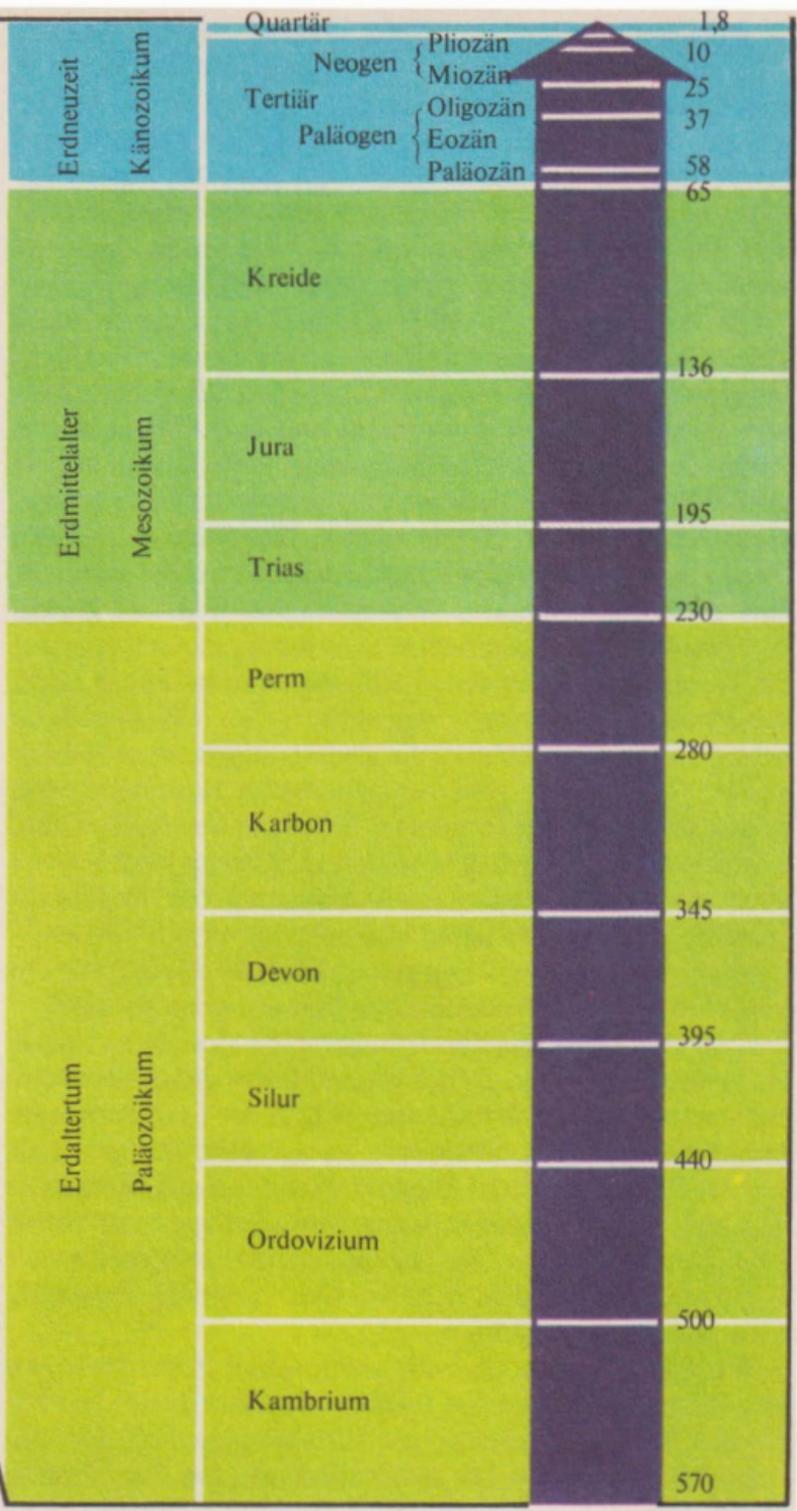
Die Molybdänitmineralisation von *Climax* ist mit stockartigen Rhyolithporphyren verbunden, die im subvulkanischen Niveau entstanden. Dieser Stock und die damit vergesellschafteten, spaltenförmigen magmatischen Körper stammen aus dem mittleren Tertiär, sind also geologisch ganz jung.

Die Kuppelstruktur der Lagerstätte wurde durch die Kräfte der mit flüchtigen Stoffen gesättigten magmatischen Schmelze verursacht. Im Dach der Kuppeln entstand ein System großer radial verlaufender und kleiner Spalten, in denen das Erz enthalten ist. Das gesamte Molybdänit ist in Gestalt feiner Kristalle ausgebildet, die eng mit Quarz und anderen Mineralen verwachsen sind. Die größte wirtschaftliche Bedeutung haben Quarz-Molybdänit-Gänge.

Das wohl berühmteste Goldvorkommen der Erde ist *Witwatersrand* oder einfach nur »Rand«, wie man es auch bezeichnet. Nach Berechnungen von Fachleuten befinden sich in der Gegenwart insgesamt 60 000 Tonnen Gold im Umlauf oder werden in den staatlichen Schatzkammern verwahrt. 20 000 Tonnen Gold lieferte in den letzten Jahren der Rand. Das Gold des Rands lagert in dünnen Schichten eines Konglomerats, das zum Witwatersrandsystem gehört. Die Konglomerate (abgerundetes Geröll mit einem



**Die Einteilung der Erdgeschichte**



feinkörnigen Zement) befinden sich im unteren Teil des Witwatersrandsystems. Sie werden von alten Graniten und kristallinen Schiefen unterlagert.

Gold und andere Erzminerale in Konglomeraten sind gewöhnlich sedimentären Ursprungs (Seifen). Viele Forscher haben den Rand lange Zeit hindurch ebenfalls für eine Seifenlagerstätte gehalten, und eine große Zahl von ihnen hält auch heute noch an dieser Auffassung fest.

Die Form jedoch, in der man das Gold in diesen Konglomeraten findet, seine Rauigkeit (die Körner sind nicht abgerundet), das Auftreten von Schuppen, die Substitution von Geröllelementen durch Gold und das Auftreten von Pyrit, der ebenfalls Geröllelemente substituiert, sowie schließlich auch die Anwesenheit anderer typisch hydrothermalen Minerale und Produkte, die entstehen, wenn Gesteine von heißen Lösungen beeinflusst werden, sind für eine andere Gruppe von Wissenschaftlern Grund genug, den Rand als eine Lagerstätte anzusehen, die in bezug auf die Konglomerate, in denen sich die Erze befinden, nicht syngenetisch, sondern epigenetisch ist. (Syngenetisch nennt man Erzlagerstätten, die gleichzeitig mit dem Nebengestein entstanden sind, epigenetische Bildungen sind jünger als ihre Umgebung.) Die Anhänger der Auffassung, wonach die Erze hydrothermalen Ursprungs sind, weisen auch darauf hin, daß nach Ablagerung der Sedimentgesteine am Witwatersrand vulkanische Aktivitäten stattfanden und die Konglomeratschichten als Kanäle für die epigenetischen postvulkanischen Fluide dienen konnten.

Über den Ursprung dieser Lagerstätte sind dicke Bände geschrieben worden. In der einen Hälfte davon wird der sedimentäre und in der anderen Hälfte der hydrothermale Ursprung bewiesen. Trotzdem sei auf eine Besonderheit bei der Entstehung der Konglomerate des Rands hingewiesen, die, wie uns scheint, selbst von Geologen nur wenig berücksichtigt wird. *Die Konglomerate entstanden vor 2200 Millionen Jahren*, d. h. am Übergang vom Protogäikum zum Deuterogäikum.

Wir haben bereits über die chemischen Besonderheiten des Protoozeans und der Protoatmosphäre jener Zeit berichtet, über die geringen Geschwindigkeiten der Sedimentakkumulation im Zusammenhang mit dem Fehlen

eines scharf ausgeprägten Reliefs und schließlich auch über die Temperaturverhältnisse an der Oberfläche des Planeten, über das Klima, die ungeheure Wärmesättigung der Rinde usw. Das chemisch aggressive Wasser des heißen Protoozeans, an dessen Boden sich im Delta heißer Flüsse die Randkonglomerate anhäufte, der hohe Kohlenwasserstoffgehalt im Wasser und in der Atmosphäre sowie andere Besonderheiten im Zusammenhang mit dem Alter der Sedimentakkumulation und schließlich die ungeheure Langwierigkeit des Vorgangs der Sedimentanhäufung (einige 100 Millionen Jahre) können, wie uns scheint, hydrothermale Merkmale der Minerale erklären. Der Vulkanismus hat direkt oder indirekt ganz ohne Zweifel seine Rolle bei den Besonderheiten der Entstehung dieser einmaligen Lagerstätte gespielt.

Damit schließen wir unsere kurze Übersicht über die Erzlagerstätten ab, bei denen der Vulkanismus eine wichtige und gelegentlich die bestimmende Rolle gespielt hat. Natürlich haben wir damit nur einen ganz kleinen Teil dessen dargestellt, was mit den Erzreichtümern der Erde an interessantem Tatsachenmaterial verknüpft ist.

Wir hoffen jedoch, daß die hier angeführte kleine Zahl von Beispielen ausreicht, um zu verstehen, wie vielfältig die Erscheinungsformen des Vulkanismus im geologischen Leben unseres Planeten sind und wie eng die Menschheitsgeschichte damit verbunden ist.

---

# Wie schnell schlägt der Puls der Erde?

---

## Stein gewordene Zeit

Wie kann der Mensch die Zeit darstellen? Nur durch eine Aneinanderreihung von Ereignissen. Geologische und insbesondere vulkanische Ereignisse bestehen in der Anhäufung von Stoff und in der Bildung sogenannter vulkanogener Formationen. Darunter verstehen die Geologen natürliche Gemeinschaften von genetisch eng miteinander verbundenen effusiven (lat. *effusio* = Erguß) und effusiv-sedimentären Ablagerungen mit intrusiven Anteilen (das sind in andere Gesteine eingedrungene Magmen). Sie sind charakteristisch für bestimmte Stadien des tektonisch magmatischen Entwicklungszyklus. Das gilt sowohl für Bewegungszonen als auch für vulkanische Geostrukturen. Vulkanogene Formationen lösen einander sukzessive in Zeit und Raum ab und bilden den geologischen Raum, der nichts anderes ist als vergegenständlichte Zeit.

Wir haben von vulkanischen Gürteln gesprochen und von der »Inhomogenität« der geologischen Zeit, die in einer ungestümen Beschleunigung der geologischen Prozesse vom Protogäikum bis zur Neuzeit zum Ausdruck kommt. Die Folgen dieser Akzeleration sind mannigfaltig und bedeutsam. Eine davon ist die in der Gegenwart stattfindende Bildung außerordentlich reicher Erzlagerstätten am Boden der Meere und Ozeane.

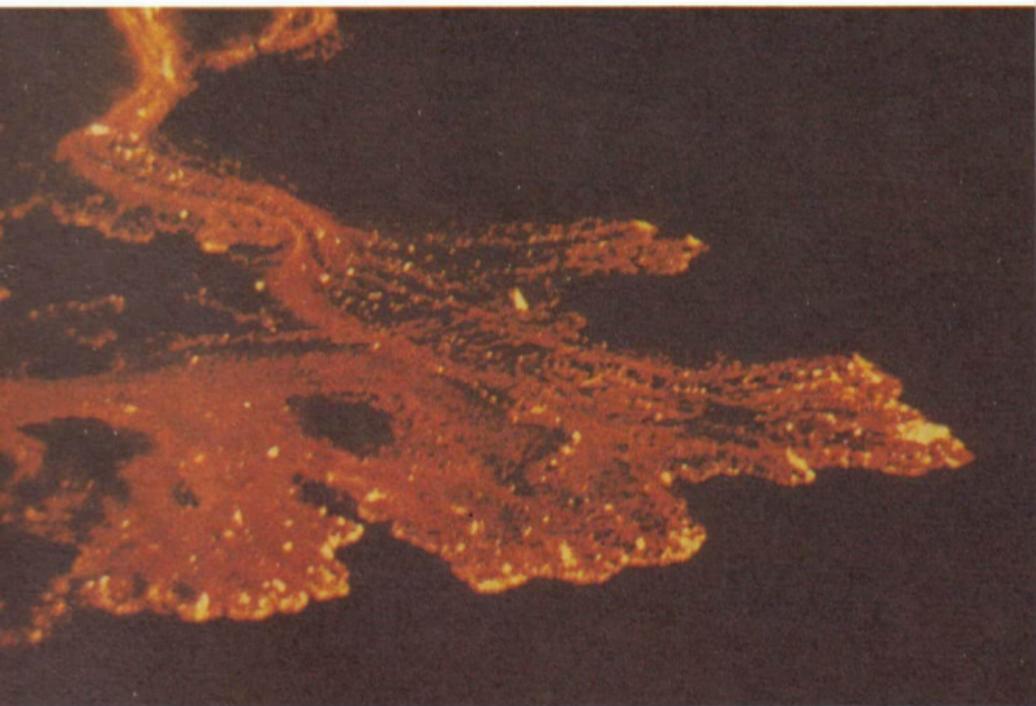
Wir wollen nun die Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung des vulkanischen Prozesses unter dem Aspekt der Beschleunigung des »Pulsschlags unseres Planeten«, d. h. der Anhäufungsgeschwindigkeiten vulkanogener Formationen und der mit ihnen in Zusammenhang stehenden Erz-

lagerstätten in Durchlässigkeitszonen der Erdrinde unterschiedlichen Alters (junge und alte vulkanische Gürtel), betrachten.

## Blick auf den pazifischen Feuerring

Die spätmesozoische und känozoische geologische Geschichte des pazifischen Bewegungsgürtels ist außerordentlich reich an vulkanischen Erscheinungsformen. Dabei kann festgestellt werden, daß die Bezeichnung »pazifischer Feuerring«, die zur Charakterisierung der vulkanischen Aktivität dieser planetaren Geostruktur in der Gegenwart verwendet wird, gleichermaßen auch auf das Pliozän und das Miozän übertragen werden kann. Mehr noch: Die wichtigsten spätmesozoischen geologischen Prozesse waren in der Hauptsache vulkanische Ereignisse. Im Unterschied zu späteren Vorgängen jedoch liefen diese

*Dünnflüssige, basaltische Lava vom Ausbruch des Kilauea auf Hawaii 1959*



Prozesse nicht oberirdisch, sondern submarin ab, und zwar unter jenen Tiefseeverhältnissen, die für die anfänglichen Entwicklungsstadien des Systems junger vulkanischer Gürtel im Pazifik charakteristisch sind. Zu diesen Gürteln zählen die Inselbögen am westlichen und südwestlichen Pazifikrand sowie die vulkanischen Gürtel der Kordilleren und Anden in Amerika.

Zum System der Inselbögen, die den asiatischen Kontinent umgeben, gehören der Bogen von Kamtschatka-Korjak, der Aleutenbogen, die Kurilen und der Japanische Bogen, die zusammengenommen den ochotsko-japanischen vulkanischen Gürtel bilden, sowie die Marianen, die Philippinen, Indonesien und andere Strukturen, die sehr anschaulich als »Girlande der Inselbögen Südostasiens« bezeichnet werden.

Die gemeinsame Besonderheit der aufgezählten Gebiete besteht in einer gewissen Synchronität der geologischen Prozesse. Die Bildung von Tiefseesenken mit auftretendem submarinem Vulkanismus und die Ausbildung der

*Dieser Lavatyp erstarrt zu sogenannter Stricklava.*





*Vulkane Krashenninikow und Kronozki auf Kamtschatka*

entsprechenden Erzlagerstätten erfolgte z. B. fast gleichzeitig im westlichen und östlichen Sektor der pazifischen Bewegungszone. Diese Ereignisse fanden in der späten Kreide bzw. im frühen Paläogen (vor 60 bis 100 Millionen Jahren) statt. Anschließend wurden diese Senken durch Hebung trocken gelegt. Der Beginn des Miozäns (vor 25 Millionen Jahren) ist im gesamten pazifischen »Feuer-ring« durch die Ausbildung sekundärer Flachwassersenken charakterisiert. Auch die Trockenlegung dieser Senken geschieht im gesamten Gürtel gleichzeitig. Anstelle der sekundären Senken wachsen vulkanische Inseln empor. In diese Epoche fällt die Ausbildung zahlreicher Kies-Polymetall- und Gold-Silber-Lagerstätten.

Im Pliozän und im Quartär stellte die pazifische Bewegungszone, wie bereits erwähnt, einen nahezu geschlossenen Feuerring mit intensivem Vulkanismus dar.

Eine interessante Besonderheit der jungen vulkanischen Gürtel des Pazifiks ist die sprunghafte Beschleunigung der geologischen Prozesse zur Abschlußetappe hin – eine sehr wichtige Besonderheit der Entwicklungsdynamik nicht nur junger, sondern, wie wir im folgenden sehen werden, auch älterer vulkanischer Gürtel. Sie bestimmt auch ihre gerichtete metallogenetische Entwicklung. Betrachten wir nun die Besonderheiten beim Auftreten des Vulkanismus und der Erzbildung in der Zeit etwas ausführlicher anhand von Beispielen einzelner vulkanischer Gürtel.

Der ochotsko-japanische vulkanische Gürtel entwickelte sich im Verlauf von 100 Millionen Jahren. Man unterscheidet hier äußere und innere Bögen. Das äußere System dieser Doppelbögen umfaßt Sachalin, den südwestlichen Teil der Insel Hokkaido und einen großen Teil der Insel Honshū, während zum anderen System die beiden Ketten der Großen und Kleinen Kurilen, der nordöstliche Teil von Hokkaido sowie Kamtschatka gehören.

Die inneren Bögen sind Gebiete mit Vulkanismus und Erzbildung aus dem Neogen, dem Jungtertiär, während die gleichen Prozesse in den äußeren Bögen hauptsächlich der späten Kreide bzw. dem frühen Paläogen zuzuordnen sind.

In den verschiedenen geologischen Entwicklungsstadien des hier betrachteten Gebietes bildeten sich typische vulkanogene Formationen heraus. Es sind dies die Tiefseesenken, die vulkanischen Inseln und die vulkanischen Rücken. Für die Formation der Tiefseesenken ist die Assoziation basischer Laven von submarinen Vulkanen (Basalte) mit Kieselschiefern charakteristisch.

Unter den Lagerstätten, die sich während dieser Entwicklungsetappe des vulkanischen Gürtels bildeten, kennen wir Kieslagerstätten von der Art der Kupferpyrite, schichtförmige Ablagerungen massiver und eingesprengter kupferführender Sulfide sowie Hochtemperatur-Poly-metall-Lagerstätten, die im Kontaktbereich mit tiefliegenden Magmaintrusionen entstanden.

Charakteristische Gesteine der Formation der vulkanischen Inseln sind Tuffkonglomerate, Andesitlaven und Tuffe. Die Bildung von Tuffkonglomeraten spiegelt den Kampf zweier Naturgewalten wider: der aufbauenden

Tätigkeit der Vulkane und der zerstörenden Kräfte des Meeres, das die vulkanischen Inseln umspült. Für die Erzbildung in den vulkanischen Gürteln ist die Etappe der vulkanischen Inseln eine der produktivsten überhaupt. In dieser Zeit entstanden die Kies-Poly Metall-Lagerstätten vom Kuromono-Typ (Cu, Pb, Zn, Au, Ag) und zahlreiche, wenn auch kleine Gold-Silber-Lagerstätten, Quecksilber-vorkommen usw.

Die Formation der *vulkanischen Rücken* ist durch intensiven Vulkanismus und gleichzeitige Zerstörung großer Landvulkane, die sich kettenförmig auf den Rücken entlangziehen, gekennzeichnet. Innerhalb der einzelnen vulkanischen Zentren sind saure vulkanische Produkte sehr verbreitet. Die Bodenschätze aus diesem Lebensabschnitt des vulkanischen Gürtels sind vor allem gediegener Schwefel, der gelegentlich große, industriell nutzbare Anhäufungen ausbildet.

## Vom Balkan bis zum Kaukasus

Die jungen vulkanischen Gürtel des Balkans und Osteuropas sind aus Formationen aufgebaut, die den pazifischen Gebilden vergleichbar sind. Eine ehemalige Tiefseesenke mit Anzeichen eines submarinen Vulkanismus läßt sich in Gestalt eines schmalen Streifens von der Stadt Burgas aus über das ganze Territorium von Bulgarien hinweg, fast bis nach Sofia hin, verfolgen. Hier schwenkt sie nach Nordwesten, und die Fortsetzung liegt dann bereits auf jugoslawischem Territorium (dem vulkanischen Massiv von Timok). Tektonisch betrachtet, stellt dieses Entwicklungsgebiet vulkanogener Gebilde der späten Kreide bis zum Paläogen eine schmale Senke dar, die sich zwischen zwei großen, starren, aus altem kristallinem Gestein aufgebauten Massiven befindet, und zwar der Misiker Platte im Norden und Nordwesten sowie dem Rhodopenmassiv im Süden. Das Profil der vulkanogenen Formation besteht aus miteinander abwechselnden Schichten von marinen Sedimenten und Effusiven sowie Tuffen, den Produkten submariner Vulkane.

Der transbalkanische vulkanische Gürtel ist vor allem als

Kupfererzprovinz bekannt. Durch den Magmatismus in diesem Gürtel entstanden bedeutende Kupfervorkommen, z. B. bei Bor und bei Majdanpek in Ostserbien sowie im Sofioter Gebiet in Bulgarien. Außerdem ist für diesen Gürtel Molybdänvererzung charakteristisch.

Die miozänen vulkanogenen Bildungen in Transsilvanien und des mittelslowakischen vulkanischen Gürtels sind Formationen vulkanischer Inseln. Sie wurden nur nicht vom Pazifik, sondern vom Sarmatischen Flachmeer umspült. Aber ebenso wie in der pazifischen Bewegungszone sind auch hier die vulkanischen Gürtel in metallogenetischer Hinsicht erstaunlich produktiv.

Wir haben bereits über die jungen Gold- und Silbervorkommen Transsilvaniens berichtet. Sie gehören in diese Zeit mit vorwiegend tertiärem Vulkanismus und tertiärer Erzbildung, die auch durch Quecksilbervorkommen bekannt sind.

Die Karpatentiefseesenke mit submarinem Vulkanismus entstand ebenfalls in der späten Kreide zwischen zwei großen und starren Elementen der Erdkruste, der Russischen Tafel im Osten und dem Pannonischen Massiv im Westen. Die Entwicklung dieser Senke wurde durch die Bildung einer vulkanischen Inselkette beendet. Dieses Ereignis fand im Sarmat (Neogen) statt. Das Gebiet mit neogenem Vulkanismus enthält sowohl im Transkarpatengebiet der Sowjetunion als auch im Kreis Baia-Mare in der Sozialistischen Republik Rumänien ausgezeichnete Vorkommen von Blei, Zink, Gold, Silber und Quecksilber. Wir finden hier ausgedehnte (bis 2000 m), mächtige (bis 20 m breite) und weit in die Tiefe reichende Gänge mit fadenförmigem Gold, silberhaltigem Galenit, Silberminerale usw.

Die vulkanischen Gürtel Kleinasiens und der Kleine Kaukasus sind für uns besonders interessant. Wir hatten im ersten Kapitel erwähnt, daß sie die Quelle jener Erze waren, auf denen die Entwicklung der alten Zivilisationen in Ägypten und Mesopotamien basierte.

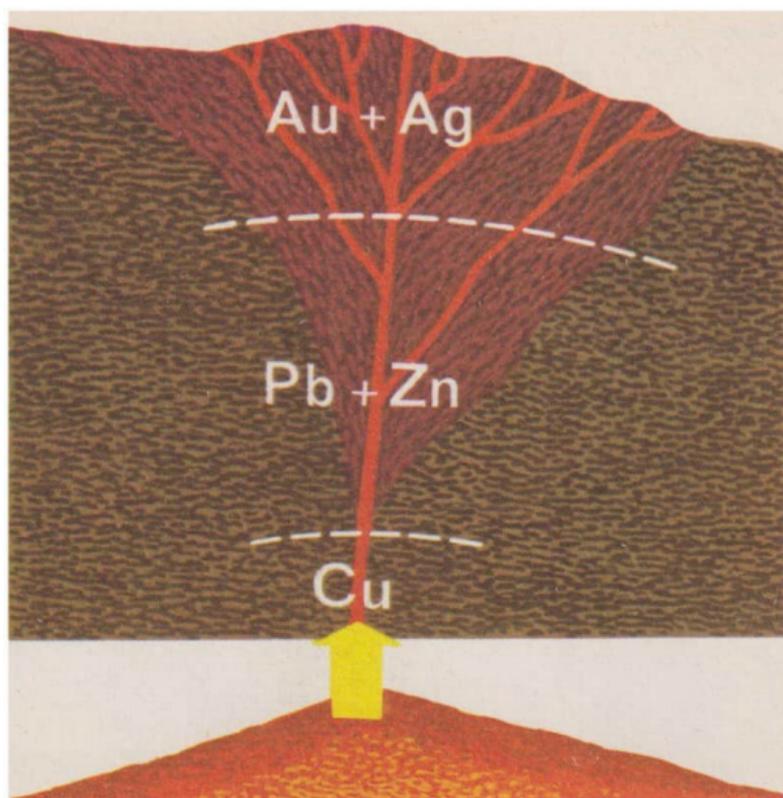
Einer dieser vulkanischen Gürtel sind die Ostpontiden (Türkei). Viele Forscher unterstreichen die Ähnlichkeit dieses Gürtels mit dem transbalkanischen vulkanischen Gürtel. Hier existierte zur späten Kreidezeit ebenfalls eine



*Sich langsam vorwalzender Lavastrom aus saurer (SiO<sub>2</sub>-reicher), zähflüssiger Schmelze auf Kamtschatka*

Tiefseesenke mit zahlreichen submarinen Vulkanen. Aus diesen vulkanischen Ablagerungen bestehen östlich von Samsun (türkische Schwarzmeerküste) alle Gebirgsbauten, die sich an der Südküste des Schwarzen Meeres bis zur sowjetisch-türkischen Grenze und noch in das Gebiet von Grusinien hinziehen. Ihre größte Mächtigkeit (bis 1 000 m) erreichen die Produkte des submarinen Vulkanismus im Gebiet der Kupfervorkommen.

Unter den Lagerstätten der Ostpontiden treten die Kupfer-Magnetit-Lagerstätten (im Kontakt mit magmatischem Gestein und Riffkalken) hervor, die auch Chalkopyrit, Sphalerit, Galenit und Polymetallagerstatten mit



*Hydrothermale polymetallische Ganglagerstätte Baia Sprie (SR Rumänien). Die Erzminerale innerhalb der vulkanischen Ablagerung sind in einer bestimmten Abfolge angereichert.*

Kupfer, Blei und Zink enthalten. Typische Vorkommen sind gerade die oberflächennahen Lagerstätten von Murgul, Kuvars Chana, Izrail, Kara-Erik und viele andere, die bereits die alten Ägypter mit Erzen versorgten. Die Mächtigkeit der schichtförmigen Lagerstätten erreicht 100 m und ihre Ausdehnung 200 m. Man beobachtete hier Körper aus massivem Erz, die bei 15 m Durchmesser bis zu 100 m tief waren. Analoge, aber jüngere Lagerstätten, die mit vulkanischen Inseln verknüpft waren, finden wir in der Fortsetzung der Pontiden in der UdSSR, in den Gebirgen von Adsharo und Trialet.

Im Kleinen Kaukasus gehört das Kupfer-Molybdän-Gebiet von Mischan-Zangezur zu den seit frühester Zeit genutzten vulkanogenen Lagerstätten. Analoges Vulkanis-

mus und analoge Vererzung sind auch in früheren geologischen Epochen im Kleinen Kaukasus aufgetreten. Es ist kein Zufall, daß dieses Gebiet zu einem bedeutsamen Zentrum der Entwicklung materieller Kulturen wurde.

Das Erzgebiet von Kafan ist das südlichste Glied des berühmten vulkanogenen Erzgürtels Alawerdi-Kafan (Armenien), der 170 Millionen Jahre alt ist. Zu jener Zeit existierte hier ebenfalls eine Tiefseesenke mit submarinen Vulkanen und vulkanischen Inseln. Die kupferkiesartige Vererzung im Vorkommen von Kafan hat die Form von Gängen und Trumen. Für das Erzgebiet von Alawerdi sind Kupfer- sowie Blei-Zink-Erze des gleichen Alters charakteristisch.

Am Schluß dieser Übersicht über den Vulkanismus und die vulkanischen Lagerstätten des Kleinen Kaukasus wollen wir noch den vulkanogenen Erzgürtel von Somshitsko (Grusinien)—Karabach (Aserbaidshan) aus der Kreidezeit erwähnen.

Die Erzkörper des Baryt-Blei-Zink-Vorkommens Marneuli im Bezirk von Bolnissi, der wegen seiner Bergbauindustrie bereits im frühesten Altertum sehr bekannt ist, lagern ebenfalls in submarinen Vulkaniten. Nach ihrer geologischen Position, der Form der Erzkörper, der Zusammensetzung der Erze sowie nach vielen anderen Merkmalen stellen diese Lagerstätten ein vollständiges Analogon zu den japanischen Baryt-Polymetall-Lagerstätten vom Typ »Kuromono« sowie zu den frühen paläozoischen Lagerstätten im Altai und in Kasachstan dar, von denen im folgenden die Rede sein soll.

## Abstieg in die Tiefen der Zeit

Die Bewegungszone Ural—Tjan-Schan ist ebenso ausgedehnt wie die Pazifische und Mediterrane. Der Vulkanismus trat hier im Verlauf von einigen 100 Millionen Jahren in Erscheinung. Wir unterscheiden dabei Gebiete mit mittel- und spätpaläozoischem Vulkanismus, die »Herzyniden«, sowie Gebiete mit früh- und mittelpaläozoischer vulkanischer Aktivität, die »Kaledoniden«.

Steigen wir nun weiter hinab in die Tiefen der Zeit und zugleich abwärts im geologischen Profil und betrachten nacheinander den Vulkanismus der »Herzyniden« und der »Kaledoniden« am Beispiel des Gebiets von Dshungarski—Alatan—Balchaschsee in Kasachstan, um zu zeigen, daß der Vulkanismus in diesen Gebieten, obwohl unterschiedlichen Alters, gleichartig auftritt, die gleichen Folgen und Erzvorkommen zeigt.

Der Tiefseevulkanismus hat sich im betrachteten Gebiet der »Herzyniden« recht matt entwickelt. Die vulkanogenen Formationen dieses Typs werden aus Kieselschiefer-Diabas-Folgen aus dem Silur aufgebaut. Anschließend, im Devon und im frühen Karbon, entstanden die vulkanischen Inseln. Ebenso wie in vielen vulkanischen Gürteln, die in ihrer Entwicklung das Stadium vulkanischer Inselbögen durchlaufen, endet dieser Zyklus durch Anhäufung vulkanischer Produkte infolge der Tätigkeit oberirdischer Vulkane im Bereich der vulkanischen Kordilleren am Ende des unteren Karbons.

Vor dem oberen Karbon wird das gesamte Gebiet gehoben, in dem sich im späten Karbon und im Perm saure vulkanische Produkte anhäuferten.

Die Erzbildung während der einzelnen Stadien des herzynischen Vulkanismus im Gebiet von Dshungarski—Alatan—Balchaschsee verläuft analog wie in den jüngeren geologischen Zeitabschnitten. Während der Anfangsstadien des Vulkanismus entstehen Kupferkieslagerstätten. Mit den Inselvulkaniten des Famenne-Tournai (Oberdevon—Unterkarbon) sind in Stockwerken ausgebildete Polymetallagerstätten von Blei und Zink verknüpft. Dem frühen Karbon gehören auch viele Blei- und Zinklagerstätten in Kalksteinen und Schiefen nördlich des Balchaschsees an. Die mit der postmagmatischen Tätigkeit des Tournai-Vulkanismus in Zusammenhang stehenden Lagerstätten konzentrierten sich im Sandstein, in Tuffiten, im Kalkstein und im Schiefer, die günstige Voraussetzungen für eine Vererzung besitzen. Wir haben Grund zu der Annahme, daß mit dem Vulkanismus des frühen Karbons große Gold- und Gold-Silber-Vorkommen und mit den

*Vulkanischer Ausbruch, von elektrischen Entladungen begleitet*



Abschlußstadien des spätpaläozoischen Vulkanismus eine Vererzung mit seltenen Metallen (Molybdän, Wolfram und Beryllium) verknüpft waren.

Der kaledonische vulkanische Zyklus und die damit in Zusammenhang stehende Erzbildung werden wir am Beispiel von Nordkasachstan behandeln. In der kaledonischen Zone Kasachstans ist ebenfalls eine gerichtete Folge vulkanogener Formationen zu erkennen, die einander nach und nach und gesetzmäßig in Zeit und Raum ablösen. Die Geschichte des ältesten paläozoischen Vulkanismus beginnt mit der Tätigkeit von Tiefseevulkanen im unteren bis mittleren Kambrium (vor 540 bis 570 Millionen Jahren). Die Produkte dieses Vulkanismus sind Basalte. Nach einer Unterbrechung erneuert sich der Vulkanismus im Spätkambrium und dem unteren Ordovizium (vor 480 bis 520 Millionen Jahren). Hier hat er allerdings bereits die Gestalt vulkanischer Inseln. Die Entstehungsbedingungen für die Tortkudukvulkanite in Kasachstan sind den Akkumulationsbedingungen der Laven, Tuffe und Tuffkonglomerate der pazifischen vulkanischen Inseln des Miozäns, den Vulkaniten des Kleinen Kaukasus aus der späten Kreidezeit sowie einer ganzen Reihe anderer Gebiete sehr ähnlich. Die weitere Tätigkeit und das Wachstum der Vulkane im Silur führten dazu, daß an der Stelle der vulkanischen Inseln ein vulkanischer Gebirgsrücken emporwächst, Kordilleren also, die denen junger vulkanischer Gebiete vergleichbar sind.

Bisher haben wir über die Ähnlichkeit der vulkanischen Prozesse und über die damit in Zusammenhang stehende Erzbildung während aller Etappen der geologischen Geschichte der Erde berichtet. Weiter oben hatten wir jedoch darauf hingewiesen, daß die Verlaufsgeschwindigkeit dieser Prozesse vom Protogäikum bis heute unaufhaltsam wächst. Dies muß notwendigerweise auch in Besonderheiten der geologischen Gebilde unterschiedlicher Altersstufen (auch wenn sie vom gleichen Typ sind) seinen Niederschlag finden.

Im Zusammenhang mit dem soeben Gesagten wollen wir einige geodynamische Aspekte der Entwicklung unserer Erde als Planet betrachten und versuchen, die Einflußnahme der vulkanischen, plutonischen, metamorphen und

erzbildenden Prozesse aufzuzeigen. Bei der Gelegenheit werden wir nachweisen, daß die Vulkane der Gegenwart nicht nur großartige Naturerscheinungen sind, sondern auch Hinweise auf geologisch ältere Erzbezirke geben, daß sie Merkmale solcher Bezirke darstellen. Diese Eigenschaft der tätigen Vulkane kann bereits heute bei der wirtschaftlich bedeutsamen geologisch-ökonomischen Rayonierung der Gebiete genutzt werden, in denen Vulkanismus auftritt.

Durch Analyse der tektonisch-magmatischen Entwicklungsgeschichte der Bewegungszonen unserer Erdrinde, der einzelnen Faltungsgebiete und der langlebigen Zentren tektonisch-magmatischer Aktivität sind die Forscher schon vor langer Zeit zu der Auffassung gelangt, daß diese Entwicklung sowohl gerichtet als auch irreversibel (nicht umkehrbar, nicht rückgängig zu machen) ist. Auch in bezug auf die Ausbildung der geologischen Hüllen des Planeten wird eine mehrfache Wiederholung der tektonisch-magmatischen Prozesse in der Erdgeschichte angenommen, wiewohl einige Wissenschaftler hier auch Reversibilität für möglich halten. In den letzten Jahren allerdings zeichnet sich eine Tendenz zur Revision der Grundsätze für die historische Ausrichtung der tektonisch-magmatischen Evolution ab. Formationsunterschiede lassen sich demzufolge unter dem Aspekt der Inhomogenität (Ungleichartigkeit) der Umgebung betrachten, in der der tektonisch-magmatische Prozeß an den verschiedenen Abschnitten eines sich gleichzeitig entwickelnden Bewegungsgebietes abläuft. In der Tat kann man gar nicht selten die Beobachtung machen, daß geologische Formationen, die einen bestimmten historischen Entwicklungsstand von Bewegungsgebieten repräsentieren, sich in solchen Bezirken der Erdrinde entwickeln, die sich, entwicklungsgeschichtlich betrachtet, in einem anderen Stadium befinden. Wichtig ist jedoch der Hinweis, daß solche Beispiele für Abweichungen von der »Historizität« der tektonisch-magmatischen Evolution deren Allgemeingültigkeit absolut nicht negieren. Mehr noch: Diese Erscheinungen sprechen dafür, daß jene Faktoren, die die Entwicklungsrichtung und den Formationsaufbau »kontrollieren«, vom Zustand der Umgebung abhängen und eine

Funktion dieses Zustandes sind. Für bestimmte Umgebungs Zustände benutzen die Wissenschaftler bereits seit geraumer Zeit eine ganze Gruppe der unterschiedlichsten Termini, die Merkmale für Erscheinungsformen dieses Zustandes unter den verschiedenen Aspekten des Entwicklungsprozesses enthalten.

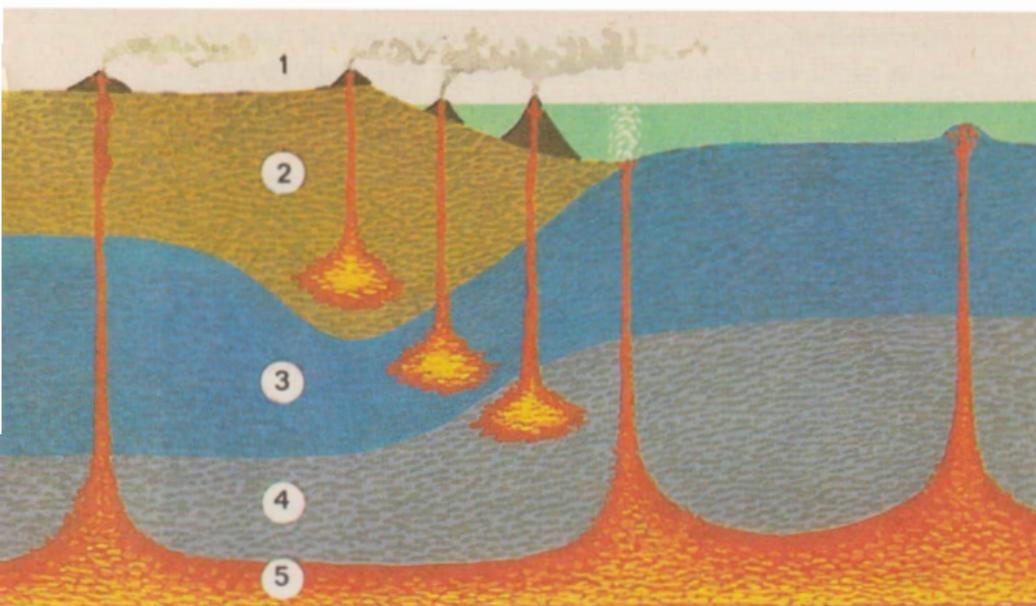
So unterscheidet man beim Faltungsprozeß die alpinotype Faltung, eine Faltung mit vorherrschenden Deckenüberschiebungen von großer Intensität und bogenförmiger Anlage, die germanotype Faltung, eine Blockfaltung (Bruchtektonik) mit Elementen einer Großgrabenbildung. Die Störungszonen trennt man in mehr oder weniger durchdringungsfähige, tektonisch stärker und weniger durchgearbeitete, die auch durch Zerrungs- oder Pressungszustände verschieden charakterisiert werden.

Petrologen benutzen in großem Umfang den Begriff »Tiefenfazies«. Darunter verstehen sie vor allem die Bedingungen, unter denen magmatische und metamorphe Prozesse in der Tiefe ablaufen. Diese Bedingungen, die durch den Druck, die Temperatur sowie die Konzentration der beweglichen Komponenten bestimmt werden, sind nicht so sehr eine Funktion der Tiefe an sich als vielmehr des Zustandes (z. B. der Durchlässigkeit) der Umgebung.

Einigen wir uns einmal darauf, im folgenden jenes Verhältnis, das für eine konkrete Entwicklungsstufe der Erdkruste, eines Faltungsgebietes, einer Struktur-Formations-Zone oder eines langlebigen Zentrums der tektonisch-magmatischen Aktivität charakteristisch ist, als geodynamischen Zustand dieses Teils der Geohülle zu bezeichnen.

Die gerichtete Änderung der geodynamischen Zustände kann im allgemeinen durch die Änderung der Parameter Druck, Temperatur und Konzentration ausgedrückt werden. Während sich die Änderungen von Druck und Temperatur gegenwärtig aus vorhandenen thermischen und dynamischen Modellen der Erde ableiten lassen, erfordert die Kennzeichnung des Parameters »Konzentration« eine besondere Betrachtung, die uns bis zur Entstehungsgeschichte der Geohüllen unseres Planeten führt.

Heute nimmt man an, daß der Wasserstoff in den Tiefen



*Die gegenwärtigen Vorstellungen über die Herkunft der vulkanischen Schmelzen. 1 – Kontinent mit vorgelagerten vulkanischen Inselbögen; 2 – obere Kruste, kontinentale Kruste; 3 – untere Kruste, ozeanische Kruste; 4 – oberer Mantel; 5 – Magmazone unterhalb der Gesteinshülle. Die Zusammensetzung und die Beschaffenheit der Schmelze ist von ihrem Entstehungsort abhängig.*

der Erde eine außerordentlich große Rolle spielt. Besonders Interesse verdient dabei die Grenze zwischen der unteren Kruste und dem oberen Mantel. Hier erfolgt eine Zunahme des Sauerstoffpartialdrucks. Der im Bereich des Mantels dominierende Wasserstoff wird an dieser Grenze, der Mohorovičić-Diskontinuität, durch den aktiver werdenden Sauerstoff abgelöst, wobei exotherme Oxydationsreaktionen stattfinden. Diese Energien aus der Oxydation von Silan und anderen Hydriden verursachen hier Aufschmelzung von Silikatmassen und die Entstehung magmatischer Herde.

Die anschließende Reaktion der Hydride mit dem Sauerstoff der Kruste verstärkt den exothermen (grch. exon = außen) Effekt an der Mohorovičić-Diskontinuität und bildet offenbar einen der Hauptfaktoren zur Gewährleistung sowohl des regionalen Wärmestroms als auch der anormalen Wärmeströme in Bruchzonen, die den Mantel

durchdringen. Die Mohorovičić-Diskontinuität ist demnach nicht so sehr eine stabile Grenze zwischen den Geohüllen als vielmehr eine »Reaktionsschicht« mit Herdcharakter. Die Tiefe der Moho ist damit abhängig von der Durchlässigkeit der Kruste für den aus dem Mantel kommenden Strom im betreffenden Abschnitt. Das Alter der an der Mohorovičić-Diskontinuität existierenden Herde muß dem Zeitpunkt des Beginns der Krustenentstehung entsprechen (3,5 Milliarden Jahre). In den Zonen langlebiger planetarer Geostrukturen in den Bewegungszonen müssen auch gegenwärtig noch magmatische Herde an der Mohorovičić-Diskontinuität vorhanden sein.

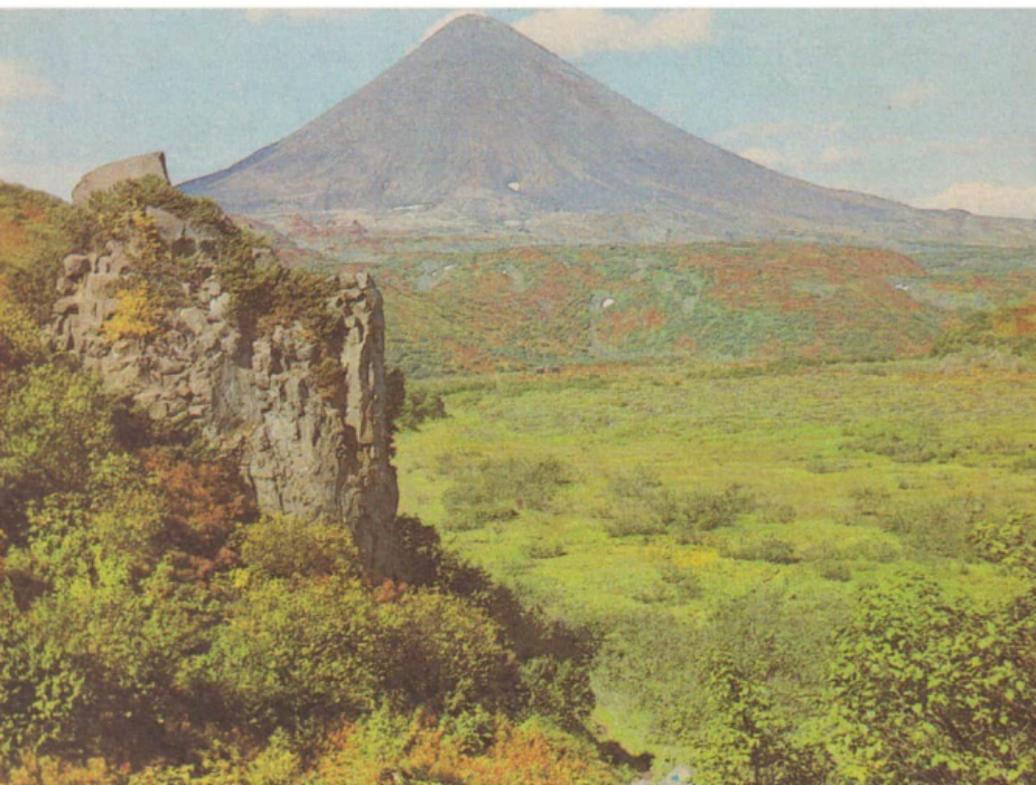
Der Durchtritt eines Stroms flüchtiger Bestandteile aus dem Mantel in höhere Krustenhorizonte führt nicht nur zum Anwachsen der Kruste, sondern auch zu deren Differenzierung. Hier zeigt das Wasser bei hohen Temperaturen und Drücken gegenüber Silikaten ein außerordentlich aggressives Verhalten. Es kommt zu lebhaften exothermen Reaktionen zwischen beiden, und das Material wird unter paragenetischer Bildung eines Erzfluids aufgeschmolzen.

Die weitere Evolution des intratellurischen Stroms und der Produkte aus den Reaktionen mit dem Umgebungsgestein stellt nun bereits die Evolution des »endogenen Fluids« dar, das mit neu aufgenommenen bzw. intratellurischen Elementen gesättigt ist. In Tiefen von 5 bis 8 km, die von der Zirkulation atmosphärischen Wassers besonders in den Zonen mit erhöhter Durchlässigkeit und Leitfähigkeit erreicht werden, die die vulkanisch-tektonischen Strukturen ja darstellen, erfolgt die dritte Gruppe exothermer Reaktionen (von der Mohorovičić-Diskontinuität an gerechnet), die ihrem Wesen nach den früher beschriebenen Fällen analog sind. Die Herausbildung sogenannter peripherer Herde unter Vulkanen stellt eine Erscheinung dieses in der Tiefe ablaufenden Prozesses dar.

Wir haben hier in aller Kürze von einigen Besonderheiten des vulkanischen Prozesses und über ihren Anteil an der geologischen Entwicklung unserer Erde berichtet. An einigen Beispielen zeigten wir die gesetzmäßige Ausrichtung des vulkanischen Prozesses im Bereich linearer Durchlässigkeitszonen in der Kruste, in deren Verlauf

vulkanische Gürtel entstehen. Ein über lange Zeit gerichtet verlaufender und sich der Erdoberfläche nähernder magmatischer Prozeß ist jedoch nicht nur für planetarische vulkanische Gürtel charakteristisch. Innerhalb dieser Gürtel treten einzelne aktive Zentren hervor, in denen endogene Wärme- und Stoffübertragung, Tiefenmagmatismus, Erzbildung und Vulkanismus schon viele Millionen Jahre andauern. Diese Zentren lassen sich in alten ebenso wie in jungen vulkanischen Gürteln beobachten. Untersuchungen im »pazifischen Feuerring« ließen uns zu der Feststellung gelangen, daß sich die geologische Entwicklung der langlebigen Zentren dort in der gegenwärtigen Etappe dem Ende nähert. So sind diese Vulkane nicht nur ein höchst interessantes Naturphänomen, sondern sie bilden zugleich einen wichtigen Hinweis auf Erzbezirke.

*Der Vulkan Karymski, einer der aktivsten Vulkane Kamtschatkas*



Unter vielen berühmten Vulkanen lagern ältere Erzvorkommen. Dies ist nicht nur in Japan und auf Kamtschatka zu beobachten, sondern auch in anderen Gebieten. Die Erforschung dieser Beziehungen erleichtert in der Gegenwart die geologisch-ökonomische Rayonierung vulkanischer Gebiete.

## Reichtum für die Menschheit

Wir begannen dieses Buch mit einem kurzen Bericht über den engen Zusammenhang zwischen den Geschicken der Menschheit und dem Vulkanismus in seinen verschiedenen Erscheinungsformen. Wir berichteten über den Reichtum der Erde, gewachsen aus der vulkanogenen Erzbildung, und schließlich auch darüber, daß die Vulkane in der Volkswirtschaft für die Entwicklung einer Erz-Rohstoff-Basis genutzt werden können, ganz abgesehen von der Möglichkeit, die hier vorhandene Wärme zu nutzen. In dreieinhalb Milliarden Jahren vulkanischer Erdgeschichte hat die Natur unerschöpfliche Reichtümer geschaffen.

Andererseits ist es längst zu einer unbestrittenen Wahrheit geworden, daß die Anzahl der leicht zu entdeckenden Erzlagerstätten unaufhaltsam kleiner wird. In 1000 Jahren ihrer Entwicklung hat die Menschheit den Vorrat an vulkanischen und sonstigen Erzen entscheidend reduziert, obwohl sich ihre Kenntnis nur auf eine ganz dünne Hülle der Erdkruste beschränkte. Ein Eindringen in die Tiefe der Erde macht außerordentliche technische Schwierigkeiten und erfordert hohe Aufwendungen. Dies zum einen. Zum anderen aber fordert die Industrie hier und heute in wachsenden Mengen Rohstoffe, aus denen sich Metalle gewinnen lassen.

Zugleich wachsen aber auch die technischen Möglichkeiten zur Erschließung und Nutzung ärmerer Erze und weniger großer Lagerstätten. So sind z. B. die reichen, aber nicht allzu großen und schwer erkundbaren vulkanischen Gold-Silber-Lagerstätten in das Blickfeld des Menschen geraten. Noch vor kurzem hielten große staatliche Betriebe

*Reichtum aus den Tiefen der Erde*



die Goldgewinnung, solange die reichen Seifen noch nicht erschöpft waren, für unrentabel. Heute ist das anders! Der Erkundung und Inbetriebnahme solcher Lagerstätten wird große Aufmerksamkeit gewidmet. Mehr noch: In den USA hat man eine geologische Durchsicht aller früher aufgegebenen und als erschöpft geltenden Lagerstätten dieses Typs unternommen. Und viele von ihnen begannen erneut Gewinn abzuwerfen.

In der Sowjetunion behalten ebenfalls die alten Gebiete des Goldbergbaus im Ural, Altai, in Kasachstan, in Mittelasien und im Kaukasus ihre Bedeutung. Und auch der Ferne Osten und der Nordosten der UdSSR werden in zunehmendem Maße erschlossen und enthüllen ihre Reichtümer. Die Erforschung neuer Gebiete durch die Geologen vermehrt die Vorräte an Erzen und hilft den Bedarf der Industrie zu befriedigen.

»akzent« – die Taschenbuchreihe  
mit vielseitiger Thematik:  
Mensch und Gesellschaft,  
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft  
und Technik. – Lebendiges Wissen  
für jedermann, anregend und aktuell,  
konkret und bildhaft.

---

**Weitere Bände:**

Kehnscherper, Auf der Suche nach Atlantis  
Brentjes, Rätsel aus dem Altertum  
Marquart, Raumstationen  
Conrad, Vom Jakobsstab  
zur Satellitennavigation  
Petrik, Kurioses aus der Technik  
Mohrig, Wie kam der Mensch zur Familie?  
Krumbiegel, Tiere und Pflanzen der Vorzeit