

Die Erde – Planet unter Planeten

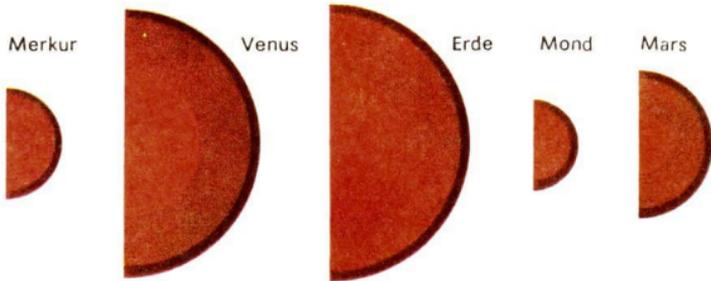
Manfred Reichstein



Manfred Reichstein

Die Erde – Planet unter Planeten

Verlag Neues Leben Berlin



Kosmische Vergleiche

Zeichnungen von Peter Hesse

© Verlag Neues Leben, Berlin 1979

Lizenz Nr. 303 (305/115/79)

LSV 1419

Einband: Peter Hesse, Gerhard Christian Schulz

Fotos: ADN — ZB / Ahnert (1) / AP-Tele (4) / Camera Press (1) / Franke (1) / Göldner (1) / Müller (1) / Nordfoto (1) / Polfoto (1) / Pressens Bild (1) / TASS (8) / UPI-Tele (1); Archiv des Autors (2); U. Brandt, Halle (1); VEB Carl Zeiss JENA (5); Deutsche Fotothek Dresden / Hahn (1); Geologische Lehrsammlung der Sektion Geographie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (1); Meteorologischer Dienst der DDR (1); Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität Berlin / Mineralogisches Museum (3) / Paläontologisches Museum (2); NASA (4); NOWOSTI (5)

Typografie: Gerhard Christian Schulz

Schrift: 11 p Maxima

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig — III/18/97

Bestellnummer 6428651

DDR 17,80M

Planet Erde und die Raumfahrt



Geologie aus Raumfahrerperspektiven

Von Jahr zu Jahr häufen sich die Meldungen über neue Forschungsergebnisse aus dem Weltraum. Da wird von Planetensonden berichtet, die Venus und Mars erkunden oder sogar bis zum Merkur vorstoßen. Vorbei ist die Zeit, als die Raumflugunternehmen gerade bis zum Mond reichten! Seit Anfang der siebziger Jahre werden selbst so ferne Planeten wie Jupiter und Saturn angesteuert, und auch sie dürften nicht lange unsere weitesten Ziele bleiben.

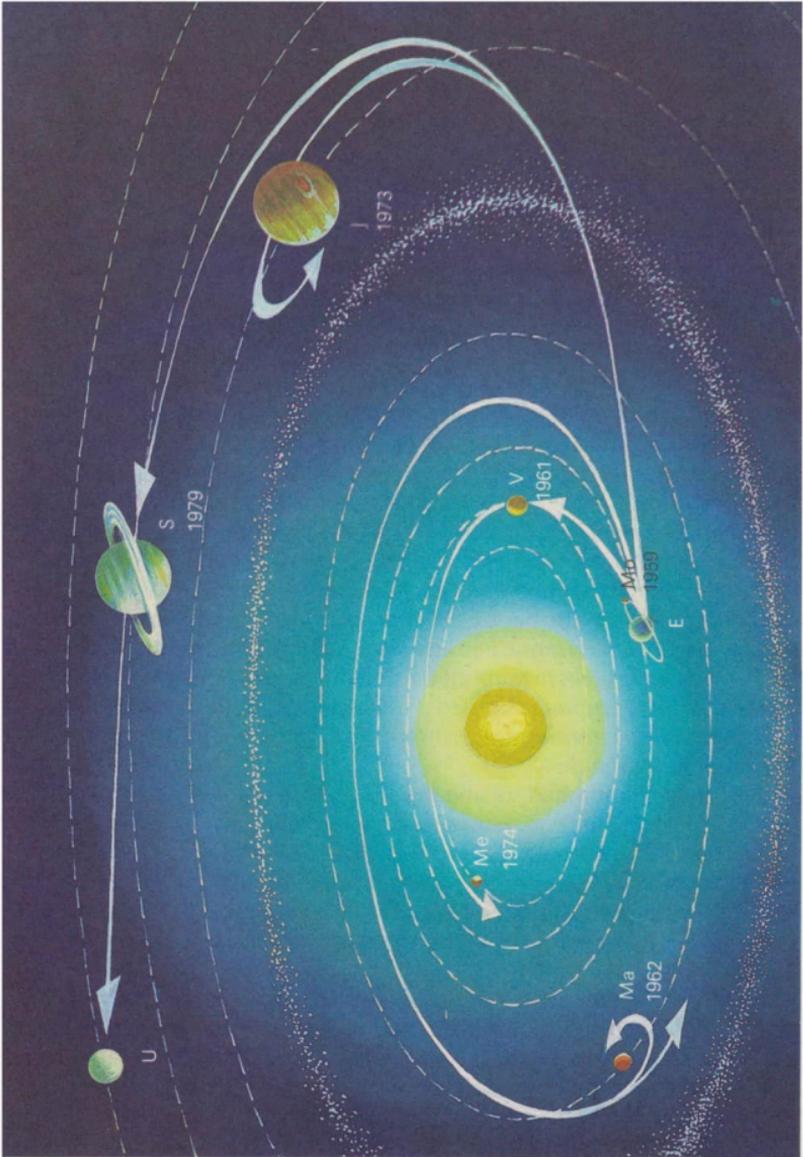
Aber diese Planetenforschung ist nur *eine* Arbeitsrichtung der Raumfahrt von heute. Vielleicht eine der faszinierendsten, weil Neuland im wahrsten Sinn des Worts dabei entdeckt wird – doch lange nicht die wichtigste.

Die Forschung für die Erde als den Heimatplaneten der Menschen beherrscht unser und wohl auch noch so manches der nächsten Jahrzehnte. Die Generallinie der sowjetischen Raumfahrt war neben der technischen Erprobung von Anfang an darauf gerichtet, der menschlichen Gesellschaft Nutzen zu bringen. Seit dem Start von „Sputnik 1“ am 4. Oktober 1957 und *Juri Gagarins* (1934–1968) Flug am 12. April 1961 belegen das nun bereits zwei Jahrzehnte Raumfahrtgeschichte.

Es geht um die richtigen Proportionen zwischen Erderkundung und Planetenerkundung durch die Raumfahrt. Keineswegs geht es darum, nur das eine zu tun und das andere zu lassen. Fernerkundung im Sinn der Erforschung unserer Planetennachbarn oder noch fernerer Begleiter soll und darf nicht erst dann einsetzen, wenn wir über die Erde „alles“ wissen; im Gegenteil. Sie kann durch die Vermittlung wesent-

Immer fernere Ziele erreichen die Planetensonden (Jahreszahlen geben die Zeit des ersten Vorbeiflugs an).

Me = Merkur; V = Venus; E = Erde; Mo = Mond; Ma = Mars; J = Jupiter; S = Saturn; U = Uranus



licher Erkenntnisse helfen, die Entwicklungsgeschichte unseres Heimatplaneten schneller zu enträtseln, ja, sie macht dies in vieler Hinsicht – wie wir noch erfahren werden – überhaupt erst möglich.

Nach zwei Jahrzehnten Raumfahrt hat die Zahl der in eine Umlaufbahn um die Erde geschossenen Satelliten bereits die 2000 überschritten. Ihnen stehen einige Dutzend Mond- und Planetensonden gegenüber – durchaus ein gesundes Verhältnis, an dem sich auch in Zukunft so schnell nichts ändern wird.

Was diese Sonden und Satelliten bisher an Erkenntnissen gebracht haben, das kann sich sehen lassen. Ja, den Wissenschaftlern droht der Datenzufluß über den Kopf zu wachsen! Vieles muß gespeichert werden. Die Daten einer einzigen Mission zu verarbeiten kann Jahre in Anspruch nehmen.

Zu den Hauptnutznießern dieser neuen Informationsquellen gehört die kosmische Geologie. In gewisser Hinsicht ist sie sogar der Raumfahrt ureigenstes Kind. Wohl wurde der Ausdruck „kosmische Geologie“ vereinzelt auch schon früher verwendet. Aber in einer solchen Dimension, daß man eigene Institutionen gründen mußte, um all die damit im Zusammenhang stehenden Themen- und Problemkreise bearbeiten zu können, gibt es diese Forschungsrichtung erst seit Beginn der Raumfahrtunternehmen. Die Glanzleistungen der Technik haben der Wissenschaft ein neues Fenster geöffnet, haben es möglich gemacht, die Erde sozusagen aus kosmischer Sicht zu betrachten. Daß eine solche Plattform auch ganz neue Erkenntnisse gestattet, war zu erwarten. Daß darunter aber so Fundamentales sein würde, was an mancher alten Lehrmeinung rütteln ließ, hatte man denn doch nicht voraussehen können.

Der neue Standpunkt zwang auch zur Aufgabe des klassischen Einteilungsprinzips für jene naturwissenschaftlichen Disziplinen, um die es hier besonders geht: die Geologie und die Astronomie. Die Erde global, das heißt in ihrer Gesamtheit (lat. globus = Kugel), zu betrachten und obendrein noch vergleichend von Planet zu Planet – das ist wohl nicht mehr Geologie im herkömmlichen Sinn, sondern das ist eben kosmische Geologie.

Andererseits war es der Astronom gewohnt, ausschließlich mit Hilfe seiner Teleskope oder der Vielzahl spezieller strahlungsmessender Geräte den Kosmos zu studieren. Laboruntersuchungen an Gesteinen des Mondes vorzunehmen oder Karten der Oberflächenformen von Planeten herzustellen fällt eigentlich nicht in sein Ressort. Unser Sonnensystem, dieser von der Raumfahrt mehr und mehr erschlossene

Nahbereich des Kosmos, wird jetzt in erster Linie von einer neuen, speziellen Arbeitsrichtung der Geowissenschaften und der Astronomie erforscht – der Planetologie.

Wir werden in den folgenden Kapiteln noch genügend Gelegenheit erhalten, die enge Verknüpfung der Problemkreise beider Disziplinen, sowohl der kosmischen Geologie als auch der Planetologie, genauer kennenzulernen. Formal könnte man die kosmische Geologie sogar als Unterdisziplin der Planetologie bezeichnen, befaßt sie sich doch im wesentlichen mit einem einzigen Planeten. Vom Mars oder von der Venus will sie in erster Linie ja nur wissen, was diese Himmelskörper so erdähnlich oder so ganz anders werden ließ und was wir daraus eventuell für die Vergangenheit und die Zukunft der Erdgeschichte ableiten können. Die Planetologie dagegen untersucht zum Beispiel den Mars an sich und fragt vor allem danach, wie das ganze Planetensystem entstand und ob sich Gesetzmäßigkeiten finden, die auf die Existenz anderer Planetensysteme hinweisen.

Doch gerade diese recht unterschiedlichen Ansatzpunkte beider Forschungsdisziplinen lassen ihr Anrecht auf ein selbständiges Nebeneinander trotz der ungezählten thematischen Verknüpfungen erkennen. Von einer Unterordnung der kosmischen Geologie unter die Planetologie spricht in der Praxis niemand; denn das verbietet schon der ungeheure Umfang des Problemkreises „Erde“.

Im allgemeinen berühren die Forschungsprobleme der kosmischen Geologie unseren Alltag kaum. Doch wehe, wenn der Rhythmus der uns vertrauten natürlichen Prozesse durchbrochen wird! Schon auf relativ geringe Abnormitäten reagieren wir mit Befürchtungen für den Fortbestand unserer Welt. Längere sommerliche Niederschlagspausen, wie in Mitteleuropa 1976, oder ungewöhnlich früh einsetzender Schneefall oder strenge Winter rufen fast regelmäßig die Frage nach großen Klimaänderungen oder nach einer neuen Eiszeit hervor. Das Jahr 1976 machte uns aber auch durch seine hohe Zahl katastrophaler Erdbeben, die besonders häufig dichter bevölkerte Regionen – beispielsweise Mittelamerikas, Chinas, der Philippinen oder der Türkei – heimsuchten, bewußt, daß auf dieser Erde nicht für die Ewigkeit gebaut werden kann. Infolgedessen erlangten wieder einige geologische Grundprobleme Aktualität und wurden eine Zeitlang selbst in der Tagespresse diskutiert: Welche gewaltigen erdinneren Kräfte verursachen denn eigentlich diese erdbebenerzeugenden Krustenverschiebungen? Und in schon weiter gehenden Spekulationen heißt es: Dehnt sich die Erde aus oder schrumpft sie? Und überhaupt, hängen nicht Erdbeben mit dem

Vulkanismus zusammen? Gibt es da nicht Theorien, die behaupten, die Erde würde immer heißer?

Derartigen Äußerungen liegen – ob bewußt oder unbewußt – echte kosmisch-geologische Fragestellungen zugrunde. Und diese werden um so fachspezifischer, je länger die Zeiträume oder je größer die Massen sind, deren Veränderungen wir untersuchen. Nicht das einzelne Erdbeben in der Türkei oder bei Taschkent stellt ein kosmisch-geologisches Problem dar, sondern die Frage, warum die Erde überhaupt noch nicht völlig erstarrt ist, ob solche Krustenbewegungen in Zukunft zu- oder abnehmen werden oder ob Beziehungen zum Vulkanismus bestehen, die man vielleicht auf anderen Planeten besser überschauen kann. Somit ist die kosmische Geologie die Wissenschaft von den Gesetzmäßigkeiten der Entwicklungsgeschichte unserer Erde als planetarischer Himmelskörper.

Dieser recht anspruchsvollen Zielstellung schrittweise immer näher zu kommen gelingt nur nach sorgfältiger Auswertung der verschiedenartigen Einzelbeobachtungen. Um Einblick in die kosmische Geologie zu gewinnen, können darum auch wir nichts Besseres tun, als uns einige ihrer markantesten Studienobjekte genauer anzusehen.

Satellitenbahnen für kosmische Späher

Stellen wir uns vor, wir säßen in einem Raumtransporter, der uns zu einer kosmischen Station bringen soll, die irgendwo zwischen 300 und 500 km Höhe die Erde umkreist. Unter den Bedingungen eines Senkrechtstarts wären wir in den ersten Minuten wohl noch zu sehr damit beschäftigt, dem gewaltigen Andruck vom Drei- bis Sechsfachen der normalen Schwerkraft, der uns in unsere Konturensitze preßt, zu widerstehen, als daß wir Zeit fänden, den schon in dieser Phase des Aufstiegs erfolgenden Übergang vom gewohnten Blau des Himmels über ein tiefes Tintenblau in das Schwarz des atmosphärefreien Weltraums zu beobachten.

Bereits nach knapp zwei Minuten könnten wir 40 km Höhe erreicht und infolge der enormen ständigen Beschleunigung eine Geschwindigkeit von 2 km/s überschritten haben. Kaum später als eine Viertelstunde nach dem Start dürfte sich schließlich das Einschwenken in die angestrebte Erdumlaufbahn vollziehen. Ähnliche Zeiten, sogar etwas weniger, brauchte 1961 Juri Gagarin für seinen Aufstieg zum Erstflug



Die Erde – aus 70 000 km Entfernung gesehen, am 8. August 1969 von der sowjetischen „Sonde 7“ aufgenommen

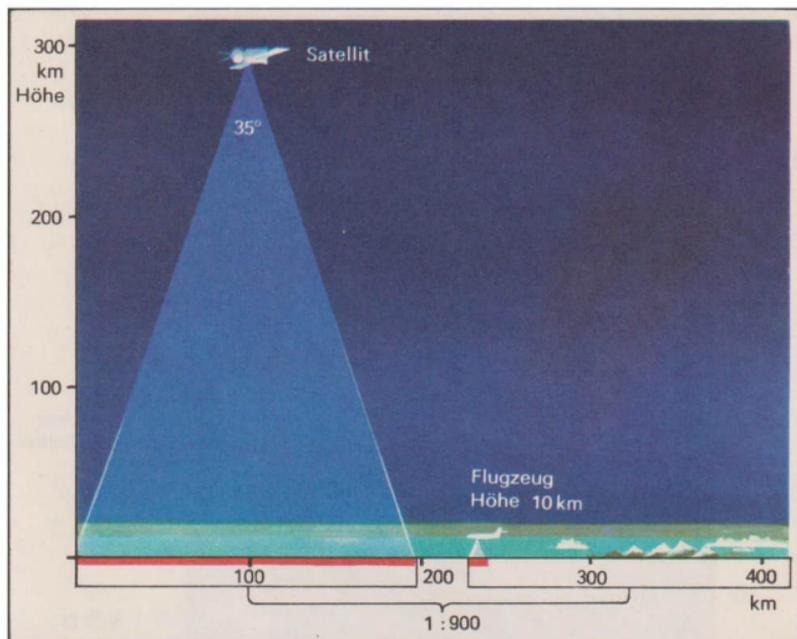
eines Menschen um die Erde in einer Umlaufbahn von 181 bis 327 km Höhe, und die „Apollo“-Astronauten erreichten 1969 schon etwa 12 Minuten nach dem Abheben von der Startrampe ihre erste Erdumlaufbahn in 180 km Höhe – und dies bei einer Geschwindigkeit von etwa 8 km/s.

Schauen wir nun aus dem Fenster des Raumfahrzeugs auf die Tagseite der Erde zurück, so muß den übereinstimmenden Berichten aller Raumfahrer zufolge die Farbsymphonie der scheinbar unter uns hinweggleitenden Kontinente und Ozeane und der vergänglichen Gebilde der Atmosphäre zu einem überwältigenden und unvergeßlichen Schauspiel werden. Das Blau herrscht über den weiten ozeanischen Bereichen vor und schließt als Farbring den deutlich gekrümmten Erdhorizont gegen den sternfunkelnden Nachthimmel des Kosmos ab. Nicht ohne Grund wurde der Begriff „Blauer Planet“ für unsere Erde geprägt.

Ab und an mischen sich die gelben oder braunroten Wüstenfarbtöne auf den Kontinenten in das wechselvolle Bild, und gerade dann sind Gebirge sowie die für den Geologen so wichtigen Strukturen der festen Erdkruste besonders gut zu erkennen. Viel schwieriger wird dies, wenn wir die feuchteren Regionen überfliegen, wo ein verschwommenes Blaugrün den Vegetationsreichtum der Landschaften unter uns anzeigt. Am auffallendsten blitzen dann die großen Ströme als silbrige Adern oder weiße Schnee- und Eisfelder der Hochgebirge im reflektierenden Sonnenlicht zu uns hinauf.

Nur allzuoft versperrt allerdings eine mehr oder weniger geschlossene Wolkendecke die direkte Sicht bis zur Oberfläche. Vergessen wir nicht: Annähernd 40 Prozent der Erdoberfläche werden im Durchschnitt von Wolken verhüllt! Aber wir können ja dasselbe Gebiet mehrmals überfliegen, ohne daß größere zusätzliche Kosten entstehen. Behält doch das Raumschiff die einmal erreichte Kreisbahngeschwindigkeit nahe 8 km/s in solchen Höhen von einigen hundert Kilometern sogar jahrelang fast ungebremst bei. Hier zeigt sich übrigens einer der wesentlichsten Vorteile gegenüber der Beobachtung aus dem Flugzeug. Der Luftaufenthalt erfordert ja ständig Antriebsenergie und damit hohe Kosten und hohen Treibstoffverbrauch. Ein Wiederholungsflug wird genauso teuer wie die Erstbefliegung zur geowissenschaftlichen Erkundung eines Gebiets.

Wir haben eingangs gesagt, daß wir mit unserem Raumtransporter irgendwo in einer Höhe zwischen 300 und 500 km Abstand von der Erdoberfläche eine bemannte Weltraumstation in der Erdumlaufbahn treffen werden. Was bestimmt eigentlich den Höhenbereich des Daueraufenthalts für eine kosmische Station, die Erderkundungsaufgaben zu erfüllen hat? Wäre ein Abstand von rund 100 km für die Beobachtung von Einzelheiten auf der Erdoberfläche nicht viel besser? Gewiß, der Vorteil liegt auf der Hand, obwohl dann schon wieder einiges von der Übersicht durch die „zu große Nähe“ verlorenginge.

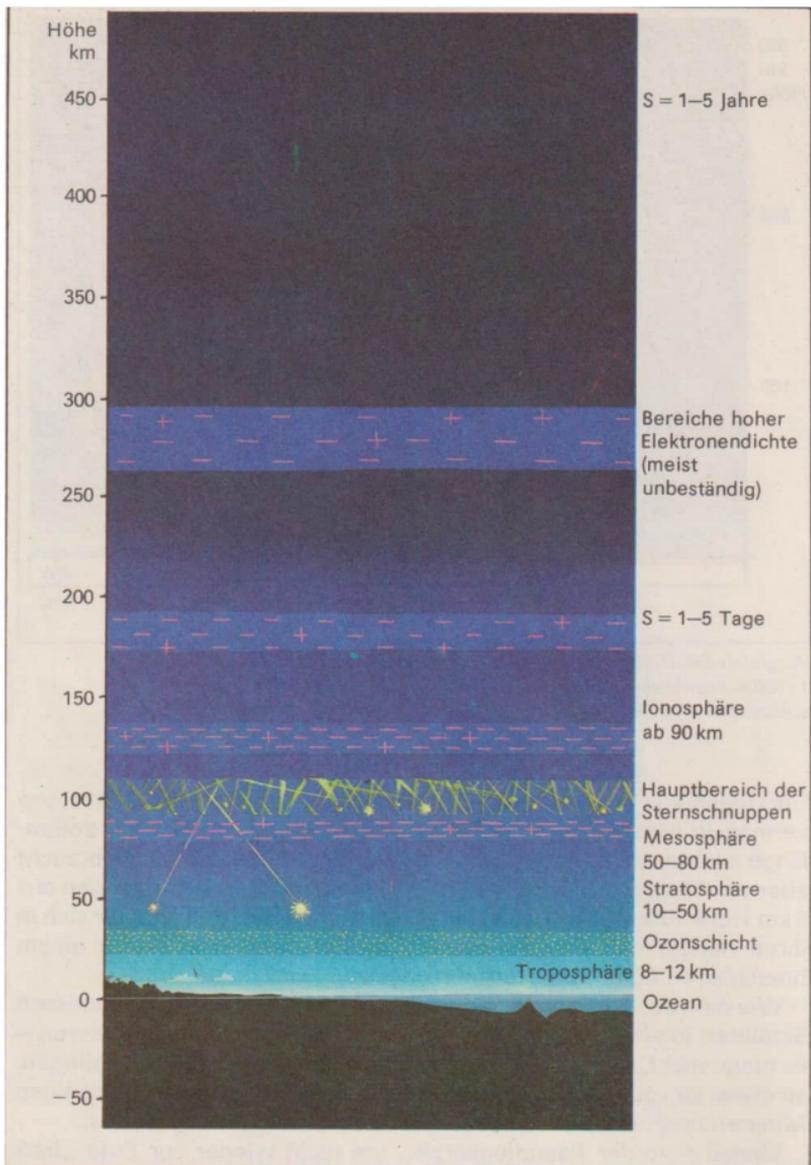


Vergleich der Größenordnungen von Satelliten- und Luftbild
 1 : 900 = Anzahl der benötigten Aufnahmen für gleichgroße Gelände-
 ausschnitte

Überlegen wir doch einmal: Ein Satellitenfoto aus etwa 400 km Höhe vermag in einem Bild eine Fläche von etwa $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ Seitenlänge noch gut zu erfassen. Das sind $40\,000 \text{ km}^2$. Für diese Fläche braucht aber ein Flugzeug, das Fotos unter gleichen Kamerabedingungen aus 8 km Höhe macht, etwa 2500 Einzelaufnahmen, die erst jede für sich in ihren Randpartien entzerrt werden müssen, ehe man sie zu einem brauchbaren Fotomosaik zusammensetzen kann.

Wie dem auch sei, wollte man der zahlreicheren Details wegen einen Satelliten in einer Erdumlaufbahn von nur 100 km Höhe stationieren – es ginge nicht, und es wird auch der besten Technik niemals gelingen, so etwas zu vollbringen. Der Satellit wäre nämlich schon nach wenigen Minuten verglüht. Das hat seinen Grund in zwei Naturgesetzen.

Einmal muß der Raumflugkörper, um nicht wieder zur Erde „her-



unterzufallen“, eine Geschwindigkeit von fast 8 km in der Sekunde erhalten. Erst dann gleicht die Fliehkraft die Erdanziehung gerade so aus, daß er die Erde umkreisen kann.

Durchleitet nun aber ein Flugkörper – sei er künstlich geschaffen oder kosmischer Herkunft – die irdische Atmosphäre mit dermaßen hoher Geschwindigkeit, dann wird durch die Reibung der Luftmoleküle die Oberfläche des Festkörpers glühend heiß, und in der äußersten Zone der Reibung verdampft sogar das Material. Eben aus diesem Grund verglühen täglich unzählige Kometenteilchen, vieltausendfach die Spur der Sternschnuppen hinterlassend, in Höhen zwischen 80 und 120 km.

Zwar hat sich die Dichte der irdischen Atmosphäre in 100 km Höhe bereits auf etwas weniger als ein Millionstel ihres Werts an der Erdoberfläche verringert, doch das ist immer noch mindestens zehnmals zuviel, soll das Verglühen verhindert werden. Und selbst ein Milliardstel der normalen Luftdichte am Erdboden, wie es in etwa 150 bis 160 km Höhe herrscht, übt noch eine so starke Bremswirkung auf einen Satelliten aus, daß nur Stunden oder wenige Tage bis zu seinem Absturz zur Erde in immer steiler werdendem Bogen vergehen. Erst im Bereich von annähernd 200 km Höhe steigt die Lebensfähigkeit eines Satelliten auf mehrere Tage oder Wochen. Wir können das auch so ausdrücken: Der vergleichsweise geringen Sinkgeschwindigkeit eines Satelliten in 200 km Höhe von etwa 5 cm/s steht in 120 km Höhe schon eine solche von 120 cm/s – also ungefähr das Fünfundzwanzigfache – gegenüber.

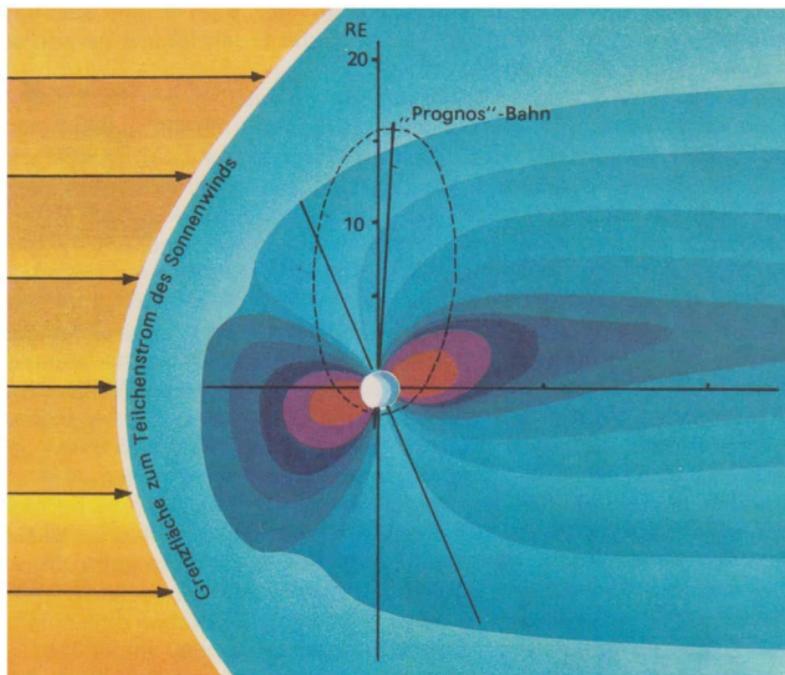
Deshalb hat man zum Beispiel viele sowjetische Satelliten der „Kosmos“-Serie oder „Sojus“-Raumfahrzeuge, die als Vorstufe verbesserter, bemannter Weltraumstationen erprobt wurden, nur in Höhen knapp über 200 km befördert, da für die beabsichtigten Experimente Beobachtungszeiten von einigen Wochen ausreichten.

Dagegen wird für Satelliten in Höhen ab etwa 300 km die Lebensdauer bereits nach Jahren bemessen. So kann ein Raumflugkörper in 500 km Höhe schon rund 10 Jahre lang ohne weiteren Antrieb die Erde umkreisen. Seine Fallgeschwindigkeit läge nämlich in der Anfangsphase bei weniger als 0,01 cm/s.

Natürlich hängt die exakte Lebensdauer des Satelliten auch noch sehr von seinem Profil ab, also von dem Verhältnis zwischen Masse und Oberfläche; und außerdem bewegen sich diese Raumflugkörper meist

Vertikalgliederung der irdischen Atmosphäre

S = mittlere Satellitenaufenthaltsdauer (bis Bremsung durch Atmosphäre zum Absturz führt)



Querschnitt durch die Magnetosphäre

RE = Radien der Erde

 Strahlungsgürtel

 Magnetosphäre

gar nicht auf idealen Kreisbahnen, sondern ihr Abstand von der Erdoberfläche schwankt um viele Kilometer. Bei einigen Satelliten, die speziell für die Erforschung der hohen Erdatmosphäre eingesetzt sind, kann der Unterschied zwischen dem Apogäum, dem erdfernten Punkt der Bahn, und dem Perigäum, dem der Erde am nächsten gelegenen Punkt, sogar viele hundert, ja über tausend Kilometer betragen. So schwankt die Bahnhöhe der „Interkosmos“-Satelliten, an deren Instrumentenausrüstung auch die DDR und viele andere sozialistische Staaten mitgearbeitet haben, sehr oft zwischen 200 und 1 200 km.

Diese Zusammenhänge machen verständlich, daß es für langlebige

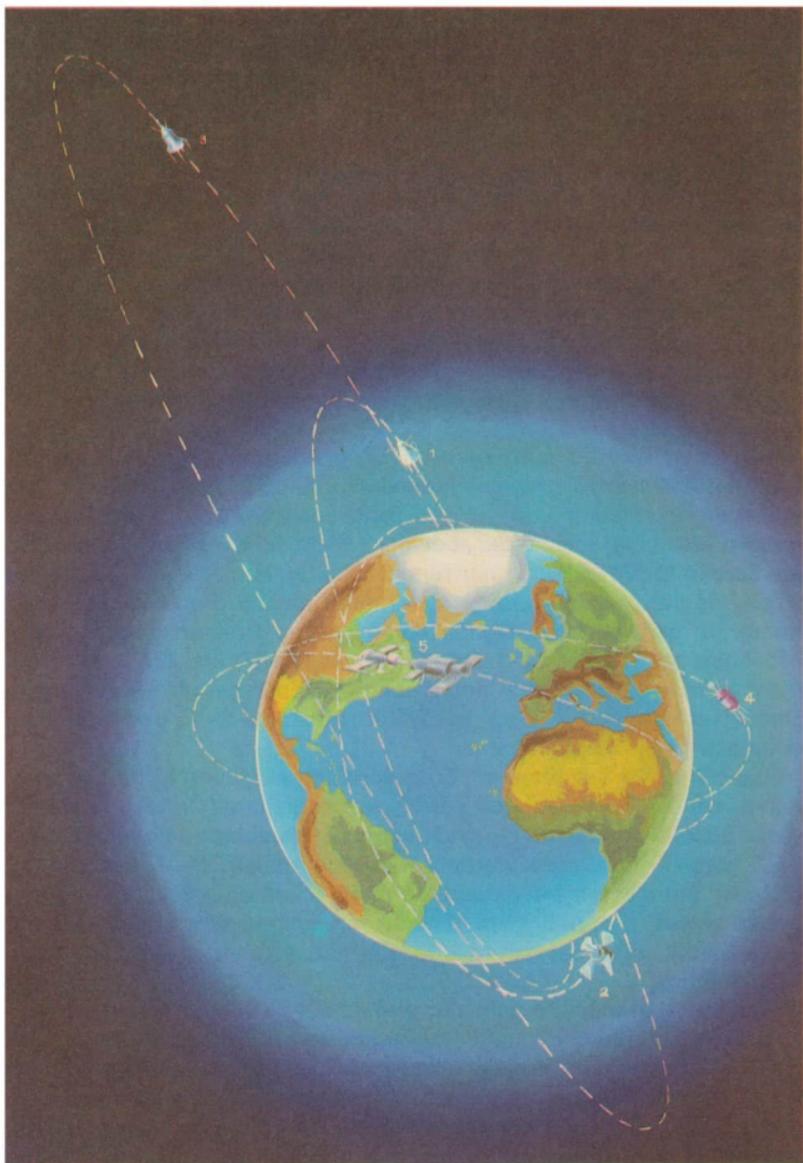
Satelliten eine Art Mindestabstand von der Erdoberfläche gibt und daß man andererseits bestrebt ist, eine kosmische Station nicht allzu hoch darüber ihre Bahn ziehen zu lassen, um möglichst detailliertes Beobachtungsmaterial gewinnen zu können.

In der Atmosphäre besteht jedoch neben einer nicht unterschreitbaren Basis für die bemannte Raumfahrt auch eine Obergrenze, weil nämlich ab Höhen von 1 000 bis 1 500 km bald die Strahlungsintensität auf eine für den Menschen schädliche Dosis anwächst. Schuld daran, daß ein Strahlungsgürtel die Erde umgibt, ist ihr Magnetfeld, das elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen und Protonen, die hauptsächlich von der Sonne stammen, einfängt. Sie folgen den Kraftlinien des erdmagnetischen Felds von Pol zu Pol und können, da die Wandungen des Raumschiffs keinen vollständigen Schutz gewähren, bei den Kosmonauten durchaus gesundheitschädigende Trefferwirkungen erzielen.

Versetzen wir uns nun wieder in unsere Raumstation. Bekanntlich wächst die Umlaufzeit mit zunehmendem Erdabstand des Satelliten. Bei Höhenunterschieden von einigen zehn oder wenigen hundert Kilometern je Umlauf macht das aber noch nicht sehr viel aus. So braucht ein Satellit in 571 km Höhe nur rund 6 Minuten länger als der in 277 km Höhe, der in genau 1 Stunde 30 Minuten einmal die Erde umkreist. Immerhin bedeutet das täglich einen ganzen Umlauf mehr für den erdnäheren Satelliten. Wir haben die Höhen von 571 und 277 km nämlich nicht zufällig ausgewählt — entsprechen sie doch gerade ganzzahligen Umlaufverhältnissen je Tag. In 277 km Höhe sind es 16 und in 571 km demnach genau 15 Umläufe.

Besonders für Satelliten mit Erderkundungsaufgaben kommt es sehr darauf an, daß die jeweiligen Territorien zu gleichen Zeiten und damit unter annähernd konstanten und besser vergleichbaren Beleuchtungsbedingungen überflogen werden. Natürlich braucht die Wiederholung gleicher Beleuchtungsbedingungen nicht schon am nächsten Tag gegeben zu sein. Es genügt ein Abstand von einigen Wochen, so daß die Auswahl günstiger Bahniveaus für die Fernerkundung der Erde nicht allzuklein ist.

Den bisher erwähnten erdnahen und schnellen Bahnen stehen die viel langsameren Erdumkreisungen bei stark vergrößerter Entfernung gegenüber. Unter den von der Praxis der Satellitenforschung bereits verwirklichten Beispielen soll uns hier ein bedeutungsvoller Sonderfall interessieren. So dauert der Umlauf genau einen Tag, wenn der Satellit annähernd in 36 000 km Höhe, das heißt in einem Abstand von fast dem



Dreifachen des Erddurchmessers, seine Bahn zieht. Umkreist ein solcher Raumflugkörper noch dazu in der Äquatorebene die Erde, dann hat der Beobachter in einer Bodenstation den Eindruck, als stehe der Satellit unbeweglich über ihm am Himmel. Derartige Raumflugkörper sind wegen ihres fixierten Standorts als Nachrichtensatelliten von großer Bedeutung. Sie gestatten es aber auch, über Monate oder Jahre hinweg das an die Tagesperioden oder Jahreszeiten gebundene dynamische Geschehen in der Erdatmosphäre, also die Witterungsabläufe, immer von demselben Ort aus zu verfolgen.

Dies wäre der denkbar idealste Aussichtspunkt für wahrhaft globale Betrachtungen über unserem Planeten. Ein Beobachter würde von der Warte eines Satelliten in einer geostationären Bahn, wie man diese 24-Stunden-Bahn auch nennt, die Erde etwa unter einem Blickwinkel von 18° tatsächlich als Ganzes erfassen können. 18° – das wäre noch immer das Sechsenddreißigfache des von der Erde aus zu sehenden Monddurchmessers und entspräche etwa der Betrachtung eines Erdglobus von 30 cm Durchmesser aus nur 90 cm Entfernung. Erst in einem Abstand dieser Größenordnung wird die Erde für die Raumfahrer wirklich überschaubar.

Aus einer bemannten Raumstation in der „Normaldistanz“ von etwa 300 km Höhe betrachtet, erscheint der Erdkörper unter einem Blickwinkel um 160° . Das heißt, die Erdoberfläche liegt noch so dicht vor unserer Nase, daß wir den Erdrand ringsum als echten Horizont empfinden. Ein Kosmonaut hat in solchen Höhen ja nur einen Erdausschnitt von kaum 20° im Gesichtsfeld; er kann also einen Komplex wie beispielsweise die Sahara, ja selbst die Arabische Halbinsel keineswegs mit einem einzigen Blick erfassen. Um so mehr wird er aber beeindruckt sein von dem Formen- und Farbenspiel, das da wie ein Film vor seinen Augen abläuft – ein Film, der viel Muße zur Betrachtung läßt; denn ein Satellit in 300 km hoher Erdumlaufbahn überfliegt in einer Minute durchschnittlich nur etwa 4 Breitengrade.

Typische Lage von Bahnen sowjetischer Satelliten zur Erderkundung und Erforschung des erdnahen Raums (Schema)

1 = „Sputnik 3“; 2 = „Proton“; 3 = „Elektron“; 4 = „Kosmos“; 5 = bemanntes Raumschiff zur Erderkundung

Fernerkundung – teuer, aber sehr nützlich

Wir leben in einer sozialistischen Gesellschaftsordnung, in der die Frage nach dem Nutzen einer Einrichtung oder gar eines wissenschaftlichen Arbeitsprogramms vom Rang der Raumfahrt für das Wohl des Menschen obenan steht. Wie ist das nun aber mit den allgemein als sehr teuer bekannten Satellitenforschungen? Die Antwort fällt nach mehr als 20 Jahren Weltraumerfahrung insgesamt eindeutig positiv aus. Doch der volle Nutzen solcher Unternehmungen war keineswegs immer gleich von der ersten Stunde an offensichtlich, und manche Arbeitsrichtung oder Disziplin brauchte mehr als ein Jahrzehnt, bis sich die Kosten an Material und Geld und nicht zuletzt an „Denkzeit“ der Wissenschaftler und Techniker, die in irgendeiner Weise darin investiert wurden, ausgezahlt hatten. So arbeiten die Wetter- oder Nachrichtensatelliten längst ökonomisch, ja sie sind aus unserem Alltag einfach nicht mehr wegzudenken. Dagegen müssen wir die Erderkundung aus der Satellitenumlaufbahn als einen ausgesprochenen Spätentwickler bezeichnen. Eine ihrer wichtigsten Methoden, die Fernerkundung mit Hilfe von Multispektralkameras, wurde sogar erst nach 15 Jahren Raumfahrt in größerem Umfang angewendet und machte danach noch eine lange Erprobungsphase durch, die bis jetzt nicht abgeschlossen ist.

Wir wollen hier nicht versuchen, die komplizierte Arbeitsweise der Multispektralfotografie streng wissenschaftlich bis ins einzelne zu erklären. Doch einige Prinzipien sollten wir kennenlernen, schon um die in steigender Anzahl veröffentlichten Aufnahmen besser verstehen zu können.

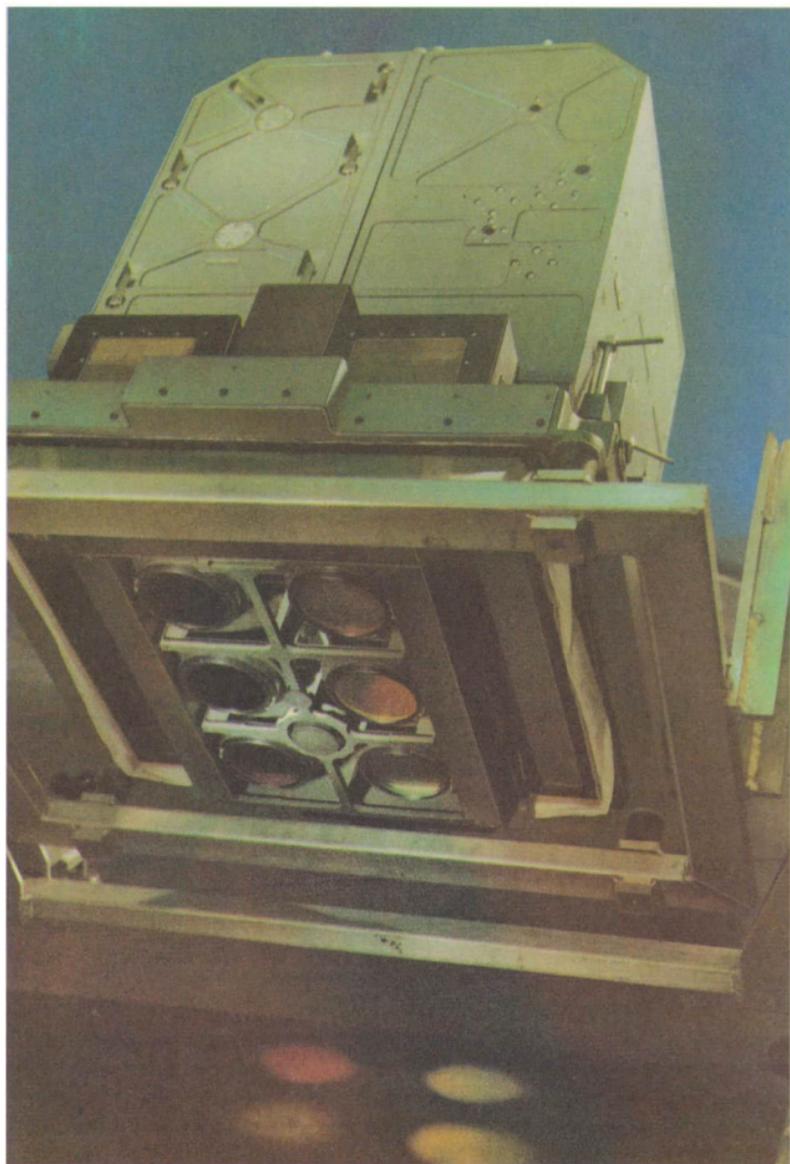
Grundsätzlich handelt es sich in jedem Fall, so auch bei der bekannten MKF-6-Kamera aus dem VEB Carl Zeiss Jena, um die Parallelschaltung mehrerer Kameras, deren Objektive sehr präzise eingestellt sein und deren Verschlüsse selbst in der Größenordnung von Millisekunden genau synchron (griech. synchron = gleichzeitig, übereinstimmend) arbeiten müssen. Manchmal sind es 4 Objektive, bei der Zeiss-Multispektralkamera 6, und zuweilen werden bis zu 9 solcher Objektive in einem einzigen, recht unförmig wirkenden Kameragehäuse auf die Erde gerichtet. Es geht darum, den gleichen Bildausschnitt synchron, aber nach getrennten Wellenlängenbereichen aufzunehmen. Durch vorgeschaltete Filter läßt sich ja der Empfangsbereich der Schwarzweißfilme stark einengen und liegt dann zum Beispiel nur bei Grün, Gelb oder Rot oder gar fast ausschließlich im Infrarotbereich. Andererseits



Flugleitzentrum Kaliningrad bei Moskau; im Hintergrund Weltkarte mit Projektion der Bahnen von „Sojus 22“

kann man auch noch verschieden empfindliche Farbfilme in eine solche Kombination einbeziehen.

Diese vielfache oder multispektrale Auflösung des reflektierten Lichtbündels ermöglicht es uns, die verschiedenen Objekte an der Erdoberfläche, wie Gesteine, Gewässer, Vegetation oder technische Anlagen, weit besser zu erkennen. Statt wenig differenzierter Grautöne zeigen sich besonders im längerwelligen Bereich zum Infrarot hin teilweise recht eindrucksvolle Kontraste. Zu ihnen gehört zum Beispiel die Schwärze aller Wasserflächen oder durchnäster Stellen der landwirtschaftlichen Nutzflächen auf Reproduktionen solcher Aufnahmen, während das Grün der Vegetation ganz besonders hell wirkt, weil das



Chlorophyll in diesem Bereich sehr stark reflektiert. Um gerade diese aussagekräftigen Effekte aus dem für das menschliche Auge sonst nicht mehr sichtbaren Teil des Spektrums visuell erfäßbar zu machen, ist man dazu übergegangen, bei der farbigen Reproduktion solcher Aufnahmen durch eine künstliche Farbverschiebung das Grün als Rot wiederzugeben. Parallel dazu versetzt man auch die übrigen sichtbaren Farbtöne in der Wiedergabe zum kürzeren Wellenbereich hin, so daß aus Rot Gelb und aus gelblich-braunen Farbtönen anorganischer Substanzen eine bläuliche Tönung wird.

Inzwischen hat man es gelernt, mit Hilfe geeigneter Empfängeranlagen sogar jene noch längerwellige Infrarotstrahlung auszuwerten, für die sich Filme nicht mehr sensibilisieren (empfindlich machen) lassen und die auch durch keine Glasoptik mehr geht. Dabei übersetzt ein spezielles Instrument (Detektor) die Intensität der Infrarotstrahlung jedes Bildpunkts in ein elektrisches Signal, das verstärkt und schließlich in ein Lichtsignal umgewandelt wird. Dieses läßt sich auf Film aufzeichnen, so daß ein Infrarotbild der Landschaft entsteht. Solche Satellitenbilder – vom Scanner-System (engl. scan = Abtastung), wie diese Strahlen-Zeilen-Abtaster auch heißen, aufgenommen – erscheinen uns eben wegen ihres Zeilenaufbaus wie Fernsehaufnahmen.

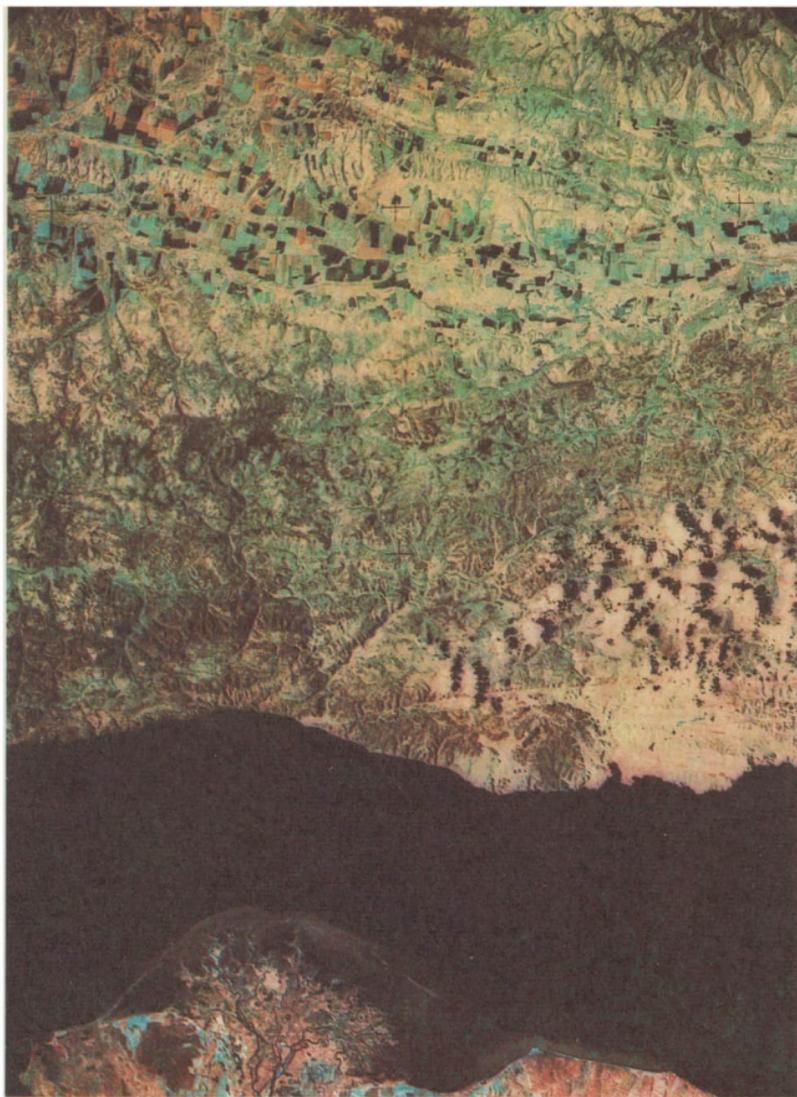
Das System ist natürlich im visuell erfäßbaren, optischen Bereich des Spektrums gleichfalls anwendungsfähig, und es lassen sich ebenso wieder verschiedene spektrale Filterauszüge von Scanner-Geländeaufnahmen zu neuen Schwarzweiß- oder Farbkompositionen verarbeiten.

Die Ergebnisse, die mit derartigen Satellitenaufnahmen auf dem weiten Arbeits- und Forschungsfeld der Geowissenschaften erreicht wurden, sind auch der breiten Öffentlichkeit nicht mehr unbekannt, seit im Rahmen eines gemeinsamen Interkosmos-Experiments der UdSSR und der DDR die Multispektralkamera MKF 6 aus der Flugbahn von „Sojus 22“ 1976 rund 2000 Aufnahmen hoher Qualität von der Erdoberfläche lieferte. Diese Forschungsarbeiten wurden bereits 1978 mit „Salut 6“ erfolgreich fortgesetzt.

Den stärksten Eindruck machten wohl Meldungen, daß sich mit Hilfe solcher Aufnahmen sogar Ernteeinschätzungen vornehmen oder neue

Multispektralkamera MKF 6

Deutlich sind die Farbfilter vor den 6 Kameraobjektiven zu sehen. Hinter den beiden schwärzlich erscheinenden Filterflächen befinden sich Infrarotfilme.



*Südliches Baikalseegebiet, Mitte September 1976 mit der MKF 6
von „Sojus 22“ aus fotografiert*

Lagerstätten, zum Beispiel von Erdöl und Erdgas, entdecken ließen. Jedoch darf man sich diesen Vorgang der Entdeckung nicht allzu vereinfacht vorstellen. Der Geologe sieht auf den Satellitenbildern ja nicht den Inhalt einer Lagerstätte, also etwa das Erdöl oder das gesuchte Erz, sondern vielmehr eigenartige Strukturen in der Erdoberfläche, die ihm Lagerstätten anzeigen können. So sind Erdöllagerstätten oft an gewölbte, weitspannige Verbiegungen der Erdkruste gebunden, während viele Erze dagegen in langen Gangadern nahe großer und kleiner Bruchstufen der Kontinente vorkommen. Aber nicht jede dieser entdeckten Strukturen muß dann auch tatsächlich eine Lagerstätte enthalten. Das nachzuweisen bleibt den noch immer unersetzbaren Bodenuntersuchungen vorbehalten.

Als Beispiel für eine im Satellitenbild gut erkennbare Bruchstufe kann die MKF-6-Aufnahme vom Baikalsee dienen. Wir sehen am Nordufer des Sees gegenüber der Selenga-Mündung, also etwa ab Bildmitte, in nordöstlicher Richtung deutlich eine Störungslinie, die sich quer über zahlreiche Täler hinweg fortsetzt und die sich durch ihren parallelen Verlauf auch klar als Fortsetzung des südwestlich anschließenden Steilufers des Baikalsees zu erkennen gibt. Die sowjetischen Geologen haben diese Störungslinie, an der Schollenverschiebungen von mehreren hundert Metern Höhenunterschied stattfanden, wegen ihrer charakteristischen Lage im nördlichen Küstengebirge des Baikalsees als großen Primorski-Bruch bezeichnet. Wir erhalten damit Einblick in eine charakteristische Erscheinung des südsibirischen Berglands, und heute ist klar, daß der über 600 km lange Baikalsee seine Entstehung überhaupt erst der wiederholten grabenartigen Einsenkung der Erdkruste an einer Vielzahl solcher Brüche verdankt.

Eine ganz andere Art des Nutzens kann zudem aus unserem zweiten Beispiel, einer Multispektralaufnahme vom Tienschan-Pamir-Gebiet im Süden der Sowjetunion, gezogen werden. Hier hat die eingehendere Bildauswertung schon sehr bald fast 80 bisher auf den Kartenunterlagen nicht dargestellte Gletscher erkennen lassen. Für ein Trockengebiet wie diesen Südtel der Sowjetunion in der Nachbarschaft der Wüste Karakum besitzt ja die genaue Erfassung der als Eis in den Gletschern gebundenen Wasserreserven große Bedeutung. Außerdem befinden wir uns mit dem Bildausschnitt im Zuflußgebiet des großen Staubeckens vom Nurek-Wasserkraftwerk, wo in Zukunft noch weitere Sperrmauern errichtet werden sollen. Hier können die aus den Satellitenfotos ablesbaren geologischen Grobstrukturen helfen, den richtigen Standort für solche Großbauten zu finden.



***Pamir-Alai-Gebirge, ebenfalls mit der Multispektralkamera fotografiert
Das Grün der Plantagenkulturen erscheint hier in der Falschfarbendarstellung
rotbraun. Die Hochgebirgsregionen über 4000m tragen Schnee und Eis.***

In der DDR, wo eine jahrhundertealte geographisch-geologische Forschungstradition bereits eine sehr ins einzelne gehende Vorarbeit geleistet hat, vermögen Satellitenaufnahmen vor allem der sogenannten Geoprozeßforschung zu dienen — zum Beispiel der Erforschung von jahreszeitlich bedingten oder durch die Wirtschaftstätigkeit des Menschen hervorgerufenen Landschaftsveränderungen.

In weltumfassender Sicht aber erweitert sich die Palette der Nutz- anwendungen von Satellitenaufnahmen erheblich. Sind doch viele Gebiete der Erde, vor allem die der dünner besiedelten Trockengürtel, bis jetzt geowissenschaftlich noch ungenügend erforscht. Oft fehlt sogar eine ausreichende kartographische Grundlage zur Fixierung von Ergebnissen moderner Strukturforschung.

Die globale Betrachtungsweise führt uns aber wieder an die Probleme der kosmischen Geologie heran, die zum großen Teil eben nur mit Hilfe der Fernerkundungsverfahren über Satelliten gelöst werden können.

Wie schon gesagt, bezeichnen wir als kosmische Geologie nicht nur die direkte Erforschung unseres Planeten aus Erdumlaufbahnen, sondern sehen als ihren wesentlichen Bestandteil auch das vergleichende Studium unserer benachbarten Himmelskörper an. Ein ganz neues und vor allem viel weniger hypothetisches Bild läßt sich heute von unserem Planetensystem zeichnen. Mit dem dritten Jahrzehnt der Raumfahrt reifte eine Zeit heran, die es in zunehmendem Maß erlaubt, die Entwicklung unseres Planeten über die Jahrmilliarden, bis er zur Wiege der Menschheit wurde, nicht nur spekulativ, sondern nach wissenschaftlichen Daten und Erkenntnissen zu verfolgen.

Es wird vorteilhaft sein, wenn wir hier zunächst die vergänglichsten und am schnellsten ablaufenden Geoprozesse sozusagen mit Satellitenunterstützung unter die Lupe nehmen. Dazu gehören beispielsweise Veränderungen des Klimas, Erscheinungen des Vulkanismus oder die Erdbeben und ihre Folgen. Dann können wir uns, besser gerüstet, den komplizierten Bewegungen der Erdkruste mit ihren Kontinentalverschiebungen zuwenden. Und warum diese Erdhaut bis heute noch nicht zur Ruhe kam und welchen Gesetzen die Kontinente bei ihren Wanderungen gehorchen — gerade das wollen wir mit neuen Methoden, durch Vergleich mit den benachbarten Himmelskörpern, untersuchen.

Rätsel der Eiszeit



Leben wir in einer Eiszeit?

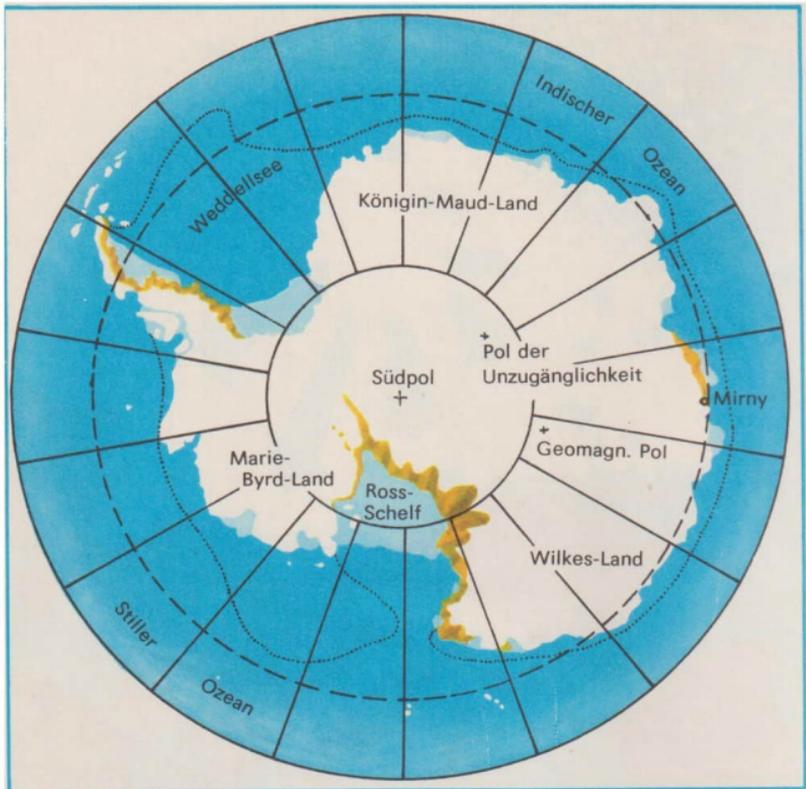
Der Pulsschlag der Erde ist höchst unregelmäßig, und verglichen mit einem Menschenalter, lassen sich nur recht langatmige Perioden feststellen. Da werden Klimazyklen vermutet, die 11 oder 35 Jahre, andere, die 80 oder 120 Jahre oder sogar solche, die knapp ein Jahrtausend dauern sollen. Doch es hat sich bisher in keinem Fall mit Sicherheit klären lassen, ob hier tatsächlich regelmäßige Schwankungen vorliegen. Daß aber die große Eiszeit der Erde von über 1 Million Jahre Gesamtdauer lange Pausen aufwies, die man als Zwischeneiszeiten bezeichnet und die oft über 10 000 Jahre anhielten – daran gibt es keinen Zweifel. Wir wissen nur immer noch nicht genau, wie viele große Klimaschwankungen hierbei wirklich zu unterscheiden sind. Früher war man ziemlich sicher, daß es sich lediglich um 3 oder 4 handeln könnte – je nachdem, ob man mehr den Zeugnissen aus Nordeuropa oder denen der Alpen den Vorrang gab. Als sich aber die globale Betrachtungsweise mehr und mehr durchsetzte, wurden weitere Großklimaschwankungen erfaßbar. Bis zu 7 solcher warm- und kaltzeitlichen Wechsel haben die Wissenschaftler bereits festgestellt; einige hiervon liegen gewiß vor jener Zeit, da sich die ersten großen Inlandeismassen aus Skandinavien über die Südküste der Ostsee schoben.

Für die Klima- und Wetterforschungen in den arktischen und antarktischen Räumen der Erde, in denen noch immer Eiszeitbedingungen herrschen, hat sich der Satelliteneinsatz schon lange besonders bewährt. Wegen seiner Unzugänglichkeit werden Expeditionen in das Reich des ewigen Eises bis heute als Pionierleistungen angesehen und sind mit Gefahren verbunden. Kein Wunder also, daß unter den harten Bedingungen in polaren Breiten die kartographischen und geologischen Studien noch längst nicht abgeschlossen sind! Im Gegenteil, wir haben ja gerade die große Hoffnung, daß sich unter dem Eis unentdeckte Lagerstätten, vielleicht sogar schon jetzt bauwürdige Vorkommen von Erdöl und Erdgas sowie von Kohle verbergen.



*Europa während der Zeit der stärksten Vereisung
Pfeile = Hauptrichtungen des Eistransports*

Als wichtiger fossiler (versteinerter) Klimazeuge interessiert uns hier besonders die Kohle. Die ersten Meldungen über Kohlenfunde auf Spitzbergen und Grönland liegen nun bereits fast ein Jahrhundert zurück und Funde in der Antarktis auch schon mehrere Jahrzehnte. Die Entstehung der Kohle setzt aber ein ganz anderes Klima voraus, als jetzt in diesen Gebieten herrscht. Tropisch warm und feucht muß es damals im Sumpfland der heutigen Kohlenlagerstätten gewesen sein. In Grön-



Übersichtskarte der Antarktis

land gilt das zum Beispiel für eine Zeit, die 300 bis 400 Millionen Jahre zurückliegt, und für ein Gebiet, das wir gegenwärtig bei 70° Nord finden. Wir kennen aus dem hohen Norden jedoch auch noch viel jüngere Pflanzenreste aus eigentlich wärmeren Breiten. Sie stammen aus dem Tertiär und haben ein Alter von nur 50 Millionen Jahren, wenn nicht weniger.

Wann aber wurde es hier wieder so kalt, daß wir vom Beginn der letzten großen Eiszeit der Erde sprechen können? Mit dieser hochinteressanten Frage bringt man jeden gewissenhaften Geologen in

Verlegenheit. Wer selbst jahrelang an chronologischen Aufgaben für die Geologie mitgearbeitet hat, der weiß, wie schwer den versteinerten Zeugen früheren Lebens die gewünschten genauen Aussagen zu entreißen sind. Wenn die Antwort nicht direkt zu erhalten ist, wenden wir ein bewährtes Mittel an: Wir kreisen das Problem ein.

In dem als gut erforscht geltenden europäischen Raum finden sich Eiszeitspuren, oder sagen wir vorsichtiger Hinweise auf Kaltzeiten, aus einer Periode, die 1 bis 1,5 Millionen Jahre zurückliegt. Zuvor hatte das Eis unseren Kontinent noch nicht erreicht. Aber das verhält sich ja heute nicht anders, und doch tragen die Pole der Erde riesige Eiskappen. Ob es wohl immer so war, daß wenigstens etwas Eis auf den Polen verblieb? Oder gab es erdgeschichtlich vielleicht sogar lange Zeiten mit ganz eisfreien Polen? Und wann endet überhaupt eine Eiszeit? Man hat berechnet, daß der Meeresspiegel während der maximalen Gletschervorstöße durch das im Eis gebundene Wasser im Vergleich zum heutigen Stand um 100 bis 120m tiefer lag, daß er aber bei total abgeschmolzenen Polarregionen noch um weitere 60 bis 80 m ansteigen müßte. Wir hätten also gerade erst eine Art glazialer (lat. *glacies* = Eis) Halbzeit hinter uns, wenn es tatsächlich eine so einfache Beziehung zwischen Eismasse und Kälteperiode gäbe.

Blicken wir auf der Suche nach weiter zurückliegenden Kälteperioden in die erdgeschichtliche Vergangenheit, dann erschrecken wir zunächst vor der überaus langen Dauer des großen Vorläufers der gegenwartsnahen, quartären Vereisung am Ende des Paläozoikums. Sie soll nicht bloß 1 bis 2 Millionen Jahre, sondern 20 bis 30 Millionen Jahre gewährt haben. Wäre das der Normalfall – und warum eigentlich nicht? –, dann befänden wir uns jetzt eher in der Anfangsphase einer Großvereisungsperiode der Erde als an ihrem Ende. Die Dauer der bisherigen Zwischenwarmzeiten spricht keineswegs dagegen. Bedenken wir, daß vor 18 000 bis 20 000 Jahren, während der letzten Höhepunkte der sogenannten Weichselvereisung, noch beträchtliche Teile Mecklenburgs unter einem kilometermächtigen Eispanzer begraben lagen, daß andererseits die Zwischenwarmzeit zuvor aber auf nur 10 000 bis 15 000 Jahre veranschlagt wird und es vorübergehend damals sogar wärmer war als heute, dann leuchtet uns die Vorstellung, mitten in einer großen Kälteperiode des Erdklimas zu stecken, schon eher ein.

Es mag viele überraschen, aber neuerdings sollen Bohrkerne vom Boden antarktischer Gewässer unter anderem wegen der darin enthaltenen Schalen und Skelette fossiler Kleinlebewesen den Wissenschaftlern nachzuweisen gestattet haben, daß eine antarktische Ver-

eisierung bereits vor 20, wenn nicht gar vor 30 Millionen Jahren bestand. Also befinden wir uns vielleicht doch schon wieder am Ende einer Großvereisungsperiode der Erde? Wohl kaum. Es gibt heute weltweit so viele andersartige Klimazeugen aus dieser durch die Bohrkerne belegten Zeit des Tertiärs, daß wir sie am globalen Maßstab gemessen durchaus als warm bezeichnen können. Viel eher müssen wir die frühen antarktischen Kältezeugen als Hinweis darauf werten, daß eisfreie Pole – wenn sie überhaupt vorkamen – nur eine seltene Erscheinung im Verlauf der Erdgeschichte waren.

Klimastürze

Wenn wie Ende der sechziger Jahre nach vieljähriger Pause die ersten imposanten Eisberge wieder in den nördlichen Fischfanggründen nahe Island auftauchen oder sich anschicken, die Schifffahrtsrouten von Europa nach Amerika südlich Neufundlands vermehrt zu kreuzen, dann kommt prompt die Frage, ob eine neue Eiszeit drohe.

Allerdings müssen wir zugestehen, daß die Abkühlungserscheinungen des letzten Jahrzehnts Ausmaße angenommen haben, wie sie lange nicht zu beobachten waren. So erreichte die Häufigkeit des polaren Treibeises vor Island schon um 1968 Werte, die im gesamten Jahrhundert nicht verzeichnet wurden. Ferner stellte die Menge von 1587 Eisbergen, die vom 19. Februar bis zum 4. September 1972 die Neufundlandbank überquerten, das absolute Maximum seit Meßbeginn im Jahr 1900 dar. Diese Zahl läßt sich wohl erst richtig einschätzen, wenn wir berücksichtigen, daß in den 25 Jahren nach dem zweiten Weltkrieg das Mittel der driftenden Eisberge, die jährlich den 48. Breitengrad der Neufundlandbank entlang der nordamerikanischen Küste nach Süden passierten, bei 210 lag. Daß hierdurch nicht nur die europäische Fischerei in diesem von ihr so bevorzugten Meeresgebiet beeinträchtigt wird, sondern daß auch eine nicht zu unterschätzende Gefahr für die Transatlantik-Schifffahrt davon ausgeht, ist wohl zumindest all denen bewußt, die sich an die mehrfach verfilmte „Titanic“-Katastrophe erinnern. Das damals größte Passagierschiff der Welt rammte auf seiner Jungfernfahrt, aus England kommend, am 14. April 1912 um Mitternacht bei 41° 46' Nord – das ist die Breitenlage New Yorks oder Roms – einen solchen unerwartet weit nach Süden vorgestoßenen Eisberg. Die „Titanic“ sank innerhalb von 2 1/2 Stunden, und nur 661 von 2224 Pas-

sagieren konnten gerettet werden. Diesem erschütternden Ereignis verdanken wir die alsbaldige Gründung einer ständigen Eiswacht, die seitdem entsprechend einem internationalen Abkommen die USA dazu verpflichtet, die Eisfracht des Labradorstroms vor der nordamerikanischen Küste genau zu registrieren. Der Kontrolldienst, zunächst durch Schiffe vorgenommen, wurde mit dem Voranschreiten der Technik mehr und mehr durch Flugzeuge ausgeführt, wozu sich in jüngster Zeit nun die Satellitenbeobachtung mit wesentlichen Beiträgen gesellt hat.

Es ist schon ein tiefer, unsere Vorstellung vom wahren Charakter der Eisdrift gewaltig belebender Eindruck, den uns eine solche Satellitenaufnahme verschafft. Besonders plastisch wirkt das Strömungsbild vor den Küsten Grönlands. Man sieht nun einmal tatsächlich, nicht nur im Schema, das Gedränge der Eisschollen, nimmt wahr — wohl beim ersten Blick nicht ohne Erstaunen —, daß sie besonders im hohen Norden Durchmesser von 50 km und mehr haben können. Deutlich läßt sich der allgemeine Volumenschwund im Verlauf ihrer Südwärtsdrift erkennen. Aber die Eisfelder des Ostgrönland- wie des Labradorstroms zeigen auch an ihren Flanken ähnliche Auflösungs- und Schwunderscheinungen. Ja, sogar die randliche Verwirbelung mit dem wärmeren Atlantikwasser des Golfstroms wurde im Bild eingefangen.

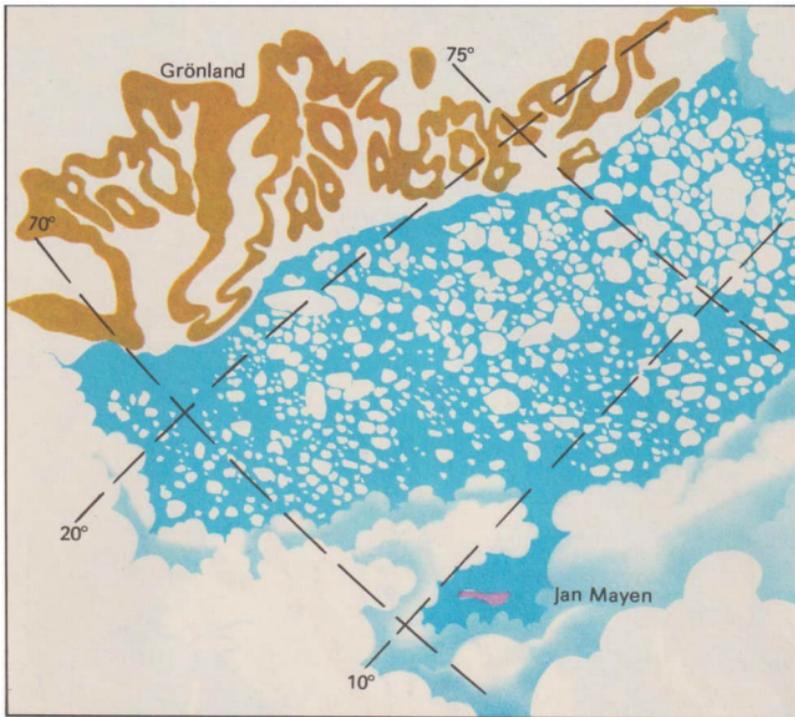
Wir sehen ferner, wie in der Davisstraße eine südliche Meeresströmung die Westküste Grönlands eisfrei hält, was sich auch deutlich an der Existenz von Siedlungen bis hinauf nach Thule bei 78° Nord zeigt. Charakteristisch für die Eisfelder sind die zahlreichen Nebelbänke nahe der Meeresoberfläche, die von den kalten Wassermassen, die sie begleiten, immer wieder erzeugt werden.

Der Satelliteneinsatz beschränkt sich aber nicht auf die Kontrolle der Eisdrift des grönländischen Raums, sondern erfaßt die gesamte Polarregion. Wir verdanken schon dem ersten Jahrzehnt dieser Polkappenstudien aus dem All ganz neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge des dynamischen Geschehens auch in den unzugänglichsten Teilen unserer irdischen Kälteverratskammern. So wird es bald nicht mehr nötig sein, daß sich mutige Forscher auf driftenden Eisschollen zusammen mit ihren Stationen einfrieren lassen, um die Meeresströmungen der Arktis bis in Polnähe zu enträtseln. Seit der berühmten Drift *Iwan Papanins*, die, im Mai 1937 direkt vom Nordpol aus gestartet, als erstaunlich schnelle Fahrt bereits im Februar 1938 in Höhe des 70. Breitengrads vor Ostgrönland endete, und seit der nicht minder beeindruckenden, am 23. Oktober 1937 begonnenen Drift des Eis-

meerdampfers „Georgi Sedow“ von den Neusibirischen Inseln bis in die Nähe Spitzbergens, das im Januar 1940 fast erreicht wurde, wußten wir wenigstens in groben Zügen, daß den zentralen Teil der Arktis eine durchgehende kalte Meeresströmung beherrscht, die ihre Wasserzufuhr aus der Beringstraße erhält und dann unter dem Nordpol hindurch als Ostgrönlandstrom in den Nordatlantik einmündet. Dieser Durch-

Eisschollendrift im Ostgrönlandstrom, am 25. Mai 1977 von dem sowjetischen Wettersatelliten „Meteor II-2“ aufgenommen





Erläuterungsskizze zur „Meteor“-Aufnahme



Schelfeisgrenze



Wolkenbedeckung (Schema)

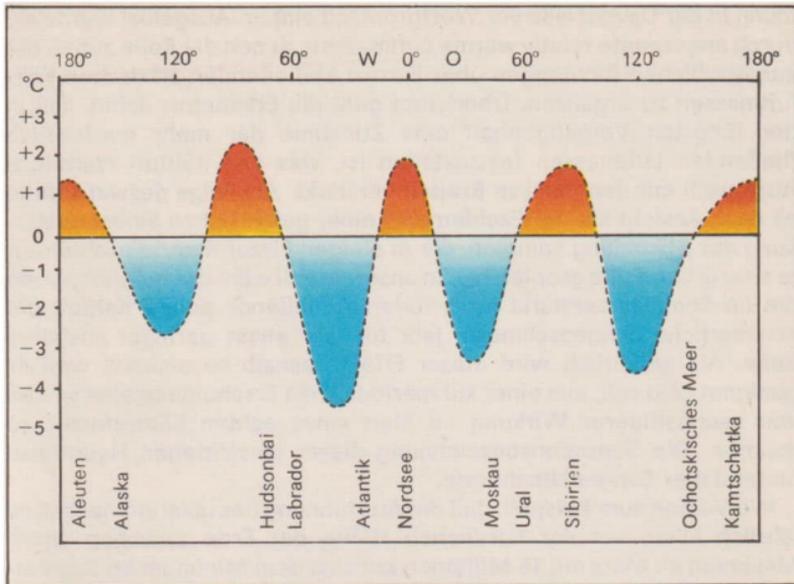


Eisschollen

gangsströmung steht eine großräumige Kreislaufbewegung polarer Wassermassen im Antihurzeigersinn in der Beaufort-See vor der Küste Alaskas und der kanadischen Inselwelt gegenüber. Sie wurde vor dem Satelliteneinsatz von sowjetischen und nordamerikanischen Stationen gemeinsam erforscht. Eine der letzten sowjetischen Stationen – als „Nordpol 22“ bezeichnet – meldete, daß sie schon im Anfangsstadium ihrer „Reise“ eine Strecke von 2350 km innerhalb eines einzigen Jahrs (1974) zurücklegen konnte.

Über Satellit lassen sich derartige Standortbestimmungen auch von





Abweichungen der Lufttemperaturen vom Mittelwert gleichen sich global aus (Beispiel nördliche Halbkugel im Juni 1976).

unbemannten Stationen aus durchführen. Man kann so billiger eine größere Zahl von Stationen kontrollieren. Für den Bereich des offenen Meers werden ähnlich abfragbare, treibende Meßbojen eingesetzt, was sich besonders zur Erforschung der antarktischen Gewässer, aber auch zur Verfolgung küstengefährdender Öllachen, die bei Tankerhavarien entstanden sind, als sehr vorteilhaft erwiesen hat. Mit Hilfe der Satelliten ließ sich endlich belegen, daß örtlichen Abkühlungsphasen, zum Beispiel im nordeuropäisch-arktischen Bereich, stets eine Erwärmung an anderem Ort auf gleicher Breitenlage gegenübersteht. So ging mit dem Kältezentrum von 1970/71 beim Franz-Joseph-Land eine Erwär-

Routen von driftenden Stationen auf Eisschollen und von Forschungsschiffen in der Arktis

*T₁₋₃ = „Target“; N₁ = „Nordpol 1“; F = „Fram“; S = „Sedow“; P = Pol
Pfeile = Meeresströmungen*

mung in der Davisstraße vor Westgrönland einher. Ausgelöst wurde sie durch angesaugte relativ warme Luftmassen, denen die Rolle zufiel, die aus nördlichen Richtungen über Europa abfließenden arktischen Kaltluftmassen zu ergänzen. Überhaupt geht die Erkenntnis dahin, daß in der jüngsten Vergangenheit eine Zunahme der mehr nordsüdlich fließenden Luftmassen festzustellen ist, was den Kaltluft-Warmluft-Austausch mit den polaren Breiten verstärkt. Als Folge dessen könnte es nach Ansicht einiger Fachleute zu einer gefährlichen Selbstverstärkung der Abkühlung kommen, die in einigen Eiszeittheorien schon seit je eine große Rolle gespielt hat. In unserem Fall wäre das möglich, wenn die im Sommer verstärkt nach Süden abfließende polare Kaltluft die sommerliche Schneeschmelze Jahr für Jahr etwas geringer ausfallen ließe. Als gefährlich wird dieser Effekt deshalb bezeichnet, weil er geeignet sein soll, aus einer kurzperiodischen Erscheinung eine solche von nachhaltigerer Wirkung im Sinn eines echten Klimasturzes zu machen. Die Sensationsbezeichnung dieser umstrittenen Hypothese lautet daher Schneeblitztheorie.

Wir wissen zum Beispiel, daß die Ausdehnung des polaren Meereises jährlich allein auf der nördlichen Hälfte der Erde zwischen ihrem Maximum im März mit 16 Millionen km² und dem Minimum im September mit 8 Millionen km² schwankt. In der Gesamtbilanz aber, die sich erst heute mit Hilfe der Satelliten leicht ermitteln läßt und bei der noch die Schnee- und Eisbedeckung der Kontinente mit in die Rechnung einfließt, kommen wir auf eine durchschnittliche Jahresschwankung des Bestands an kalten, weißen Flächen der Nordhalbkugel in Höhe von 50 Millionen km². Dieser Wert ist abgeleitet aus 10 Millionen km² ständiger = minimaler Eisbedeckung und etwa 60 Millionen km² für das durchschnittliche Jahresmaximum, das auf unserer Hälfte der Erde Anfang Februar erreicht wird. Diesen Beträgen stehen 14 Millionen km² ständiges Eis der Antarktis sowie 20 Millionen km² zeitweilig vorhandenes Treibeis und Schnee in der weiteren Südpolarregion gegenüber. Da beide Pole zu entgegengesetzten Jahreshälften ihr Eismaximum haben, ergibt sich daraus für die maximale Gesamteisfläche der Erde etwa zur Jahreswende „nur“ der Wert von 80 Millionen km².

Diese Zeit ist aber auch die Phase des größten Reflexionsverlustes an solarer (lat. sol = Sonne) Strahlung. Weil nun unser Planet gegenwärtig auf seiner Bahn gerade kurz nach Neujahr der Sonne am nächsten steht, fallen jetzt und in den folgenden Jahrtausenden das Maximum der Einstrahlung und des Strahlungsverlustes so zusammen, daß der Gesamtverlust für die Erde besonders groß ist. Dies darf wirklich als

kritische, die Entstehung einer neuen Eiszeit fördernde Phase der Erde angesehen werden. Allerdings halten solche oder ähnliche Bedingungen schon mehr als ein Jahrtausend an, und wir müßten eigentlich einige Klimaänderungen zu verzeichnen haben, wenn die Hypothese als einzige Eiszeiterklärung zuträfe.

Eine gewisse Unbeständigkeit des gegenwärtigen irdischen Klimas wurde tatsächlich seit 1967 durch ganzjährige Schnee- und Eisflächenbestimmungen mit Hilfe von Satelliten festgestellt. Nach 4 Jahren mit relativ kleineren Schwankungen stieg 1971 der Betrag der mittleren jährlichen Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel plötzlich um 12 Prozent an und blieb bis 1973 etwa auf dieser Höhe, die mit ungefähr 37 Millionen km² als Jahresdurchschnitt rund 4 Millionen km² über dem zuvor ermittelten Durchschnittswert lag. Zu beobachten war dabei als wichtigstes Merkmal, daß die Schneedeckenerweiterung besonders stark die kontinentalen Hochgebirge ergriffen hatte, wo sie viel großflächiger als vorher den jeweils folgenden Sommer überdauerte. Daneben soll es aber, wie kritische Stimmen anmerken, vor allem der im Herbst um 10 bis 20 Tage früher einsetzende Neuschnee gewesen sein, der das Jahresmittel Anfang der siebziger Jahre so spürbar steigen ließ.

Wenn auf ungewöhnlich kalte Jahre doch wieder wärmere, oder sagen wir vorsichtiger schneeflächenärmere, folgen, wie das auch seit 1974 der Fall war, so liegt das wohl unter anderem daran, daß zur Entstehung einer Eiszeit eben mehr gehört als frühe Wintereinbrüche, die das Jahresmittel der Schneeflächen für die Statistik effektiv anheben. Eine neue Eiszeit haben wir erst dann zu fürchten, wenn sich der Eiszuwachs von Jahr zu Jahr addiert, wenn also auch über längere Zeiträume hinweg mehr Eis den heißen Sommer überdauert. Die Eisberge können ruhig, wie im Rekordjahr 1972, an Neufundland vorbei 400 km weiter nach Süden vorstoßen und den 40. Breitengrad erreichen — eine Eiszeit wird deshalb noch lange nicht geboren! 1972 war es eine Summe verschiedener Faktoren, die den Rekord zustande kommen ließ. Ein ungewöhnlich großer Eisvorrat, anhaltend günstiger Nordwestwind im Bereich des Labradorstroms und damit auch Untertemperaturen in diesem Meeresgebiet bewirkten in erster Linie den überdurchschnittlichen Abtransport. Kein Wunder jedoch, daß im Herbst des darauffolgenden Jahrs die Davisstraße von Treibeis wie leergefegt wirkte und auch die übrige Arktis auf Satellitenaufnahmen einen weit überdurchschnittlichen Anteil offener Wasserstellen erkennen ließ!

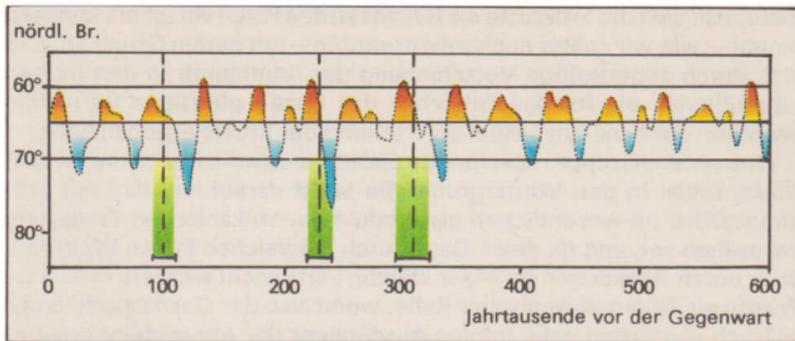
Hat die Eiszeit irdische oder kosmische Ursachen?

Um die Lösung des Eiszeiträtsels haben sich schon Generationen von Wissenschaftlern bemüht, und entsprechend umfangreich ist ihre Hinterlassenschaft an Theorien. Ohne die zwar manchmal recht phantasievollen, aber letztlich doch nicht ernst zu nehmenden Eintagsfliegen unter ihnen bliebe immer noch eine dreistellige Zahl zu nennen. Und wie in vielen anderen Fällen gilt wohl auch hier: Je mehr Theorien gleichzeitig über ein Problem kursieren, desto weiter sind wir im allgemeinen noch von seiner Lösung entfernt.

Grundsätzlich stehen sich im Meinungsstreit über die Hauptursache der Eiszeit zwei „feindliche“ Lager gegenüber. Die einen sehen als Auslöser kosmische Erscheinungen an, die von außen die Erde beeinflussen. Die andere Gruppe geht von innenbürtigen Kräften aus, sucht also die Ursache im entwicklungsgeschichtlichen Verhalten der Erde selbst.

Die erste Gruppe litt vor allem in der Vergangenheit – wohl nicht zuletzt infolge zu wenig bekannter Einzelheiten aus dem Kosmos – unter Faktenmangel und blieb lange Zeit in der Minderheit. Das darf aber auf keinen Fall mit einem Werturteil gleichgesetzt werden. Als eines der bekanntesten Argumente dieser Gruppe wird bis heute – wenn auch oft in etwas abgeänderter Form – die schon vor über 50 Jahren von dem serbischen Astronomen und Mathematiker *Milutin Milanković* (1879–1958) aufgestellte Strahlungskurve benutzt. Milanković schätzte die Auswirkungen ab, welche die sich im Lauf von Jahrtausenden allmählich ändernden Bahngrößen der Erde zusammen mit der ebenfalls veränderlichen Neigung der Rotationsachse auf das irdische Großklima haben könnten.

Andererseits stammt von dieser Gruppe auch eine stattliche Zahl kosmischer Eiszeithypothesen, die sich am Rand des wissenschaftlich Vertretbaren bewegen. Im Vordergrund solcher vorwiegend älteren Erklärungsversuche standen bezeichnenderweise immer wieder kosmische Katastrophen, etwa derart, daß vom Zusammenstoß mit kosmischen Eiskörpern die Rede war, oder die Sonne sollte beim Durch-eilen einer kosmischen Staubwolke so sehr abgedunkelt worden sein, daß der Rest des Sonnenlichts, der noch zur Erde gelangte, nicht mehr ausreichte, um die „normalen“ atmosphärischen Temperaturen zu erhalten. Andere wieder glaubten, die Erdatmosphäre habe durch katastrophale Meteoritenschauer so sehr an Substanz verloren, daß die Weltraumkälte bis zur Erdoberfläche vordringen konnte.



Verbesserte Strahlungskurve von Milanković

Die Darstellungsart in sogenannten Breitenäquivalenten gibt durch den Kurvenverlauf an, welcher heutigen Breite die vergleichbare Bestrahlungsintensität des 65. Breitengrads zu einem beliebigen Zeitpunkt bis vor 600 000 Jahren entspricht.

■ Hauptwarmzeiten oder Zwischeneiszeiten

Neben den Vorstellungen von Milanković hat sich unter diesen Konzeptionen lediglich die noch heute viel diskutierte mögliche Auswirkung des kosmischen Staubs auf unser Erdklima behauptet. Die Mehrzahl der Katastrophentheorien gilt dagegen als überholt, und der Wert einer Reihe weiterer Eiszeiterklärungsversuche besteht eigentlich nur darin, daß sie bemüht waren, auch das auf die Dauer als veränderlich anzusehen, was in der kurzen Spanne eines Menschenlebens konstant erscheint. Dazu gehört mit immerhin recht gewichtigen Argumenten das neuerdings wieder in den Vordergrund gerückte Problem der Veränderlichkeit der Sonnenleuchtkraft, das uns in seinen möglichen klimatischen Auswirkungen noch beschäftigen wird. Doch zunächst wollen wir den Argumenten der „Gegenpartei“ Platz geben.

Die Eiszeit aus Veränderungen in und auf der Erde selbst abzuleiten fand sehr früh großen Anklang, vor allem bei Geowissenschaftlern. Viele glaubten selbst noch bis in die Mitte unseres Jahrhunderts, die Eiszeit ließe sich durch eine einfache Polverlagerung erklären. Wir wissen zwar inzwischen, daß eine solche Vereinfachung keine vollständige Lösung des Problems bringen kann. Indes gibt es auch zu diesen Vorstellungen Variationen, die bis heute diskutiert werden; ja, es zeichnet sich sogar eine Aktualisierung ab. Man glaubt jetzt nicht

mehr, daß sich die Erdkruste als Ganzes zu den Polen verschob, sondern nimmt — wie wir später noch sehen werden — mit gutem Grund an, daß sich durch gegenseitige Verschiebung der Kontinente in den letzten Jahrmillionen ein für das Entstehen der Eiszeit günstiges Verhältnis zwischen der Land- und Meeresverteilung der Kruste ergeben habe.

Eine andere Gruppe rückt für ihre Eiszeittheorie die Beziehungen zum Vulkanismus in den Vordergrund. Sie weist darauf hin, daß die Erdatmosphäre im wesentlichen als Produkt der vulkanischen Entgasung anzusehen sei, und da diese Gase durch Entweichen in den Weltraum oder durch Reaktionen im Meer ständig verbraucht werden, müsse im Prinzip zu Zeiten vulkanischer Ruhe, wenn also der Gasnachschub nur spärlich vonstatten geht, infolge Ausdünnens der Atmosphäre erhöhte Vereisungsgefahr bestehen.

Doch selbst über die Auswirkungen vulkanischer Gasausbrüche auf die Atmosphäre gibt es verschiedene Meinungen. Die gleiche Voraussetzung kann nämlich auch zu der entgegengesetzten Schlußfolgerung führen, wenn man zum Beispiel in Betracht zieht, daß durch den Vulkanismus erhebliche Staubmengen in die Atmosphäre verfrachtet werden, was eine verstärkte Absorption (Verschluckung) des Sonnenlichts in der hohen Atmosphäre und seine gesteigerte Reflexion noch vor Erreichen des Erdbodens bewirkt. Dieser würde somit um einen bestimmten Betrag geringer erwärmt. Verstärkter Vulkanismus bedeutet nach dieser Auffassung also, global gesehen, letztlich Abkühlung. Wir haben hier ein typisches Beispiel für die Mehrdeutigkeit von Geoprozessen vor uns, die so lange bestehenbleiben wird, wie es uns an exakten Daten über Substanz und Menge der am Umsatz in der Atmosphäre beteiligten Stoffe fehlt.

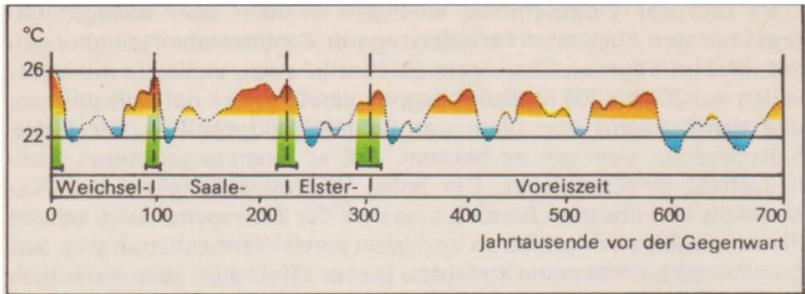
Moderne Versuche, die Eiszeit zu erklären, stellen oft eine Art Kompromißlösung dar. Man geht dabei nicht mehr von nur einem Haupterzeuger des Klimaumschlags aus, sondern nimmt eine Kombination von mehreren Ursachen als Voraussetzung der Eiszeitentstehung an. Unter solchen Gesichtspunkten kann man zum Beispiel die schon vorhandenen Eiszeittheorien nach ihren jeweils gesicherten Argumenten durchforsten und daraus eine neue, „eigene“ Eiszeittheorie aufstellen. Wir wollen im folgenden auf ähnliche Weise vorgehen, allerdings nicht, um die x-te Eiszeittheorie zu entwerfen, sondern weil sich dies als kürzester Weg zur Darlegung der stichhaltigen Argumente empfiehlt, die zur Erklärung herangezogen werden können. Eine solche „kombinierte Eiszeithypothese“ sähe auf der Grundlage unseres heutigen Wissens etwa so aus:

Im Lauf der Erdgeschichte wechseln in mehr oder weniger unregelmäßigen Abständen Perioden regerer Kontinentalverschiebungen mit solchen trägeren Charakteren ab. Parallel dazu, vielleicht mit Intervallen von 200 bis 300 Millionen Jahren, verstärkt sich der Vulkanismus, und damit nimmt vor allem der Kohlendioxidgehalt in der Erdatmosphäre zu. Von ihm ist bekannt, daß er einen sogenannten Glashaueffekt auslösen kann: Die hohe Absorptionsfähigkeit des CO_2 -Moleküls im infraroten Bereich, also dem der Wärmestrahlung, schützt die Atmosphäre vor größeren Verlusten durch Wärmeabstrahlung, was grundsätzlich Erwärmung bedeutet. Dieser Effekt wird aber vermutlich durch die vom explosiven Vulkanismus bewirkte höhere Staubbelastung der Atmosphäre mindestens zum Teil ausgeglichen oder zeitweilig sogar übertroffen.

Alle bis hierher aufgeführten Geoprozesse offenbaren zwar den veränderlichen Charakter der irdischen Atmosphäre, reichen jedoch nach unserer modernen Auffassung immer noch nicht ganz aus, eine Eiszeit voll in Gang zu setzen. Folgende Zusatzbedingungen müßten daher außerdem erfüllt sein: Die Polargebiete der Erde haben sich durch Landnähe auszuzeichnen, damit sich eine verstärkte Abkühlung unter kontinentaler Eisentwicklung vollziehen kann. Wenn nun noch ungünstige Erdbahnelemente im Sinn der schon erwähnten Strahlungskurve von Milanković hinzukommen, dürfte sich der Ausbruch einer neuen Eiszeit aller Voraussicht nach kaum aufhalten lassen. Solche Elemente wären die Abnahme der Neigung der Erdachse im Verhältnis zur Bahn (wenn auch nur um 1 bis 2°) und die größere Sonnenferne der Erde im jeweiligen Sommerhalbjahr des in der Vereisung vorausschreitenden Pols bei gesteigerter Exzentrizität, das heißt mehr elliptischem statt kreisförmigem Verlauf, der Erdbahn überhaupt. Derartige Änderungen der Erdbahnelemente sind schon länger bekannt. Sie folgen himmelsmechanischen Gesetzen und sind keine Erfindung der Eiszeittheoretiker.

Vielleicht sollten wir abschließend noch gewisse Trübungserscheinungen in der Hochatmosphäre, die als leuchtende Nachtwolken im Niveau der kalten Mesopause, der oberen Grenze der Mesosphäre, also zwischen 80 und 100 km Höhe, auftreten, in Betracht ziehen. Sie werden durch Kondensation (Vereisung) von Wasserdampf an feinverteilter meteoritischer und Kometenmaterie ausgelöst und könnten, weil die vereisten Teilchen das Sonnenlicht dann stärker als heute direkt zurück ins All reflektieren, eine zusätzliche Abkühlung bewirken.

Diese Hauptbestandteile unserer Variante einer Eiszeitentstehungs-



Temperaturschwankungen im tropisch-ozeanischen Bereich (Karibik) während der Eiszeit und ihre fragliche Zuordnung zu den Hauptvereisungsphasen in Europa

 Hauptwarmzeiten

theorie sind natürlich schneller zusammengestellt als bewiesen. Doch selbstverständlich kann die Forschung auf den Nachweis nicht verzichten. In diesem Sinn dürfen wir es als positiv bewerten, daß Detailstudien heute gefragter sind als verfrühte Theorien. Und Fortschritte zur echten Lösung des Problems gibt es nach Geländeuntersuchungen und Laborauswertungen von Probenmaterial in großer Zahl.

Unschätzbaren Wert für die gesamte Eiszeitproblematik besitzen vor allem die neuerdings in zunehmendem Maß erzielten Datierungsergebnisse an Eisbohrkernen von nun schon mehreren hundert Meter Länge. Das Prinzip des Verfahrens ist relativ einfach und beruht auf der Tatsache, daß die Einbindung der Sauerstoffisotope ^{18}O und ^{16}O in das Eis proportional zu der Temperatur erfolgt. Die so gewonnene Klimakurve reicht nach Bohrkernen aus der Antarktis und aus Grönland bereits über 100 000 Jahre zurück. In dem darin enthaltenen Wechsel von Warm- und Kaltzeiten lassen sich Übereinstimmungen mit Ergebnissen anderer Verfahren, beispielsweise der Pollenanalyse, erkennen.

Schauen wir uns diese moderne Klimakurve einmal genauer an. Ihre Werte besagen, daß nicht nur 4 große Kaltzeiten das Klima der gesamten Eiszeit kennzeichnen, liegen doch mindestens deren 7 allein im Intervall der letzten 700 000 Jahre. Und es hat ganz den Anschein, als gebe es in noch früheren Stadien des Quartärs weitere Vorläufer.

Wir sollten jedoch auch den Charakter des Kurvenverlaufs selbst nicht übersehen. Da treten zum Beispiel während der letzten

120 000 Jahre die Kalt- und Warmphasen in Wechseln von sehr unterschiedlicher Länge auf. Es gibt kurzlebige, aber dennoch intensive Abkühlungsphasen von nur zwei bis drei Jahrtausenden Dauer, ferner Häufungen weit schwächer ausgeprägter warm- und kaltzeitlicher Wechsel von ähnlicher oder auch viel längerer Dauer. Am längsten währte von ihnen die jüngste Kaltzeit, die einen Zeitraum von mehr als 25 000 Jahren umfaßte und den Maximalvorstoß der weichselzeitlichen Inlandeismassen vor etwa 40 000 Jahren einleitete. Ihr Abbruch vollzog sich zwar wieder in Intervallen, aber insgesamt doch in erstaunlich kurzer Zeit. Nur rund 2 000 Jahre waren für die Umpolung zum gegenwärtigen Klima notwendig, während sich das breite Kältemaximum der Weichseleiszeit erst nach vielen unregelmäßigen Ansätzen über einen Zeitraum von fast 50 000 Jahren hinweg herausbildete.

Diesem unregelmäßigen Verlauf der Großklimakurve mit seinen nachweislich eingelagerten sehr kurzen Klimaumschlägen sollten wir in gewissem Grad sogar eine Schlüsselstellung zur Lösung des Eiszeiträtsels zuschreiben. Wer eine Eiszeittheorie entwickeln will, muß erklären können, wie sich solche Klimastürze vollziehen. Wären die Wechsel in den Erdbahnelementen bestimmend, dann sollten die einzelnen Perioden deutlicher ausgeprägt sein. Oder haben wir die großen Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Klimaschwankungen vielleicht doch eher als Anzeichen einer starken Abhängigkeit des irdischen Großklimas von der Intensität des Vulkanismus zu werten?

Von besonderem Interesse für die gegenwartsnahen und die zukünftigen Klimaschwankungen ist noch, daß diese unregelmäßigen, aber im Vergleich zur Dauer eines Menschenlebens doch sehr langphasigen deutlichen Veränderungen von schwächeren überlagert werden sollen, die nur nach Jahrzehnten oder Jahrhunderten zählen.

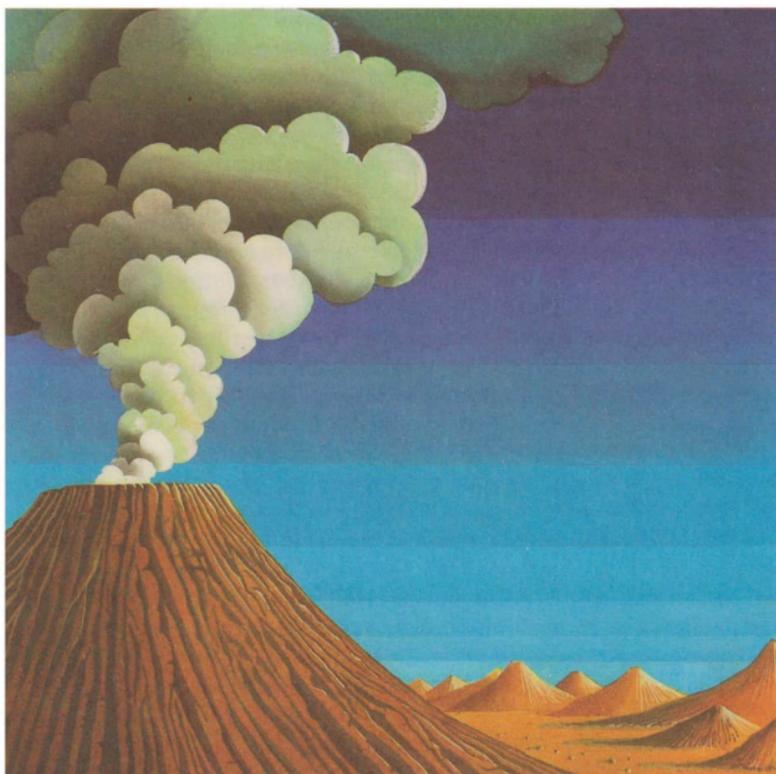
Dänische Forscher glauben belegen zu können, daß sich die scheinbare Unregelmäßigkeit in den periodischen Klimaschwankungen während der letzten paar tausend Jahre auf die Verzahnung eines 80jährigen mit einem 180jährigen Zyklus zurückführen läßt. Auf diese Weise soll sich auch die „Kleine Eiszeit“ recht gut darstellen lassen, die das Mittelalter von 1300 bis 1650 im Anschluß an eine wärmere Phase etwa zwischen 800 bis 1200 beherrschte. Nach relativ gleichmäßigem Klimaverlauf in den beiden letzten Jahrhunderten ging die letzte größere Warmphase mit ihrem Maximum zwischen 1930 und 1950 schon wieder zu Ende. Zur Zeit befinden wir uns nach den Vorstellungen der Zyklenetheoretiker – und leider auch in gewissem Grad spürbar – bereits auf dem absteigenden Ast.

Schenken wir den durch ihre Datierungen an Eisbohrkernen erfahrenen dänischen Wissenschaftlern Glauben, so ergäbe eine Vorhersage auf der Grundlage ihres kombinierten 80- und 180jährigen Zyklus für die nähere Zukunft, daß die jetzige Abkühlungsphase in den kommenden zwei Jahrzehnten noch einmal durch eine rückläufige Periode mit geringen Erwärmungsbeträgen unterbrochen würde. Aber bald nach der Jahrtausendwende müßte es erneut kälter werden.

So brennend uns auch das Klima der nahen Zukunft interessiert, die Erfahrung zeigt, daß wir uns bis jetzt noch auf keine Prognose verlassen können. Zu den Unsicherheitsfaktoren erster Ordnung gehört, wie sich in jüngster Zeit wieder bestätigt hat, unser ungenügendes Wissen über das Verhalten unserer Hauptenergiequelle, der Sonne, vor allem über längere Zeiträume hinweg. Seit einigen Jahren wird zum Beispiel immer häufiger die Frage gestellt, ob die Strahlungskraft der Sonne auch langperiodisch keinen Schwankungen unterliegt. Wir sprechen von einer Solarkonstante, die übrigens selbst am Erdboden sehr schwierig zu bestimmen ist. Die zahlreichen Störungen, die unter wechselhaften Einstrahlungsbedingungen an den einzelnen Orten von der Atmosphäre ausgehen, lassen sich nur schwer ausklammern. Es verbleiben Restfehler, die es notwendig machten, den vermeintlichen Standardwert der Strahlungsintensität bis in die jüngste Zeit hinein wiederholt zu korrigieren. Aber vielleicht gibt es ihn über Jahrhunderte, Jahrtausende oder noch längere Zeiträume hinweg gar nicht. Die Sonne – ein veränderlicher Stern? Das wäre wirklich eine neue, eine revolutionierende Grundkonzeption, deren Folgen in kosmisch-geologischer Sicht sich kaum abschätzen lassen. Satellitenmessungen außerhalb der Erde könnten uns hier vielleicht bald Klarheit verschaffen.

Zur Überraschung der Wissenschaftler kommen aber schon jetzt für diese Fragestellung wertvolle Hinweise nicht nur aus der Sonnenforschung, sondern auch vom Mars. Das Verhalten seiner Polkappen drängt nach den Ergebnissen mehrerer Raumfahrtunternehmen sehr zum Vergleich mit der Erde.

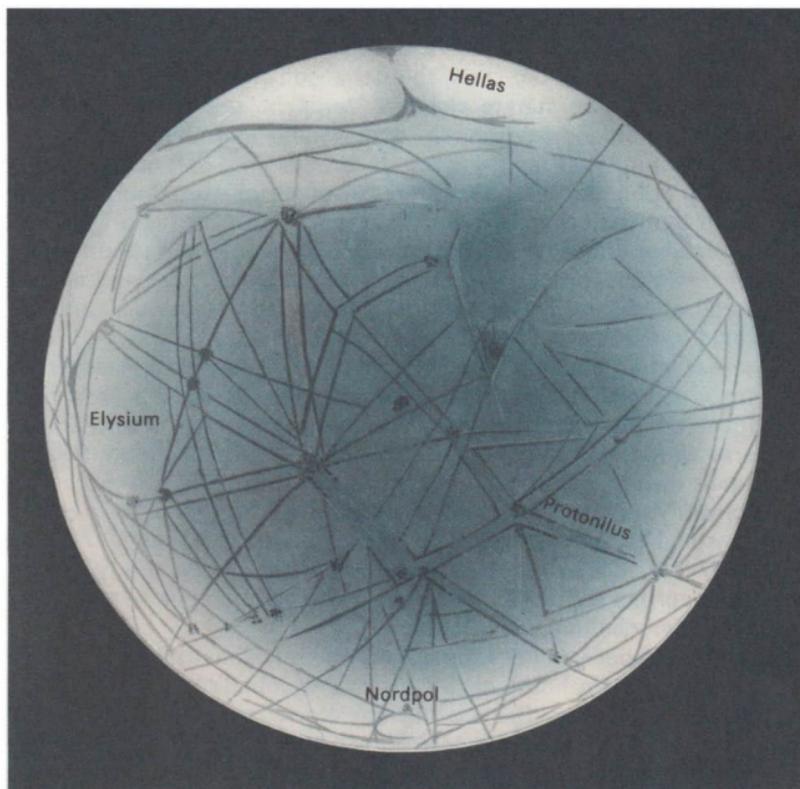
Planetenatmosphären und Vulkane



Eis und Wasser auf dem Mars?

Vor mehr als 300 Jahren wurden die Polkappen des Mars entdeckt, und vor 200 Jahren, 1784, erkannte *Friedrich Wilhelm Herschel* (1738–1822), daß sie jahreszeitlichen Veränderungen unterliegen. Und wieder rund 100 Jahre später ergaben dann *Giovanni Virginio Schiaparelli* (1835–1910) berühmte Studien während der ungewöhnlich großen Erdnähe des Mars 1877 sehr detaillierte Darstellungen zur „gesetzmäßigen“ Verwandlung der vermuteten polaren Eisflächen in „ozeanische Räume“ während eines Marsfrühjahrs. Seine gegenüber dem tatsächlich Beobachtbaren viel zu differenziert gezeichneten Karten erregten wegen der darin enthaltenen „Kanäle“ das höchste Interesse. Bald wurden diese Gebilde in der Öffentlichkeit als Produkt intelligenter Wesen angesehen. Seit jener Zeit hat die Frage nach Lebensspuren auf dem Mars Wissenschaftler und Phantasten beschäftigt.

Um die Jahrhundertwende stellte man die Verhältnisse auf der Oberfläche unseres Nachbarn etwa so dar: Der Mars hat verschneite Polarregionen wie die Erde. Das erstaunliche an ihnen ist aber, daß sie – wie die Fernrohrbeobachtungen zeigten – während eines einzigen Marssommers total abschmelzen können. Obwohl der Planet im Durchschnitt nur 43 Prozent der die Erde erreichenden Sonnenenergie je Flächeneinheit erhält, ließ sich dieser Prozeß doch als Folge einer Reihe von Sonderbedingungen für die damalige Zeit verständlich machen. Erstens dauert ein Marsjahr fast doppelt so lange wie das irdische, genauer, 687 Erdentage oder 669 Marstage; denn dieser Planet rotiert mit 24 Stunden und 37 Minuten nur wenig langsamer als der unsere. Und zweitens ist seine Rotationsachse noch etwa um $1,5^\circ$ stärker gegen die Planetenbahn geneigt als die der Erde. Demnach wirkt die Sonnenstrahlung auf die Pole des Mars intensiver als unter irdischen Verhältnissen, außerdem lassen sich viel weniger Wolken, die den Strahlenfluß zur Oberfläche hemmen, beobachten. Dafür sollte aber nachts die Abkühlung beträchtlicher sein. Insgesamt ging man von einer



So genau glaubte der amerikanische Astronom Percival Lowell (1855–1916) 1903 die „Marskanäle“ gesehen zu haben.

etwa ein Zehntel des irdischen Bodendrucks messenden atmosphärischen Dichte aus und rechnete mit Temperaturen zwischen $+20^{\circ}\text{C}$ und -50°C für die äquatornäheren Gebiete, also durchaus mit erheblich kälterem Klima als auf der Erde. Das wenige ungebundene Wasser, das man auf dem Planeten nach der Seltenheit einer erkennbaren Wolkendecke vermutete, sollte sich vorzugsweise am Rand der weißen Polkappen befinden und eine dort im Marsfrühjahr zu beobachtende Dunkelfärbung hervorrufen. Und eben weil das Wasser auf dem Mars

so knapp ist, seien seine intelligenten Bewohner schon sehr früh zur Anlage der Kanäle, die vielleicht Bewässerungszwecken dienten, gezwungen worden, um die Überlebenschancen zu erhöhen.

Etwa seit 1924 verstärkte sich der Verdacht, daß die weißen Polflecken aus Kohlendioxidschnee, dem sogenannten Trockeneis, bestehen könnten. Weil man jedoch davon ausging, daß etwa -140°C notwendig seien, um die Sublimation, den unmittelbaren Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand, zu verhindern, so niedrige Temperaturen aber offensichtlich auf der Tagseite des Planeten über weiten Teilen der Polkappen nicht herrschten, wurde diese Deutung zunächst nicht voll anerkannt, zumal der spektroskopische Nachweis von Kohlendioxid in der Marsatmosphäre erst 1948 erfolgte.

Interessant ist auch die nunmehr schon über hundert Jahre alte Erkenntnis, daß sich die Lage der Rotationspole wie auf der Erde nicht genau mit der der Kältepole deckt. Die von Marsjahr zu Marsjahr immer sicherer werdenden Angaben zeigen 4 bis 6° Abweichung am Südpol, aber weit weniger, nämlich nur 1 bis 2° , am Nordpol des Mars.

Auch die Verzögerung des Abschmelzens im Vergleich zum höchsten Sonnenstand hatte man schon von der Erde aus erkannt. Aus der Periode von 1877 bis 1879 wurden 3 Monate Verzögerung für die maximale Abschmelzphase auf der Südpolkappe ermittelt und etwa 4 Monate für die Parallelerscheinung am Nordpol.

Diesem Bild der von der Erde aus erfaßbaren klimatischen Vorgänge auf dem Mars steht heute nach Raumfahrtergebnissen ein viel besser fundiertes gegenüber. Die wichtigsten Werte, auf denen vorher alle Theorien zur Erklärung des Marsklimas aufbauen mußten, weichen erheblich von der Wirklichkeit ab. Die Marsatmosphäre erreicht bei einem mittleren Bodendruck um 5 bis 10 mbar (Millibar) noch nicht einmal ein Hundertstel der Dichte unserer Atmosphäre. Dies bedeutet, daß Wasser in flüssiger Form gar nicht mehr auftreten kann, sondern daß es nahe 0°C vom Zustand des Eises durch Verdampfen direkt in die gasförmige Phase übergehen muß. Kohlendioxid wurde mit 95 Volumenprozent eindeutig als Hauptbestandteil der Marsatmosphäre ermittelt. Daneben wiesen die amerikanischen „Viking“-Sonden Stickstoff zu 2 bis 3 Prozent und das Edelgas Argon zu 1 bis 2 Prozent nach.

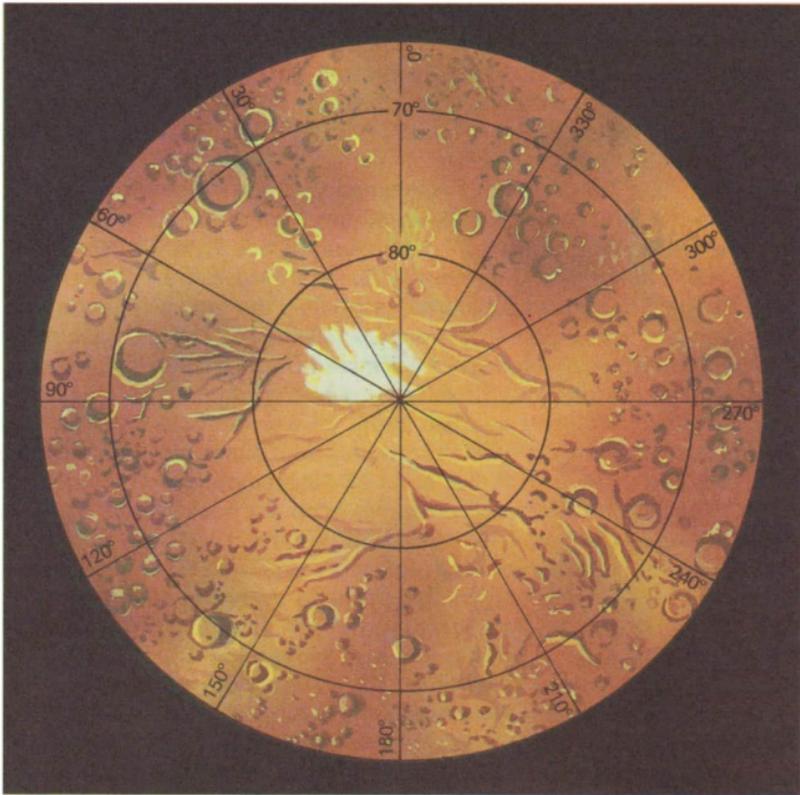
Die mit Spannung erwarteten Werte für den Wasserdampfgehalt liegen im Mittel bei nur 0,1 bis 0,01 Prozent. Sie zeigen aber besonders nach den Ergebnissen sowjetischer Sonden erhebliche Schwankungen um diese Beträge.

Auch die mit Satelliten tatsächlich gemessenen Temperaturen weichen nicht wenig von den zuvor gemachten Fernbestimmungen ab. Der Mars ist kälter, als es von der Erde aus den Anschein hatte. Als Jahresmitteltemperaturen werden jetzt genannt: -60°C am Marsäquator, -80°C in den mittleren Breiten und -110 bis -130°C an den Polen im Winterhalbjahr.

Die täglichen Temperaturschwankungen zeigten die erwartete große Differenz um 50K oder mehr. Speziell am Landeplatz von „Viking 1“ wurden unter „subtropischen“ Bedingungen bei etwa 24° Nord zwischen -35°C und -85°C gemessen. Einen interessanten Klimateffekt, den die großen Marsstaubstürme ausgelöst hatten, offenbarte ein Vergleich der Satellitenmessungen von 1969 und 1971/72. Schwankten die Temperaturen in den jeweils wärmsten Gebieten des Planeten bei „klarem Wetter“ 1969 zwischen Tag und Nacht von $+9^{\circ}\text{C}$ bis -100°C , also mit einer Differenz von fast 110K, so war die Schwankung 1971 zur Zeit der gewaltigen Staubstürme auf dem Mars hier bloß halb so stark. Sie betrug etwa 55K. Bei einer Mittagstemperatur von lediglich -15°C fiel die Temperatur aber nachts auch nur noch bis -70°C , also um 30K weniger, als man 1969 beobachtet hatte.

Daß die Tagesdurchschnittstemperaturen 1971 in Bodennähe über große Flächen des Planeten hinweg sanken, während andererseits in Höhen über 10 km das Temperaturmittel erheblich anstieg, gestattet eine Schlußfolgerung von allgemeiner Bedeutung: Staub in der Atmosphäre des Planeten bewirkt eine Abkühlung des Bodenklimas bei gleichzeitiger Aufheizung der Hochatmosphäre. Der Modellfall Mars hat uns in drastischer Weise gezeigt, wohin eine Überbelastung der Luft zum Beispiel durch die industriellen Abgase oder durch Vulkanausbrüche mit ihrem manchmal sehr hohen Staubanteil zu führen vermag!

Die Exzentrizität der Marsbahn, das heißt ihre Abweichung von der Kreisgestalt, übertrifft die der Erde bei weitem. Maximal- und Minimalabstand von der Sonne – 249 Millionen und 207 Millionen km – unterscheiden sich um 42 Millionen km und verhalten sich somit fast wie 5 : 4, wodurch die Intensität der Sonneneinstrahlung um rund 30 Prozent variiert. Der Südsommer des Mars fällt zur Zeit ähnlich wie auf der Erde mit der größten Nähe zur Sonne zusammen, was ihn mehr vom Eis befreit als den Nordpol. Ein weißes Restfeld von etwa 200 bis 400 km Durchmesser überlebt aber selbst am Südpol des Planeten den dortigen Sommer. Nach den dabei gemessenen Temperaturen von nur (!) -80°C bis -100°C oder noch weniger müßte eigentlich das letzte



*Südpolarregion des Mars nach Raumfahrtergebnissen
Weiß = sommerliches Resteisfeld in der Umgebung des Kältepol*

Trockeneis längst verdunstet sein. Die Wissenschaftler wurden stutzig und fingen an, den Abschmelzvorgang genauer zu verfolgen.

Nach dem wahren Verlauf der Abschmelzung und nach Modellrechnungen zum theoretischen Verhalten einer reinen Trockeneiskappe ergab sich für beide Pole das gleiche Bild. In der Anfangsphase und dem Hauptrückzugsstadium war die Übereinstimmung mit dem Modell zunächst befriedigend, doch allmählich, vor allem während der Spätphase, stellte sich grundsätzlich eine Verzögerung ein, was die Existenz

eines widerstandsfähigen Kerns bewies. Man konnte das Problem leicht dadurch lösen, daß man als Ursache annahm, unter dem Trockeneisbelag befinde sich echtes Wassereis, das unter den erwähnten Temperaturbedingungen des polaren Marssommers nur sehr langsam sublimiert. Die hoch- bis spätsommerlichen weißen Restfelder auf dem Mars sind also „echte“ Eiskappen wie auf der Erde.

An der jährlichen atmosphärischen Zirkulation nimmt demnach dieses H_2O -Eis kaum teil, weil es auf dem Mars eben zur Zeit extrem kalt ist. Man vermutet heute sogar, daß der Eispanzer an den Polen sehr tief reicht, vielleicht mehrere hundert Meter. Örtlich liegt das Eis gemischt mit eingewehtem Gesteinsstaub vor. Vielfach verkittet es aber auch einfach die Lockermassen des Mars zu einer Art Dauer- oder Permafrostboden, wie wir ihn auf der Erde in Periglazialgebieten, in Bereichen vor dem ehemaligen Eisrand, kennen. Vor allem in der Sowjetunion östlich des Ural gehören noch heute große Flächen diesem auch im Sommer unterirdisch nicht auftauenden Bodentyp an.

Hinweise auf das Vorhandensein jener mächtigen Schicht von H_2O -Eis im Wechsel mit Sand und Staub ergaben sich zum erstenmal 1972 bei der Auswertung von Marsaufnahmen. Damals fiel auf, daß sich unter den gerade erst von Trockeneis befreiten Gebieten nahe dem Südpol des Mars Strukturen mit deutlichen Schichtungsmerkmalen erkennen ließen. Dies war überhaupt das erstmal, daß auf einem anderen Himmelskörper Schichtgesteine oder Sedimente nachgewiesen wurden. Zugleich zeigten sich diese Regionen auffällig kraterarm. Man nahm schon sehr bald an, daß hier eine Landschaft vorliegt, in der die eigentlich für den Mars sonst so typische urzeitliche, von zahlreichen Großkratern durchsetzte Fläche unter viel jüngeren Sedimenten begraben wurde.

Für den Nachweis eines zumindest zeitweiligen Vorhandenseins von Wasser gewannen flußlaufähnliche Strukturen auf dem Mars bald größte Bedeutung. Es handelt sich um talartige Mäander (Schlängelungen) von einer Länge bis zu mehreren hundert Kilometern und sehr wechselhafter Breite. Auch auf dem Mond gibt es wenigstens äußerlich recht ähnliche Strukturen. Trotz der Übereinstimmung in der Grundform weisen aber Mars- und Mondtäler wesentliche Unterschiede im Feinbau auf, die zu zwei ganz verschiedenen Entstehungstheorien geführt haben.

Die „Mondflüsse“ konzentrieren sich eindeutig auf die ebenen Ränder der Mare, also auf Gebiete mit relativ jungen Lavaergüssen. Da sie viele Anzeichen vermissen lassen, aus denen man auf von Wasser

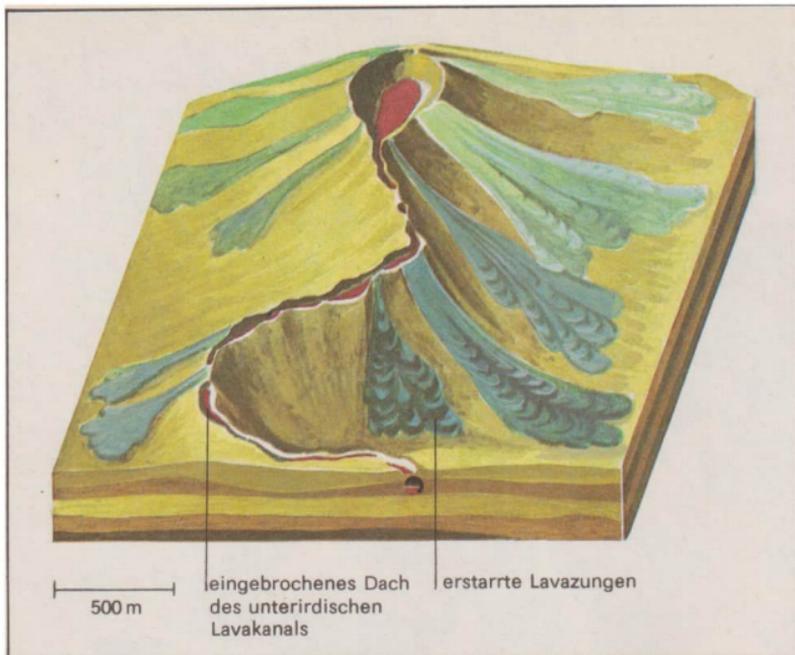




Schichtstrukturen in der Südpolarregion des Mars, 1972 von der amerikanischen Planetensonde „Mariner 9“ aufgenommen

transportierte Lockermassen schließen könnte – zum Beispiel fehlen Seitentäler oder irgendwelche Schuttfächer am Ende dieser Täler –, nimmt heute die Mehrzahl der Planetologen eine heiße Entstehung an. Es soll sich danach um die Rinnen oder Kanäle schnellfließender Lava handeln, die sich durch Aufschmelzen des Randgesteins ihren Weg bahnte. Dieser Vorgang mag auf den ersten Blick recht ungewöhnlich erscheinen, wurde aber auf der Erde in jungen Vulkangebieten schon

Im Gebiet des Dauerfrostbodens: Eis am Steilufer eines sibirischen Stroms



Modell eines typischen irdischen Lavakanals, von einem vulkanischen Krater ausgehend

wiederholt beobachtet und hier als Thermoerosion (griech. therme = Wärme; lat. erodere = ausnagen) bezeichnet. Der Hauptunterschied zwischen den Erscheinungen auf dem Mond und auf der Erde liegt im Ausmaß. Während auf der Erde normalerweise Lavaröhren und -rinnen nur bis zu etwa 10 m breit und kaum über 2 bis 3 km lang werden – meist sind sie sogar viel kürzer –, erreichen die lunaren (lat. luna = Mond) „Flüsse“ mehrere hundert Kilometer Länge. Und auch die Breite kann sich, wie beim 160 km langen Schröter-Tal, bis auf 8 km steigern. Das Größenverhältnis liegt also etwa bei 1:100 zugunsten Lunas.

Die „Flußbetten“ des Mars sind keineswegs kleiner als die des Mondes, zeichnen sich aber noch durch eine Reihe zusätzlicher Merkmale aus, welche die Lavastromtheorie hier als Erklärung ausscheiden

lassen. Erstens haben sie häufig echte Seitentäler. Zweitens, und das ist fast noch wichtiger, treten in den größeren Cañons (steilwandigen Tälern) des Mars zahlreiche Strömungsbilder auf, wie sie sich auch unter dem Formenschatz unserer großen Flüsse finden. Ihr markantester Typ erweckt den Eindruck, als überschaue man ein ausgetrocknetes Flußbett vom Flugzeug aus. Ovale, an Sandbänke unserer Flüsse erinnernde Inseln liegen in den Zwickeln zopfartig verflochtener Rinnensysteme. Auch die Talflanken zeigen ein den Cañonrändern

*Etwa 400km langes Flußtal in der Nähe des Marsäquators,
1972 von „Mariner 9“ aufgenommen*



ähnliches Streifenmuster. Was sollte wohl anderes als Wasser diese Strukturen verursacht haben, da doch sein Vorhandensein im Gegensatz zum Mond für den Mars, wenn auch nur als polares Eis, tatsächlich belegt ist? Angesichts der Argumente, die für echte ehemalige Wasserläufe auf dem Mars sprechen, herrschen hierüber keine Zweifel mehr, zumal die offenkundige Häufung der Täler in Äquatornähe, wo die relativ „hohen“ Temperaturen am ehesten der Existenzmöglichkeit von flüssigem Wasser nahekommen, ebenfalls darauf hindeutet. Aber – und hier berühren wir die problematische Seite dieser aufregenden Erscheinungen – Wasser in flüssiger Phase kann ja unter dem heute auf dem Mars herrschenden geringen Atmosphärendruck gar nicht vorhanden sein! Folglich muß es auf unserem Nachbarplaneten Zeiten gegeben haben, da sich seine Atmosphäre durch eine größere Dichte auszeichnete.

Wir können es auch so formulieren: Das Klima des Mars weist Züge auf, welche die Frage entstehen lassen, ob er sich nicht in einer großen Eiszeitphase befindet, die vielleicht, entgegen den Verhältnissen auf der Erde, im Verlauf seiner Geschichte nur hin und wieder von einigen Warmzeiten unterbrochen wurde. Gesucht wird also ein Motor für großperiodische Klimaschwankungen, dessen Antrieb zu einem wärmeren Witterungsablauf für den gegenwärtig etwas unterkühlten Mars führen könnte.

Einige Wissenschaftler sehen neuerdings als mögliche Ursache für derartige Klimaschwankungen wechselnde Mengen von Sonnenenergie an, die den Planeten erreichen sollen. Im speziellen Fall wird angenommen, daß durch einen pulsierenden Verlauf der Kernprozesse im Innern der Sonne erhebliche Strahlungsschwankungen – vielleicht bis zu 20 Prozent – in nach Jahrmillionen zählenden Perioden auftreten. Die Sonne wäre demnach in Wirklichkeit, wie schon erwähnt, einer von vielen veränderlichen Sternen, allerdings mit einer ziemlich langen Periode.

Wie würde sich eine Zunahme der Sonnenstrahlung von solchem Ausmaß auf den Mars auswirken? Dieser Frage gingen die Wissenschaftler von verschiedenen Seiten aus nach, und sie kamen im Prinzip immer wieder zu ähnlichen Ergebnissen. Zunächst würde die erste Stufe der Temperaturerhöhung mehr Kohlendioxid freisetzen. Die Atmosphäre des Mars würde also etwas dichter werden. Dabei lassen sich für den Zuwachs an Kohlendioxid in der Atmosphäre vor allem zwei Quellen vermuten. Einmal würde in den Polarregionen die Verdunstungsrate des CO_2 ansteigen; zum anderen würde aus der gesamten

übrigen Marsoberfläche ein Teil des sonst in den Lockermassen gebundenen CO_2 ebenfalls in die Atmosphäre entweichen. Verdichtung der Atmosphäre aber bedeutet, daß der Wärmeverlust des Planeten besonders nachts durch die verringerte Wärmeabstrahlung gemildert wird, was zur weiteren Temperaturerhöhung beiträgt. Dies setzt noch mehr CO_2 -Massen aus dem Marsboden frei, bis die Temperaturerhöhung in zunehmendem Maß auch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre anwachsen läßt. So soll sich schließlich die Dichte der Marsatmosphäre etwa verzehnfachen können.

Wäre diese Theorie gesichert, dann gäbe es auch für uns keine Eiszeitproblematik mehr. Ein synchroner Verlauf von Eiszeitperioden auf zwei benachbarten Planeten schliesse jegliche innere Ursache von vornherein aus. Der wahre Verursacher, die Sonne, wäre gefunden. Solche gleichlaufenden Klimaschwankungen auf zwei oder vielleicht sogar mehreren Planeten würden zudem den besten Beweis für eine sonst nur theoretisch errechenbare Unbeständigkeit in der Energieabstrahlung unseres Zentralgestirns liefern. Aber selbst ohne diese Gewißheit ergeben sich schon jetzt aus der Konzeption wertvolle weitere Denkansätze für das heute noch nicht gelöste Eiszeiträtsel.

Uratmosphäre ohne Sauerstoff

Trockene Luft der bodennahen irdischen Atmosphäre enthält, in Volumenprozenten ausgedrückt, folgende chemische Hauptbestandteile: Stickstoff zu 78,1 Prozent, Sauerstoff zu 20,9 Prozent und das Edelgas Argon zu 0,93 Prozent. Da diese drei Elemente schon 99,93 Prozent ausmachen, bleiben neben den 0,03 Prozent CO_2 -Anteil nur noch 0,04 Prozent übrig, so daß die der Häufigkeit nach anschließenden Edelgase Neon, Helium und Krypton lediglich in Größenordnungen von weniger als $\frac{1}{1000}$ Prozent am Aufbau unserer Atmosphäre beteiligt sind. Hinzu kommen unter natürlichen Bedingungen noch wechselnde Mengen von Wasserdampf, der seinen Sättigungswert je nach Temperatur im Mittel zwischen 0,1 bis 1 Prozent Anteilen an der Luft erreicht.

Nachdem wir uns eben mit dem Mars beschäftigt haben, fällt wohl sofort auf, wie unbedeutend die Menge des Kohlendioxids in der irdischen Luft ist – und wie herausragend die der beiden Hauptbestandteile Stickstoff und Sauerstoff. Ob das immer so war? Keineswegs!

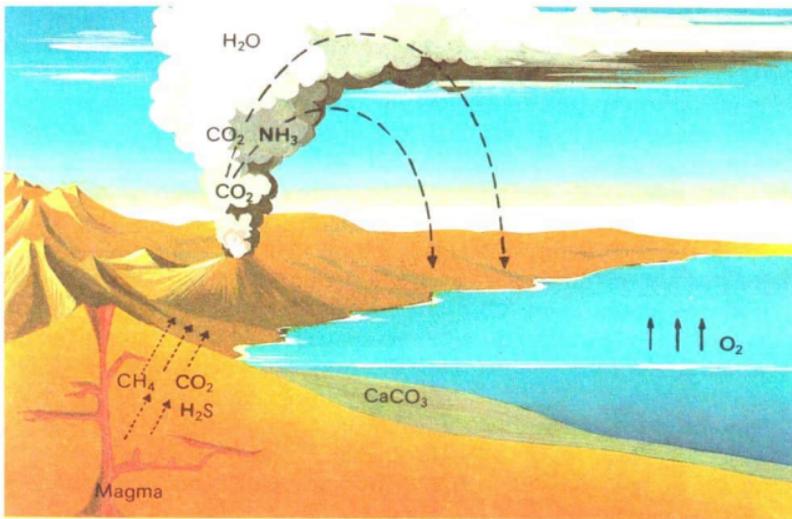
Unsere Atmosphäre hat, wie wir heute ziemlich genau wissen, im Lauf der Erdgeschichte eine Entwicklung durchgemacht, die sie Schritt für Schritt veränderte und der des Mars sowie der anderen Planeten immer weniger ähneln ließ.

Ein hoher Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre erdähnlicher Himmelskörper entspricht nämlich mehr der planetarischen Frühgeschichte als die Zusammensetzung unserer Luft. Nicht die Marsatmosphäre, sondern unsere eigene stellt den Sonderfall im Sonnensystem dar. Was sie in erster Linie von den übrigen Planetenatmosphären unterscheidet, ist ihr hoher Sauerstoffgehalt.

Schon seit langem besteht kein Zweifel mehr daran, daß die pflanzlichen chemischen Lebensprozesse als der überragende Erzeuger des freien Sauerstoffs in der Erdatmosphäre angesehen werden müssen. Bei der Assimilation wandelt die chlorophyllführende Pflanzenzelle das Kohlendioxid der Luft in organische Verbindungen um und scheidet dafür freien Sauerstoff als Spaltprodukt aus. Für diesen Vorgang wird bekanntlich Energie verbraucht, er kann sich also nur mit Hilfe der Energiespende des Sonnenlichts in der Pflanze vollziehen. Ausschließlich die Pflanzen sind zu solch autotropher Lebensweise befähigt, das heißt, sie allein vermögen aus anorganischen Produkten ihre Nahrung zu gewinnen. Aus diesem Grund waren sie von Anfang an stets die Pioniere oder Vorläufer der Entwicklung. Am deutlichsten wurde dieser Prozeß im Paläozoikum, etwa vor 400 Millionen Jahren, da die Pflanzen das feste Land als Lebensraum eroberten. Ohne das Vordringen der Flora (Pflanzenwelt) über die Deltas der Flußmündungen und die küstennahen Sümpfe in immer trockenere Regionen der Kontinente hätte die irdische Fauna (Tierwelt) den ozeanischen Lebensbereich wohl nie verlassen können.

Schauen wir uns die Häufigkeit der Atmosphärenbestandteile noch einmal an, so fällt auf, daß im Gegensatz zur Sauerstoffzunahme der Kohlendioxidgehalt unserer Atmosphäre auf den erschreckend niedrigen Stand von nur 0,03 Prozent abgesunken ist. Daraus ergibt sich natürlich die Frage, ob denn diese verschwindend geringe Menge für die irdische Flora überhaupt ausreicht. Oder finden sich Anzeichen dafür, daß die Pflanzen ihr eigenes „Grundnahrungsmittel“, den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, im Lauf der Erdgeschichte so weit verbraucht haben und noch verbrauchen werden, daß sie in vielleicht nicht allzu ferner Zukunft aussterben müssen, weil der atmosphärische Nahrungsvorrat erschöpft ist?

Wissenschaftler haben sich diese Frage tatsächlich schon mehrfach



*Vulkanische Gasnachschübe und Gasaustausch in der Atmosphäre
 $CaCO_3$ = Bindung des gelösten Kohlendioxids im Kalkstein*

gestellt und das Problem sogar mit zur Lösung des Eiszeiträtsels heranziehen wollen. Daraus entstand folgende Hypothese: Warme, feuchte Erdperioden erweitern den Lebensraum der Vegetation beträchtlich. Große Flächen der heute zu trockenen und zu kalten Gebiete der Erde werden besiedelt, und die Pflanzenproduktion vervielfacht sich. Infolge unvollständiger Kreisläufe verbleibt mehr organische Substanz im Sediment (Ablagerungsgestein), und damit verringert sich der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre. Da sich hierbei der Glashaueffekt unserer Atmosphäre mit vermindert, kommt es zur Abkühlung. Die logische Folge ist die Vereisung der Pole, das Absinken des Meeresspiegels, das Austrocknen vieler Sümpfe, die Verringerung der pflanzlichen Siedlungsflächen durch trockeneres Klima und damit zunächst noch eine weitere Steigerung der Abkühlung durch Zunahme der Wärmeenergieabstrahlung in den Weltraum, die sonst wegen des höheren durchschnittlichen Wasserdampfgehalts der Atmosphäre schwächer ist. Erst wenn zum Beispiel vulkanische Tätigkeit den Kohlendioxidgehalt der Luft wieder ansteigen läßt, so folgerten die Anhänger dieser Hypothese, kann es erneut zu einer allgemeinen Erwärmung kommen.

Alles recht beeindruckende Argumente, scheint es, doch die Gültigkeit solcher Vorstellungen hängt ja von der Summe aller Faktoren ab, die dabei mitspielen, sowie von den Größenordnungen, in denen sie tatsächlich auftreten, und die kennen wir immer noch nicht genau genug.

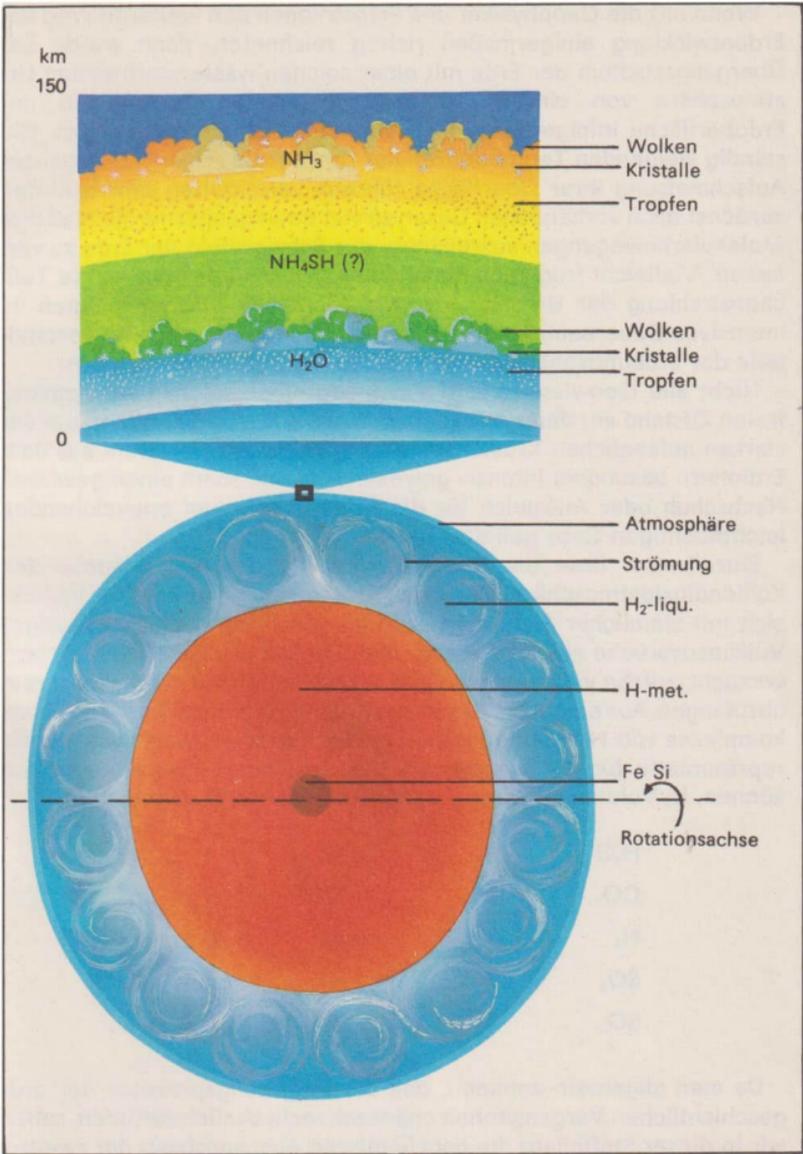
Daß unser Planet vor der Entstehung des Lebens eine weit kohlendioxidreichere Lufthülle besessen hat, wird nicht mehr angezweifelt – doch das war noch nicht einmal seine erste Atmosphäre. Es gab einen Vorläufer, der sich in seinem chemischen Aufbau wesentlich von der CO₂-Atmosphäre unterschied. Das interessante ist nun, daß wir auch dafür noch heute im Kosmos Modelle finden: die ammoniakführenden und wasserstoffreichen Atmosphären der Planetenriesen, wie sie uns Jupiter und Saturn und, durch zunehmenden Methananteil etwas abgewandelt, die ferneren Planeten des Sonnensystems wie Uranus und Neptun zeigen.

Entwicklungsgeschichtlich dürfen wir eine CO₂-reiche Planetenatmosphäre als Produkt der vulkanischen Entgasung ansehen, und die kommt im Lauf der frühen Entwicklung der erdähnlichen Himmelskörper erst allmählich in Gang. Wahrscheinlich hatte ein solcher Planet schon einige hunderttausend oder Millionen Jahre seiner Geschichte hinter sich, ehe die aus seinem Innern zugeführte Kohlendioxidmenge die anderen Bestandteile an Bedeutung überholte. Diesen von gewaltigen Umformungsprozessen in relativ kurzen Zeitspannen gekennzeichneten ersten Entwicklungsabschnitt eines jungen Himmelskörpers bezeichnet man als sein Protoplanetenstadium (lat. proto ... = vor ...).

Die gegenwärtig diskutierten Theorien zur Planetenentstehung gehen im allgemeinen davon aus, daß die Erde wie auch ihre übrigen Verwandten im Sonnensystem während dieser Phase, in der hauptsächlich die Zusammenballung zu immer größer werdenden Himmelskörpern stattfand, ein recht kühles Stadium durchlaufen mußte. Da die leichtflüchtigen Gase, wie das Methan (CH₄) und das Ammoniak (NH₃), bei der Kondensation (Verdichtung) der Materie im Urnebel zum Teil zeitweilig von der Protoplanetenmaterie eingefangen werden, könnten sie, solange es nahe der Oberfläche des Planeten noch kühl genug war, eine erste Gashülle um die Erde gebildet haben.

Vermutetes mehrschichtiges Atmosphäreprofil des Jupiters

*NH₄SH (?) = fragliche Schicht mit Ammoniumhydrosulfid-Kristallen;
H₂-liqu. = Wasserstoff in flüssigem Zustand; H-met. = Wasserstoff
metallisch; Fe, Si = eisen- und siliziumreicher Kern*



Wenn uns die Geophysiker und Planetologen den weiteren Weg der Erdentwicklung einigermaßen richtig zeichneten, dann wurde das Übergangsstadium der Erde mit einer solchen wasserstoffreichen Uratmosphäre von einem fast atmosphärefreien Zustand an der Erdoberfläche infolge deren fortwährender Aufheizung abgelöst. Die ständig steigenden Temperaturen der Urerde, die schließlich sogar zur Aufschmelzung ihrer Oberfläche führten, vermittelten sehr bald den zunächst noch vorhandenen Gasen so viel Bewegungsenergie, daß ihre Molekularbewegungen ausreichten, das Schwerfeld der Erde zu verlassen. Vielleicht trug auch die allgemein vermutete sehr starke Teilchenstrahlung der Ursonne, die wir Sonnenwind nennen, durch ihr intensives Dauerbombardement erheblich dazu bei, daß die Bestandteile der Erdatmosphäre in den Weltraum geschleudert wurden.

Nicht alle Geowissenschaftler nehmen einen solchen atmosphärefreien Zustand an; denn, so argumentieren sie, gerade im Stadium der starken anfänglichen Krustenaufheizung sollte der Gasstrom aus dem Erdinnern besonders intensiv gewesen sein und somit einen gewissen Nachschub oder Ausgleich für die in den Weltraum entweichenden leichtflüchtigen Gase geliefert haben.

Einzelheiten über die Zusammensetzung der neu entstehenden Kohlendioxidatmosphäre, der zweiten unseres Planeten also, müßten sich mit ziemlicher Sicherheit auch aus Analysen der Gase heutiger Vulkanausbrüche ableiten lassen. Man hat mit Erfolg schon mehrfach versucht, solche vulkanischen Gase aus glühender Lava möglichst rein abzufangen. Aus einem der Krater des großen zentralpazifischen Vulkankomplexes von Hawaii liegen zum Beispiel Analysenwerte vor, die als repräsentativ für die Haupttypen des irdischen Vulkanismus gelten können. In Volumenprozent ausgedrückt, waren darin enthalten:

H ₂ O	68	S ₂	1
CO ₂	13	CO	0,7
N ₂	7	H ₂	0,7
SO ₂	7	Cl ₂	0,4
SO ₃	2	Ar	0,2

Da man allgemein annimmt, daß die Entgasungsprozesse der erdgeschichtlichen Vergangenheit chemisch recht ähnlich verliefen, sehen wir in dieser Stoffbilanz die geochemische Ausgangsbasis der zweiten

irdischen Atmosphäre. Als wesentlichste Kennzeichen heben sich im Gegensatz zur heutigen Atmosphäre heraus:

1. das Fehlen des freien Sauerstoffs,
2. das etwa ver Hundertfache Angebot an Wasserdampf und Kohlendioxid,
3. ein ebenfalls beträchtlicher Fehlbetrag an Stickstoff; die Werte schwanken hier, wenn man andere Analysen hinzuzieht, zwischen 1 und 10 Prozent.

Wahrscheinlich blieb eine solche oder ähnliche Zusammensetzung der Ur-Kohlendioxidatmosphäre nicht allzulange bestehen. Als wohl wichtigster Phasenwechsel muß die Periode angesehen werden, in der die Temperaturen an der Erdoberfläche unter den damaligen Siedepunkt des Wassers fielen. Vermutlich dürfte die Bildung der Urozeane bei einem Mehrfachen der gegenwärtigen atmosphärischen Dichte begonnen haben, weil die überhitzte Kruste zuvor lange Zeit keine Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes zuließ.

Diese Entstehung der Hydrosphäre, der Wasserhülle der Erde, unter ständiger Abkühlung und bei immer stärker ausdünnender Atmosphäre brachte auch schon sehr bald die erste Eiszeitgefahr mit sich. Uns sind zwar aus dieser Periode vor mehr als 4 Milliarden Jahren keine echten Eiszeitzeugen erhalten geblieben — aber fast so lange, wie Gesteinsdatierungen die Erdgeschichte wenigstens in ihren Grundzügen zu rekonstruieren gestatten, finden sich Spuren der Eiszeiten als deren Begleiter. Wir können sie jetzt schon über 2 Milliarden Jahre in die erdgeschichtliche Vergangenheit zurückverfolgen, und es ist nicht auszuschließen, daß sie im Zeitraum davor häufiger auftraten. Bedenken wir zum Beispiel, daß sich die geringe Wassermenge der Urozeane mit der uns heute vertrauten wahrscheinlich ganz und gar nicht vergleichen ließ, daß damit also ein wichtiger Wärmespeicher fehlte und das Klima grundsätzlich wohl einen kontinentaleren Charakter hatte, dann wird schon eher vorstellbar, daß das damalige irdische Klima für eine Eiszeit anfällig war.

Aber der Wasserdampf stellt nicht den einzigen chemischen Anteil dar, der nach kurzer Gastrolle die Atmosphäre wieder verläßt. Die ersten Ozeane bestanden für Jahrtausende aus Süßwasser und boten sich dazu an, in gelöster Form eine ganze Reihe der bis dahin in der Atmosphäre verweilenden Elemente oder Verbindungen aufzunehmen. So reaktionsfähige Stoffe wie das Chlor oder die Schwefeloxide SO_2 und SO_3 verbinden sich vorzugsweise mit Ionen der Alkali- oder Erdalkalimetalle, zum Beispiel Na, K oder Ca, wie sie allenthalben bei der

Verwitterung der Gesteine, in erster Linie bei der Zersetzung der Feldspäte, frei werden, und bilden Salze oder gehen gelöst ins Meer. Denken wir nur an Verbindungen wie Steinsalz (NaCl) oder wie Gips (CaSO₄), deren Überkonzentration seit einer halben Milliarde Jahren immer häufiger in abgeschlossenen Meeresbecken wieder ausgeschieden wurde.

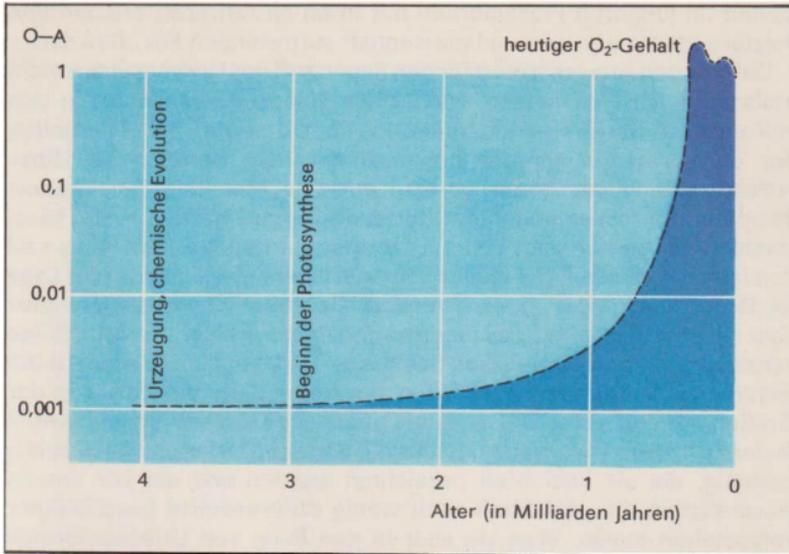
Wie die dritte Atmosphäre der Erde entstand

Entscheidend für die weitere Entwicklung unserer Uratmosphäre war die sich mit wachsender Hydrosphäre ständig verstärkende Lösung des Kohlendioxids. Die neuen Ozeane konnten davon gewaltige Mengen aufnehmen, und als die Sättigung erreicht beziehungsweise überschritten war, erfolgte in steigendem Maß die Ausfällung zu Karbonat und damit als Kalkstein die Einbindung ins Sediment, so daß der Weg zur Lösung weiterer Kohlendioxidmengen wieder frei wurde.

Unter all diesen Bedingungen mußte sich der viel reaktionsträgere Stickstoff allmählich in der verbleibenden Atmosphäre anreichern. Doch wo kam der freie Sauerstoff her?

Wie wir selbst soeben nachgewiesen haben, war eine der Voraussetzungen für die Aufrechterhaltung der tierischen Lebensprozesse, das Vorhandensein von genügend Sauerstoff für die Atmung, nicht erfüllt. In Umkehr dieser Argumentation heißt die Lösung des Problems nach unserem heutigen Wissen: Leben kann gar nicht unter den Bedingungen einer sauerstoffreichen Atmosphäre entstehen, sondern eine der Voraussetzungen ist die Existenz einer sauerstofffreien Gashölle. Dann aber müssen die Urformen anfänglich anaerob, das heißt ohne Sauerstoff, gelebt und durch Gärungsprozesse die lebensnotwendige Energie gewonnen haben. Gleichsam in der Retorte wurde die Urzeugung unter simulierten Uratmosphärebedingungen von Wissenschaftlern nachvollzogen. Unter Blitz und Donner sozusagen, nämlich unter elektrischer Funkenentladung, gelang es dabei, die Urbausteine des Lebens, die Moleküle der Aminosäuren, zu erzeugen.

Eine sauerstofffreie Atmosphäre läßt aber die lebensfeindliche Ultraviolettstrahlung der Sonne in einer für die Organismen tödlichen Dosis bis zur Erdoberfläche dringen, so daß grundsätzlich alle festländischen Bereiche für die Urzeugung ausfielen. Erst in Wassertiefen ab etwa 10m, so vermutet man, stellten sich ungefährliche UV-Strahlungs-



*Zunahme des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre im Lauf der Erdgeschichte
O-A = Sauerstoffanteile, bezogen auf die Gegenwart = 1*

bedingungen ein. Das Leben brauchte dann noch mehr als 3 Milliarden Jahre, um nach ganz langsamem Start den Sauerstoffpegel in der Atmosphäre überhaupt erst einmal auf 1 Prozent zu bringen. Damit war aber ein wichtiger Grenzwert für die weitere Entfaltung der Lebewesen erreicht; denn bereits diese geringe Sauerstoffkonzentration hält man für ausreichend, um die primitiven Organismen vor 700 bis 800 Millionen Jahren von der Gärung zur Sauerstoffatmung übergehen zu lassen.

Es scheint so, als ob diese Umstellung den Lebewesen gewaltige Impulse zur Erweiterung der bis dahin recht ärmlichen Formenwelt verlieh, in der einfach gebaute, kugelige Gebilde vorherrschten. Geologen können jedenfalls nachweisen, daß sich etwa von dieser Zeit an die Formenzahl unter den Fossilien fast sprunghaft erhöht. Wahrscheinlich verdanken wir in erster Linie den vor 2,7 Milliarden Jahren erschienenen Blaualgen vom Typ der Stromatolithen jene Pionierleistung, welche den Sauerstoffgehalt der Uratmosphäre von 0,1 Prozent binnen rund 2 Milliarden Jahren auf das Zehnfache ansteigen ließ. Sie

stellen im jüngeren Präkambrium mit ihren an Riffrasen erinnernden Polstern oft die einzigen und massenhaft auftretenden Fossilien dar.

Daß wir den Ausgangswert für den Sauerstoff der Uratmosphäre nicht einfach gleich Null setzen, wie es die völlige Abwesenheit in den vulkanischen Gasen eigentlich verlangt, liegt in einem Effekt begründet, der den Wasserdampf der hohen Atmosphäre betrifft. Die Ultraviolettstrahlung der Sonne vermag einzelne Moleküle des Wasserdampfes in ihre Komponenten (Bestandteile) zu zerlegen – den Wasserstoff, der danach zum Teil in den Weltraum entweichen kann, und den freien Sauerstoff, der wegen seiner Schwere abzusinken in der Lage ist. Da sich einige der „umherirrenden“ Bausteine des Wasserdampfes aber beim zufälligen Zusammentreffen auch wieder zu Molekülen vereinigen, pegelt sich dieses Spaltungs- und Kopplungsspiel auf ein bestimmtes Verhältnis ein, das für den freien Sauerstoff etwa in der Größenordnung eines Tausendstels gegenüber seinem jetzigen Anteil in der Luft liegt. Dies war selbst für die winzigen Urformen des Lebens zuwenig, die als Eobionten bezeichnet werden und die wir uns im wesentlichen als gestaltlich noch wenig differenzierte Eiweißkörper vorzustellen haben. Was sie aber in den Rang von Urlebensformen erhebt, ist ihre Fähigkeit, sich schon durch Teilung zu vermehren.

Man glaubt heute, daß die Eobionten zum Energiegewinn auf „Nahrungsmittel“ angewiesen waren, die aus Verbindungen der Aminosäuren bestanden, welche auf anorganischem Weg, wie wir schon gesehen haben, synthetisiert wurden und später über den Umweg der Niederschläge sozusagen in ihren Lebensbereich unter dem Meeresspiegel hineinregneten oder dorthin verschwemmt wurden. Während diese Eobionten als reine, wenn auch wohlbegründete Vermutung der Wissenschaft anzusehen sind, da jede Spur von ihnen fehlt, liegen erste gesicherte Belege für frühe Lebensreste als echte Fossilien sogar schon mit einem Alter von etwa 3,4 Milliarden Jahren vor. Es handelt sich bei diesen bemerkenswerten Funden unter anderem um kieselige Sedimente aus Südafrika, in denen man Einschlüsse winziger kugeligiger und fadenförmiger, bakterienartiger Gebilde entdeckte.

Funde von Lebewesen, die bereits einen Zellkern entwickelt haben, wozu Bakterien und Blaualgen ja noch nicht zählen, wurden in jüngeren Gesteinen beispielsweise Australiens mit an Grünalgen erinnernden kugeligen Formen gemacht, denen wir ein Alter von knapp 1 Milliarde Jahren zurechnen können. Auch Belege für die anschließenden Entwicklungsetappen des Lebens lieferte dieser Kontinent. Denn ebenfalls in Australien wurde bereits vor etwa zwei Jahrzehnten jene berühmte

Ediacara-Fauna geborgen, welche auch heute noch als die älteste überlieferte Vielzellerfauna der Welt gilt. Ihre an Gliederwürmer und Vorläufer der Dreilappkrebse oder Trilobiten erinnernden Fossilien zeigen durch einen bereits relativ weit differenzierten Formenschatz an, daß das Zeitalter der Einzeller schon mehr als 100 Millionen Jahre vorher zu Ende gegangen sein dürfte.

Während vor 700 Millionen Jahren mit annähernd 1 Prozent Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre die Besiedlung der Flachwasserzonen der Erde möglich wurde, ergab sich die Möglichkeit für die Organismen, das Land zu erobern, etwa seit der Silurzeit vor rund 400 Millionen Jahren, als der nächste große Schritt zur Erweiterung des Lebensraums erfolgte. Mit dem damals vermutlich erreichten Anstieg des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre auf etwa 10 Prozent seines gegenwärtigen Anteils war nämlich nunmehr auch über dem festländischen Bereich infolge der abschirmenden Wirkung des Ozons die Dosis der UV-Strahlung unter ihre lebensgefährdende Stärke gesunken, so daß kosmische Einflüsse eine Besiedlung der Kontinente im großen Stil nicht mehr verhinderten.

Die weitere Entfaltung des Pflanzenlebens verlief dann so explosiv, daß schon seit dem Oberkarbon, das heißt nach kaum 100 Millionen Jahren, der heutige Sauerstoffanteil in der Atmosphäre erreicht worden sein soll. Wir dürfen folglich davon ausgehen, daß spätestens am Ende des Paläozoikums die dritte Atmosphäre der Erde mit der Gegenwart vergleichbare Züge angenommen hatte.

Venus – rätselhafte Schwester der Erde

Um die Jahrhundertwende, als man sich Gedanken über die Marsbewohner zu machen begann, hatte man eigentlich allen Anlaß, die Bedingungen auf der Venus für noch lebensfreundlicher als auf dem Mars zu halten. Schon der Durchmesser mit 12 400 km über den Wolken (gegenüber unseren 12 756 km sind das etwa 95 Prozent!) ergab einen recht erdverwandten Wert, und bei einer Masse um 81 Prozent der irdischen war auch die Dichte mit 5,2 nur wenig geringer als die Durchschnittsdichte der Erde mit 5,5.

Das Venusjahr dauert bei rund 108 Millionen km mittlerem Bahnradius des Planeten knapp 225 Tage, und da er bei lediglich zwei Dritteln der irdischen Sonnenentfernung fast die doppelte Menge solarer

Energie je Flächeneinheit empfängt, sollte er vorherrschend wärmere Klimate aufweisen als die Erde. Es war allerdings anzunehmen, daß ein großer Teil der Wirkung wieder aufgehoben wurde, weil die Venus eine helle, geschlossene Wolkendecke besitzt, die fast genausoviel mehr Sonnenenergie in den Weltraum reflektiert, wie sie als Plus gegenüber der Erde aufnimmt. Die Rotation der Venus ließ sich zwar nicht genau bestimmen, doch wegen der geschlossenen Wolkendecke vermutete man hier ebenfalls unserer Tageslänge sehr nahekommende Werte. Wäre sie erheblich langsamer, dann müßte die einseitige Überhitzung – so glaubte man damals annehmen zu dürfen – auch zu größeren Unstetigkeiten in der Venuswolkendecke führen, und dies hätte man wohl von der Erde aus nicht übersehen. Hinzu kam, daß zu jener Zeit die Wolken als Wasserdampfausscheidungen galten. Somit ergab sich alles in allem ein für den Nachweis von Lebensspuren recht hoffnungsvolles und geschwisterliches Bild dieses Planeten.

Seither mußten wir erleben, wie schon vor Beginn der Raumfahrt fast jede neue Erkenntnis über die Venus dazu beitrug, das Bild ihrer Erdähnlichkeit zu zerstören. Schuld daran waren ausschließlich, wie sich bald herausstellte, ihre atmosphärischen Bedingungen, während sich ihre erdähnlichen sonstigen „Grundmaße“ außer der Rotation nur bestätigten.

Den Hauptschlag erhielt die Hypothese vom Leben auf der Venus, als etwa seit den dreißiger Jahren der hohe Anteil des Kohlendioxids in ihrer Gashülle erkannt wurde. Es dauerte aber noch Jahrzehnte, ehe sich diese Erkenntnis durchzusetzen vermochte. Bis in die Anfangsphase der Raumfahrt hinein führten wiederholte Meldungen von spektralanalytisch angeblich doch nachgewiesenem Wasserdampf in der äußeren Wolkenhülle des Planeten dazu, daß ganz verschiedene Modellvorstellungen über die Beschaffenheit der gesamten Venusatmosphäre nebeneinander bestanden. Alle Informationen stammten ja aus den obersten reflektierenden Schichten des Planeten. Wie es in den 95 Prozent der atmosphärischen Hauptmasse darunter aussah, wußte man damit noch lange nicht.

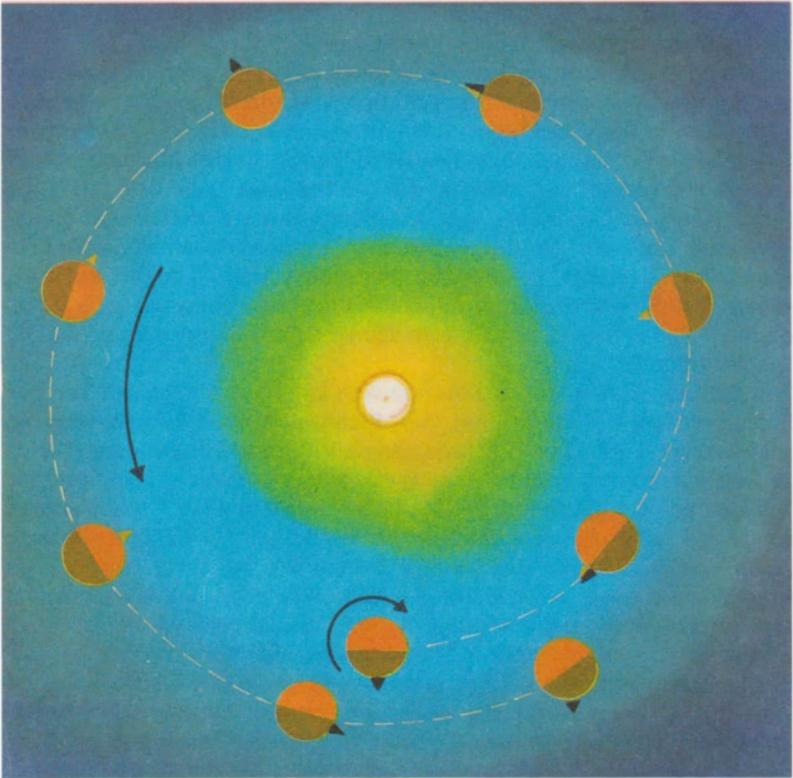
Über die Rotation des Planeten gab es bis vor wenigen Jahrzehnten ebenfalls die widersprüchlichsten Ansichten. Ähnlich wie beim Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre verbreitete sich auch die Erkenntnis, daß es sich um eine sehr langsame Rotation handelt, zunächst nur schrittweise. Schiaparelli hatte schon um die Jahrhundertwende das Venusjahr gleich einer Umdrehung des Planeten setzen wollen. Die Folge dessen wäre, daß die Venus der Sonne ständig dieselbe Hälfte

zuwendet. Ein solches Beispiel einer gebundenen Rotation haben wir mit unserem Mond fast täglich vor Augen.

Mit seiner Vermutung kam Schiaparelli bereits sehr nahe an den heute genau bekannten wahren Rotationswert des Planeten heran, der bei 243 Tagen liegt. Doch was er nicht ahnen konnte, war, daß dieser Himmelskörper sich ausnahmsweise rückwärts dreht. Rückwärts oder retrograd drehend bedeutet in der Astronomie, daß der jeweilige Himmelskörper gegenüber der als Bezugssystem dienenden Bahnbewegung um sein Zentralgestirn eine entgegengesetzt orientierte Eigendrehung besitzt. In unserem Planetensystem ist es bis auf ganz wenige Ausnahmen die Regel, daß die Planeten die Sonne so umkreisen, wie diese selbst rotiert, und daß sie auch mit ihrer Eigenrotation diesem Beispiel folgen.

Im Fall der Venus, deren Rotation sich kaum um 10 Prozent von der Umlaufzeit unterscheidet, hat der Richtungssinn dieser Bewegung einen starken Einfluß auf die Tageslänge. Während ein Venustag – also die Zeit von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten – für einen Beobachter auf der Planetenoberfläche bei „ordentlicher“ oder, wie es fachgemäß heißt, bei rechtläufiger Rotation etwa 7 Erdenjahre dauern würde, verkürzt sich diese riesige Zeitspanne bei ihrer retrograden Eigendrehung auf 118 Tage. Von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang verstreichen also auf dem Planeten „nur“ ganze zwei Monate.

Diese exakten Kenntnisse über die Rotation der Venus verdanken wir aber nicht etwa der Raumfahrt, die heute so unumstritten die führende Rolle in der Venusforschung übernommen hat, sondern der Radioastronomie, speziell den Radarbeobachtungen der Venus von der Erde aus. Etwa seit der Mitte unseres Jahrhunderts hat diese moderne Arbeitsrichtung der Kosmosforschung wesentliche Fortschritte beschert. Trotz der Betonung der Raumfahrterfolge für die kosmische Geologie wollen wir das nicht übersehen. So wurde durch Radarbeobachtungen 1962 erstmals die retrograde Rotation der Venus erkannt. Schon früher – im Jahr 1956 – konnten Radioastronomen aus 3-cm-Wellen, die von der oberflächennahen Schicht der Venus stammten, auf eine dort herrschende sehr hohe Temperatur schließen. Die damals angenommenen 320°C Mindesttemperatur blieben aber nicht das „Ärgste“, womit sich die Anhänger einer bewohnbaren und vielleicht schon lebenstragenden Venus abzufinden hatten: Bereits um 1965 schloß man unter Berücksichtigung des Glashauseffekts bei einem CO₂-Gehalt von über 10 Prozent und einem damals unglaublich klingenden Bodendruck von 50 atm auf tagseitige Oberflächentemperaturen von 750°C Re-



Bahn und Rotationsschema der Venus

Das Phasenschema veranschaulicht durch den umlaufenden Fixpunkt (Dreieck) die Verkürzung des Tag- und Nachtwechsels infolge der „Gegenläufigkeit“ der sonst fast gleichlangen Umlaufs- und Rotationsperioden der Venus.

kordhöhe, die allerdings während der langen Venusnacht bis etwa 350°C absinken sollten. Andere Modelle stellten später die Venus wieder mit weniger hohen Maximaltemperaturen (320°C) und auch viel geringeren Schwankungen zwischen der Tag- und Nachtseite dar. Sie kamen damit der zuerst von sowjetischen Sonden getesteten Wirklichkeit an der Planetenoberfläche schon erheblich näher.

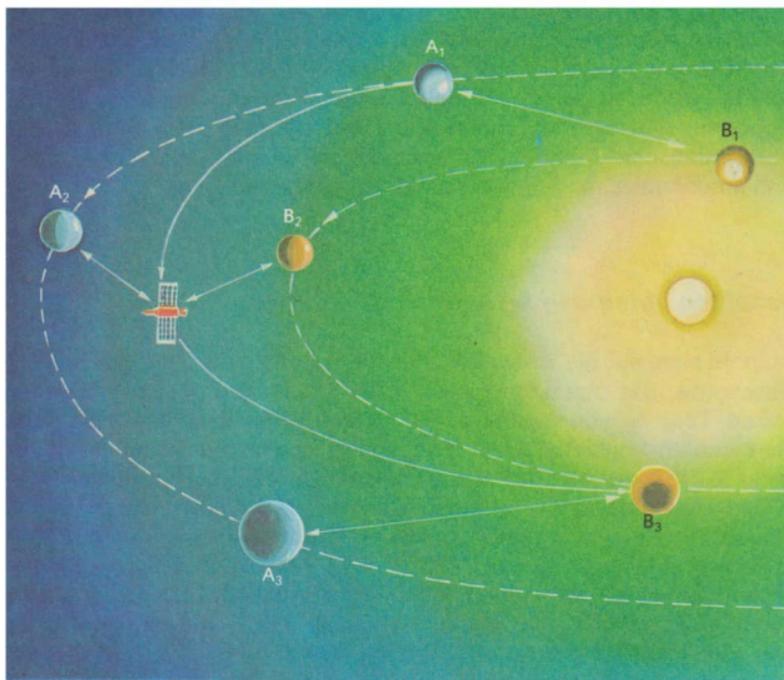
Doch als grundsätzlich richtig können wir keines der zuvor entworfenen Atmosphärenmodelle bezeichnen. Dazu waren die Sonderbedingungen zu extrem und die Summe vieler, nur ungenügend bekannter Faktoren zu schwer kalkulierbar. Erst wenn wir das berücksichtigen, läßt sich der hohe Wert der direkten Beobachtung der Venusatmosphäre und der Planetenoberfläche durch die sowjetischen und amerikanischen Sonden richtig einschätzen.

Satelliten lüften den Schleier

Es lohnt sich, auf die Erkundung der Venus, einen der interessantesten Abschnitte der Raumfahrtgeschichte, etwas länger Rückschau zu halten. Zeigt sich doch gerade hier, welche hohen Schwierigkeitsgrade die Raumfahrttechnik heutzutage schon zu meistern versteht, um immer tiefer in die wahrhaft ungestaltliche Welt dieses Planeten einzudringen.

Der Raumfahrtreport, diese hauptsächlich von sowjetischen Planetensonden bestimmte Forschungsgeschichte, beginnt mit dem Start von „Venus 1“ in der UdSSR am 12. Februar 1961. Nach einigen Erdumkreisungen befolgte die Sonde das Kommando „Kurs Venus“ und begab sich mit ihren 643 kg auf die lange Reise, die bis etwa Ende Mai 1961 dauern sollte.

Auch heute noch können wir „Übergangszeiten“ von 3 bis 5 Monaten als normal und relativ kurz für den Brückenschlag zur Venus bezeichnen. Zu realisieren ist das aber nur, wenn sich günstige Startfenster ergeben, das heißt, wenn die Venus ihrem Minimalabstand zur Erde von immerhin noch reichlichen 40 Millionen km nahe kommt. Solche Begegnungen wiederholen sich entsprechend dem Verhältnis der Umlaufzeiten beider Planeten etwa in einem Rhythmus von rund 19 Monaten oder, genauer, 584 Tagen. Wer das beachtet, ist übrigens in der Lage, weitere mögliche Venusstarts vorauszusagen; denn seit Februar 1961 blieb kaum eines der nur wenige Wochen offenstehenden Startfenster ungenutzt. Hier die Abfolge der Startfenster: Januar/Februar 1961, August/September 1962, April 1964, September 1965, Juni 1967, Januar 1969, August/September 1970, April 1972, September 1973, Juni 1975, Januar 1977, August/September 1978, April 1980, September 1981, Juni 1983, Januar 1985, August/September 1986, April 1988, September 1990 usw. Wer genauer hinschaut, erkennt einen interessanten Rhythmus: Alle 8 Jahre wiederholen sich die gleichen Start-



3-Phasen-Schema einer Satellitenübergangsbahn zur Venus

A₁-B₁ = Startbedingungen (Erde A₁ hat Vorlauf vor Venus B₁)

A₂-B₂ = Stand nach rund 2 Monaten (Erde und Venus etwa auf gleicher Höhe; Sonde hat Vorlauf vor beiden)

A₃-B₃ = vergrößerter Abstand Erde – Venus bei Ankunft der Venus-sonde nach rund 4 Monaten

fenster. Was steckt dahinter? Mit nur einem einzigen Tag Unterschied entsprechen 13 Umläufen der Venus 8 ganze „Erdenjahre“.

Schon 14 Tage nach dem Start hatte „Venus 1“ annähernd die zehnfache Mondentfernung erreicht, da riß plötzlich der Funkkontakt ab. Heute wird angenommen, daß ein besonders intensiver Schauer der solaren Teilchenstrahlung die nicht zu behobende Funkstörung verursachte.

Das nächste Startfenster benutzten die USA für ihre ersten Venus-unternehmen. Aber auch hier stellte sich der Erfolg nicht gleich ein.

Nach einem Fehlstart von „Mariner 1“ am 22. Juli 1962 gelang es dann doch noch, dieses Startfenster am 27. August 1962 durch „Mariner 2“ zu nutzen. Geplant war „nur“ ein Vorbeiflug, der unter Funkkontakt in 34 600 km Abstand schon nach 109 Tagen, am 14. Dezember 1962, erfolgte. 35 Minuten lang belauschten die Meßinstrumente der passierenden Sonde die Oberfläche des Planeten. Sie erkannten nach Mikrowellenmessungen, daß am Boden Temperaturen von mehr als 430°C herrschten, sowie aus der Infrarotstrahlung, daß sie in der Wolkenoberschicht nur -40°C betrogen. Außerdem ließ sich das Fehlen eines mit der Erde vergleichbaren Magnetfelds und damit natürlich auch eines Strahlungsgürtels nachweisen. Als 20 Tage später der Funkkontakt endete, hatte sich die Sonde bereits 86 Millionen km von der Erde entfernt; das ist mehr als das Doppelte des minimalen Abstands der Venus zur Erde.

Mit „Venus 2“ und „Venus 3“ startete die Sowjetunion dann 1965 ihr erstes Doppelunternehmen. Dabei hatte „Venus 2“ den Auftrag, ähnlich wie „Mariner“ im Vorbeiflug den Planeten „abzuhorchen“, während mit „Venus 3“ die erste weiche Landung vorgesehen war. Leider riß in der entscheidenden Spätphase der Mission abermals der Funkkontakt zu beiden Sonden ab, so daß der Vorbeiflug von „Venus 2“ in nur 24 000 km Entfernung und die Landung, die mit nicht mehr als 450 km Abweichung vom Zielgebiet erfolgt sein soll, ohne registrierte Daten auf der Erde blieben.

Die Wiederholung des Landeunternehmens vom Startfenster 1967 aus brachte den sowjetischen Wissenschaftlern und Technikern dann endlich den ersten großen Erfolg. Diesmal konnten Meßdaten der Sonde „Venus 4“ bei ihrem Abstieg am 18. Oktober 1967 nach einem 128-Tage-Flug schon bis tief in die Wolkenschicht hinein empfangen werden. Zuletzt ergaben sich aus einer nicht genauer zu bestimmenden Höhe von 50 bis 60 km über der Oberfläche bereits Temperaturen von +40°C und ein Druck von 0,7 atm. Das wäre etwa das Tausendfache des irdischen Atmosphärendrucks in vergleichbarer Höhe.

Viel wichtiger als diese physikalischen Werte aber war die erstmalig durchgeführte und zur Erde vermittelte chemische Bestandsaufnahme der Hochatmosphäre unseres Nachbarplaneten. Das Ergebnis der Gasanalysatoren lautete:

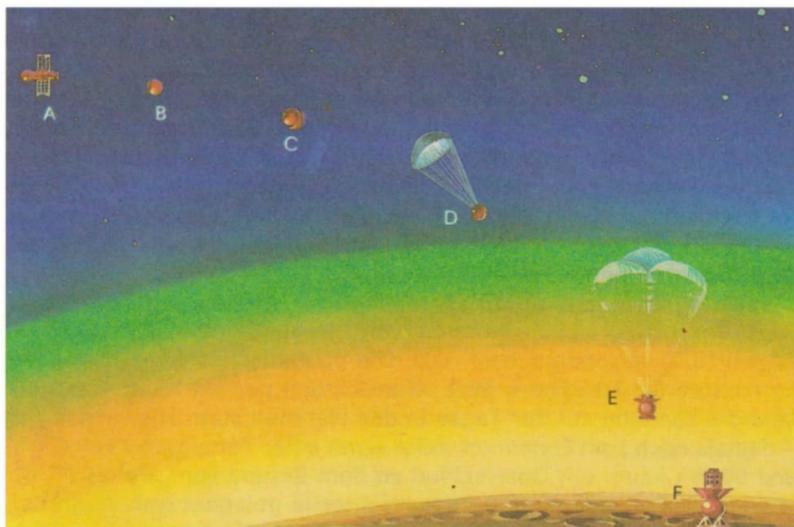
- 80 bis 95 Volumenprozent Kohlendioxid,
- 0,4 bis 0,8 Volumenprozent molekularer Sauerstoff,
- etwa 7 Volumenprozent Stickstoff,
- 0,1 bis 0,7 Volumenprozent Wasserdampf neben Edelgasspuren.

Damit wurde endgültig der spektralanalytisch bereits erkannte hohe Kohlendioxidgehalt der Venusatmosphäre bewiesen, und zwar in einer die Erwartungen fast noch übertreffenden hohen Konzentration. Die Wissenschaftler hatten daher großes Interesse, zu erfahren, ob sich die tieferen Schichten der Venusatmosphäre ähnlich zusammensetzen. Dies festzustellen war die Aufgabe des nächsten sowjetischen Doppelunternehmens von 1969.

Wiederum während eines Vorbeiflugs führte aber zunächst noch die zweite amerikanische Venussonde genauere Messungen durch. Sie wurde nur zwei Tage nach „Venus 4“, am 14. Juni 1967, gestartet und passierte lediglich einen Tag nach der Ankunft der sowjetischen Sonde die Venus, wobei sie ihr bis auf 4000 km nahe kam. Neben einer Bestätigung beziehungsweise Verbesserung der Aussagen über das Magnetfeld und die Temperaturen der Hochatmosphäre ließ sich auch die Masse der Venus mit 0,81500 (die der Erde gleich 1 gesetzt) genauer bestimmen.

Beim Abstieg von „Venus 5“ und „Venus 6“ im Mai 1969 konnte dann der Funkkontakt mit beiden Sonden bis in noch tiefere Schichten des Planeten hinein aufrechterhalten werden. Wie schon bei „Venus 4“ erfolgte der Abstieg in die Atmosphäre auf der Nachtseite des Planeten, diesmal mit einem Abstand der Landepunkte von nur 300 km. Die entscheidende Meßstrecke von annähernd 40 km Länge durchsanken die Sonden am Bremsfallschirm in reichlich 50 Minuten, und ihre letzten Daten erfaßten ein Druckniveau von 27 atm, wobei die Temperatur bereits auf 320 °C angestiegen war. Begonnen hatten die Messungen bei 0,5 atm und 25 °C in etwa 60 km Höhe, woraus sich ein günstiger Anschluß an die Messungen von „Venus 4“ ergab. Nach Daten der Radarhöhenmesser beider Sonden, die mit einiger Vorsicht auszuwerten sind, überspannte das 27-atm-Druckniveau ein Gelände mit erstaunlichen Höhenunterschieden. So soll die feste Oberfläche noch rund 25 km unter „Venus 5“ gelegen haben, während für „Venus 6“ lediglich 10 bis 12 km Abstand angezeigt wurden. Ob solche Höhenunterschiede für die Venus typisch sind, können wir bis heute nicht sicher sagen, doch eine Teilantwort läßt sich schon aus den folgenden sowjetischen Satellitenergebnissen ableiten.

Da die auch während der Abstiegsphase funktionstüchtig bleibenden Gasanalysatoren der Sonden erneut die chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre testeten, konnten die bisherigen Befunde bestätigt und präzisiert werden. Für das Kohlendioxid ergaben die neuen Werte von 93 bis 97 Volumenprozent, daß der obere Grenzbereich der



Phasen des Abstiegs einer sowjetischen Venussonde zur weichen Landung (Schema)

A = in Venussatellitenbahn einschwenkender Raumflugkörper

„Venus 9“ mit kugelförmigem Landeteil (B)

C = Beginn des Abstiegs in der Hochatmosphäre

D = Öffnung des ersten Bremsfallschirms

E = Nach Absprengen des kugelförmigen Hitzeschildes gleitet der vergrößert dargestellte Lander am dreifachen Hauptfallschirmsystem durch die Wolkenschicht der Venus zur Oberfläche (F).

„Venus-4“-Analyse, die noch eine Unsicherheitsspanne zwischen 80 und 95 Volumenprozent enthielt, am realistischsten sein dürfte. Dagegen lag der Stickstoffanteil mit 2 bis 5 Volumenprozent deutlich unter der ersten Messung. Ferner wurden im Wolkenniveau um 60 km Höhe Spuren von 4 bis 11 mg/l Wasserdampf bestimmt.

Die sowjetischen Raumfahrttechniker nutzten die Erfahrungen mit den bisherigen Landemanövern für die Planung der nächsten Schritte. Sie wußten nun, welcher enormer Druck und welche hohe Temperaturen wirklich am Venusboden zu erwarten waren, und konstruierten für das nächste Startfenster mit „Venus 7“ ein Landegerät, das sogar noch bei 180 atm Außendruck und 530 °C arbeitsfähig sein sollte. Nach dem Start

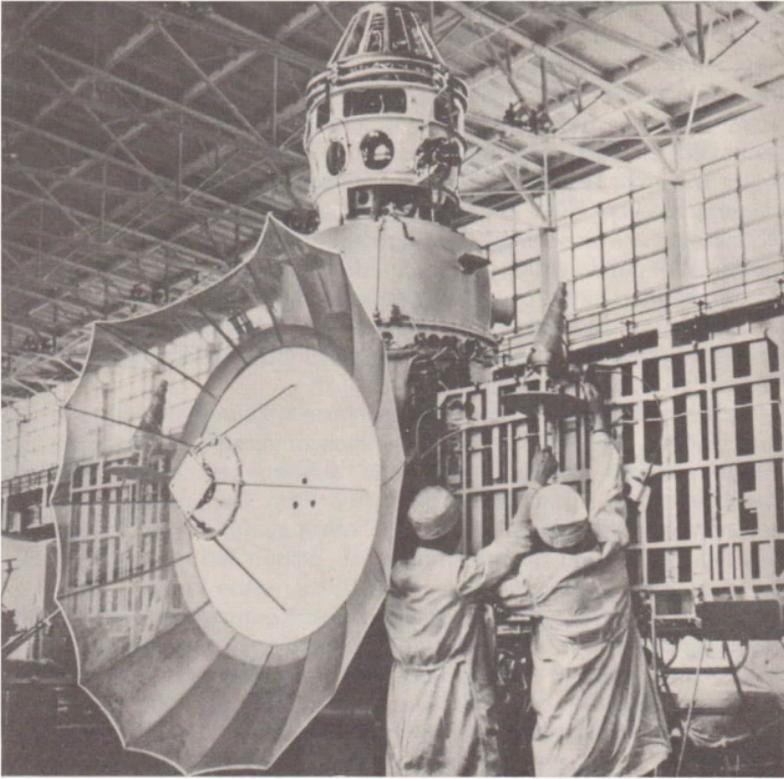
am 17. August 1970 und den „üblichen“ 120 Tagen Überfahrt glückte auch am 15. Dezember 1970 tatsächlich die erste weiche Landung mit Funkkontakt. Eigentlich müßten wir einschränkend sagen: mit „halbem“ Funkkontakt; denn nicht alle Meßinstrumente blieben bis zum Aufsetzen funktionsfähig, und in den letzten 23 Minuten des knapp einstündigen Abstiegs verringerte sich die Signalstärke auf ein Hundertstel der normalen Intensität. Dennoch gelang es mit Hilfe raffinierter Computeranalysen, aus den Radiosignalen einige wichtige Daten zu entschlüsseln. Danach herrschten am Landepunkt ein Druck von 90 ± 15 atm und eine Temperatur von 475°C .

Bei dem nächsten Unternehmen fiel der wissenschaftliche Ertrag dank der erfolgreichen Mission von „Venus 8“ (27. März 1972 bis 22. Juli 1972) besonders hoch aus. Die sowjetischen Spezialisten beherrschten ihr Handwerk jetzt offensichtlich perfekt. Zum erstenmal fand die Landung auf der Tagseite des Planeten statt. Hier ergab sich – damals noch zum Erstaunen vieler – mit einer Temperatur von 470°C und 90 atm kaum ein Unterschied zu dem Befund von „Venus 7“, die ja wie alle Sonden zuvor auf der Nachtseite gelandet war. Allerdings sollte die geringe Entfernung des „Venus-8“-Landeplatzes von der Tag- und Nachtgrenze, dem Terminator, bei der Einschätzung dieser Temperaturähnlichkeit nicht außer acht bleiben. Der Abstand zur Tag- und Nachtgrenze wird nämlich nur mit rund 500 km oder 5° angegeben.

Auch die Analysedaten zur Chemie der Venusatmosphäre brachten wie schon der Vergleich zu den älteren Wertungspaaren Ergänzungen und neue Erkenntnisse: Kohlendioxid jetzt sogar 97 Volumenprozent (!), Stickstoff (nur!) 2 Prozent, Sauerstoff weniger als 0,1 Prozent, Spuren von Ammoniak (NH_3) 0,01 Prozent und in Wolkenhöhe Spuren von Wasserdampf, ebenfalls sicher unter 1 Prozent – das waren die bedeutendsten Ergebnisse.

Die wichtigsten Daten über den Aufbau der Venusatmosphäre können wir nach diesem Raumfahrtunternehmen in einem Satz ungefähr so zusammenfassen: In der bis zu 97 Volumenprozent aus CO_2 bestehenden Atmosphäre des Planeten Venus herrscht an der Oberfläche ein enorm hoher Bodendruck von etwa 90 atm bei einer Temperatur zwischen 460 und 490°C . Selbstverständlich schließt dies, bezogen auf die gesamte Oberfläche, weitere Variationen nicht aus, wie sie sich zum Beispiel infolge größerer Höhenunterschiede zwangsläufig einstellen müssen.

Durch jüngere Raumfahrtunternehmen und Beobachtungen von der Erde aus gelang es auch, die interessante Frage zu klären, ob die



*Sowjetische interplanetare automatische Station „Venus 8“
in der Montagehalle*

Venuswolkenfelder mit oder entgegen dem Rotationssinn des Planeten treiben. Die ersten Informationen über eine zwar ebenfalls retrograde, aber viel schnellere Rotation der Venusatmosphäre gegenüber dem festen Planetenkörper ergaben sich schon aus optischen Rotationsbestimmungen. Von der Erde aus kam man von 1966 bis 1967 zu Werten für einen Umlauf der Gasmassen zwischen 4 und 5 Erdentagen. Nachdem man danach eine Zeitlang auch 6 Tage für möglich oder richtig hielt, sieht man heute den Bewegungsablauf viel differenzierter mit Phasen der Beschleunigung und der Verzögerung, also mit Pulsationen,

welche die Abweichungen der Meßergebnisse verschiedener Jahre verständlich machen.

Schließlich wurden diese Beobachtungen 1974 durch „Mariner 10“, die erfolgreiche amerikanische Venus-Merkur-Sonde, auch im Bild festgehalten. Es gelang nämlich, einen schnellen Vorbeiflug an der Venus, der sich schon 94 Tage nach dem Start am 5. Februar 1974 mit einem Minimalabstand von 5 300 km vollzog, etwa 4 Tage lang zur Erzeugung von über 3 000 Bildern durch zwei Fernsehkameras zu nutzen. Die meisten erwiesen sich als völlig strukturlos. Interessante Konturen wurden aber auf den Bildern sichtbar, die man aus der Ultraviolettstrahlung gewonnen hatte. Der Wechsel heller und dunkler Wolkenfelder, den sie zeigen, ist so zu deuten, daß den dunklen Flecken jeweils ein wärmeres und tiefer liegendes Gebiet der im Durchschnitt 65 km hoch reichenden Wolkenregion entspricht.

Das Strömungsprinzip des auf diese Weise mit einem Blick erfäßbaren Windsystems der Venus ist relativ einfach zu verstehen. Turbulenz mit unregelmäßigen Wolkenformen, die schwach an unsere irdische Quellbewölkung erinnern, herrscht über den Gebieten, über denen die Sonne annähernd senkrecht steht. Mehr zu den Polen hin zeichnet sich eine Streckung dieser Gebilde ab. Schon bei etwa 40 bis 50° Breitenlage schließen sie sich allmählich zu viele tausend Kilometer langen Strömungsbändern zusammen, deren Konturen nach 200 bis 300° spiralem Umlauf in Richtung der Pole wieder verlorengehen.

Wir haben bei der Information über die erfolgreiche sowjetische „Venus-8“-Mission bisher nur jene neuen Daten genannt, welche die Atmosphäre des Planeten betreffen. Diese Sonde funkte jedoch zum erstenmal auch Daten über den Gesteinsaufbau der Venusoberfläche zur Erde. So verlagert sich gewissermaßen als Folge des technischen Fortschritts der Schwerpunkt der Venusforschung mehr und mehr auf die Untersuchung der festen Kruste des Planeten. Die zur Unterscheidung der Gesteinsarten wichtigen ersten Bestimmungen der Kalium- und Urangelhalte am Landeplatz der Sonde „Venus 8“ ergaben am ehesten Ähnlichkeiten mit unseren Graniten, was schon jetzt auf wesentliche Unterschiede zur Krustenentwicklung beispielsweise von Mars, Mond und Merkur schließen läßt.

Die Bodenuntersuchungen wurden im Rahmen des dritten sowjetischen Doppelunternehmens durch „Venus 9“ und „Venus 10“ konsequent fortgesetzt, die beide das Startfenster vom Juni 1975 benutzten und nach einem Flug von rund 135 Tagen Ende Oktober voll funktionsfähig das vorgesehene Zielgebiet, wieder auf der Tagseite des Planeten,



Strömungsstrukturen in der Venusatmosphäre, am 9. Februar 1974 von „Mariner 10“ aus etwa 2 Millionen km Entfernung aufgenommen

erreichten. Ihre Panoramakameras lieferten uns die ersten Fotos von der Venusoberfläche. Die Landepunkte der beiden Sonden lagen 2200 km voneinander entfernt, dennoch waren auf ihren Bildern sehr ähnliche, relativ grobe Blockfelder oder Schuttmassen zu erkennen und keine Sanddünen, wie man es zuvor noch für am wahrscheinlichsten gehalten hatte.

In Übereinstimmung mit den von „Venus 10“ erstmalig in Bodennähe festgestellten Windgeschwindigkeiten um 1 m/sec läßt dies bei zeit-

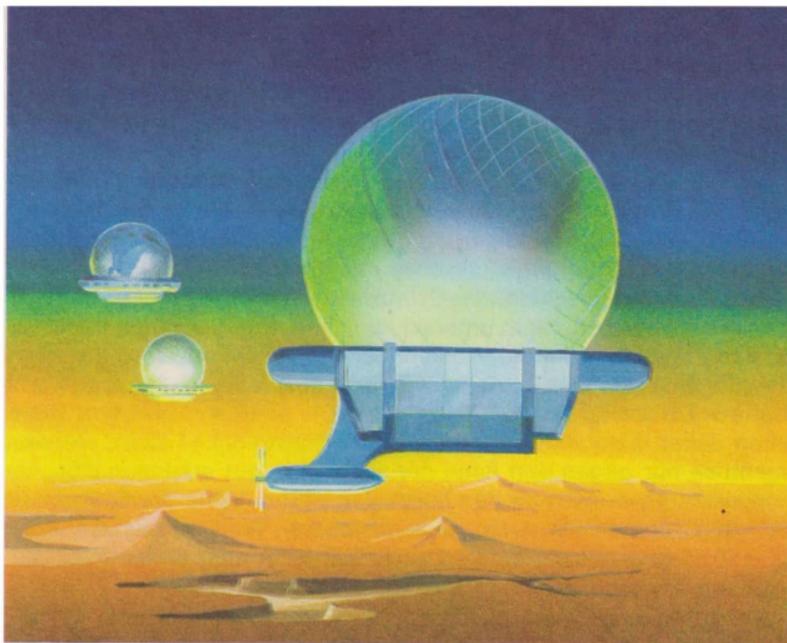
weilig unbeständigem Venuswetter auf Windfrachtung schließen. Wir dürfen damit rechnen, daß Sand oder Staub in größeren Senken zusammengeweht worden ist. Sollte es Meteoritenkrater auch auf der Venus geben, vielleicht sogar zahlreicher als auf der Erde, dann könnten sie die Rolle der Sandfänger gespielt haben.

Zum erstenmal erhielt die Venus durch dieses sowjetische Raumfahrtunternehmen zwei künstliche Satelliten; denn nach Abtrennung der Landegeräte blieb je eine Meßsonde in der Venusumlaufbahn.

In der Venusforschung wurde so eine neue Etappe eingeleitet, die von der sporadischen Erkundung über die Stufen des Vorbeiflugs und stichprobenartiger Tests zu immer längeren Verweilzeiten im planetennahen Raum beziehungsweise auf der Planetenoberfläche selbst führte. Im Dezember 1978 fand sie durch die erfolgreichen sowjetischen Landeunternehmen mit „Venus 11“ und „Venus 12“ sowie durch den ersten amerikanischen Satelliten, der den Planeten umkreist, ihre nächste konsequente Fortsetzung. Falls es die atmosphärischen Sonderbedingungen zulassen, könnte sich in Zukunft auch der Einsatz von Ballons für die Bestimmung der Beschaffenheit der Venusoberfläche als eine sehr nützliche Methode erweisen. Ansonsten wäre eine automatische Gesteinsprobeentnahme mit anschließendem Rücktransport zur Erde sowie eine detaillierte Radarvermessung des gesamten Reliefs dasjenige, was der Wissenschaft von der Venus in nächster Zeit vielleicht am besten weiterhelfen würde.

*Venusoberfläche, am 22. Oktober 1975 vom Landeapparat der sowjetischen Sonde „Venus 9“ zum erstenmal fotografiert
Das Panorama zeigt bis zu 0,5 m große, zum Teil leicht gerundete Felsblöcke.*





Forschungsballoons in der Venusatmosphäre (Zukunftsprojekt)

Gift in der Venusatmosphäre

Als ungelöste Probleme gelten bis heute vor allem wesentliche Detailfragen zur Beschaffenheit beziehungsweise zum Aufbau der Venuswolkendecke. Erinnern wir uns: Bis in die dreißiger Jahre hinein glaubten noch viele oder hoffte man ganz allgemein, eines Tages würde sich bestätigen, daß die Wolken der Venus nichts anderes als kondensierter Wasserdampf sind. Dieser Gedanke war zu verlockend, vor allem in seinen Folgen für die Idee einer belebten Venus. Dem Wunschdenken, nicht allein zu sein im Weltall, widersprachen die modernen Daten so sehr, daß der längst durch Fakten erzwungene Abschied von den alten Vorstellungen nur sehr langsam populär werden konnte.

Auf der Venus gibt es kein Leben! Schlimmer noch, ihre Atmosphäre

ist sogar äußerst giftig! Zum erstenmal hatten 1922 zwei Forscher ein nicht nur spekulativ entworfenes „trockenes Atmosphärenmodell“ der Venus veröffentlicht. Staub, so erklärten sie, beherrsche das Gesicht der Venus. Staubstürme und Staubwolken verhüllten den Planeten ganz und gar, und vielleicht geschehe dies in einer sehr kohlendioxidreichen Atmosphäre.

Wir wollen es kurz machen: Nach modernen Auffassungen bilden etwa zu 80 Prozent feinste Schwefelsäuretröpfchen die Wolkenzone der Venus. Zu dieser Schlußfolgerung führte das Abwägen der verschiedenen heute bekannten physikalischen und chemischen Werte.

Als äußerste wahrscheinliche Grenzen der Wolkenschicht können wir nach den bisherigen, recht unterschiedlichen Angaben 40 km Höhe für die Basis und 80 km für die Wolkenoberkante ansehen. Nach jüngeren Messungen ist die konzentriertere Schicht aber lediglich 20 km dick und liegt etwa zwischen 50 und 70 km Höhe. Die oberen reichlichen 15 km sollen dabei mehr den Charakter einer Dunstglocke haben, die sich eigentlich nur gegen den Rand der Venus hin gut erkennen läßt. Als Temperaturen wurden für den Bereich um 65 km Höhe Werte von -40 bis -50°C und an der noch etwas unsicheren Wolkenbasis von mehr als $+50^{\circ}\text{C}$ genannt bei einem Druck, der nahe dem Bodendruck der irdischen Atmosphäre liegen soll.

Welche fremden atmosphärischen Bedingungen auf unserem Nachbarplaneten herrschen, erkennen wir noch besser, wenn wir uns neben diesen chemischen die wesentlichsten physikalischen Unterschiede zwischen den Atmosphären von Erde und Venus ins Gedächtnis rufen. Die irdische Wolkenschicht überschreitet nur selten eine Mächtigkeit von 5 km, und sie ist auch auf Höhen unter 12 km beschränkt, wobei ein deutlicher Schwerpunkt für die zu Niederschlägen führende Cumulus-(Haufen-) und Stratus-(Schicht-) Bewölkung zwischen 1 und 5 km über dem Erdboden liegt. Demgegenüber hat die Venusbewölkung mindestens die fünffache Dicke und fängt erst in zehnfacher Höhe an.

Hinzu kommt, daß sich die Venusatmosphäre in ihrer Lichtdurchlässigkeit erheblich von der irdischen unterscheidet. Lediglich 2 bis 4 Prozent des einfallenden Sonnenlichts erreichen nach den Messungen der sowjetischen Venussonden 8 bis 10 die Oberfläche des Planeten, und dies läßt die Landschaft vergleichsweise nur etwa im Dämmerchein eines trüben Novembertags erkennen.

Ansätze zur Erklärung, wie eine so heiße und kohlendioxidreiche, aber zugleich so reaktionsfähige Stoffe beherbergende Venusatmosphäre überhaupt entstehen konnte beziehungsweise wodurch sie

sich zur heutigen Beschaffenheit umformen mußte, gibt es zwar, aber sie lassen viele Fragen offen.

Als erstes, noch nicht voll bewiesenes Argument dient, daß die Venus bereits von vornherein erheblich wasserstoffärmer war als unsere Erde. Sie entstand ja bedeutend sonnennäher, und die intensivere Teilchenstrahlung unseres Zentralgestirns, der Sonnenwind, trieb die leichteren Elemente nach außen, so daß sich ihr Anteil im Protoplaneten verminderte.

Zweitens wird angeführt, daß die geringere Masse und das damit schwächere Kraftfeld der Venus auch einen verstärkten Wasserstoffverlust mit sich bringen muß.

Das dritte Argument ist der Hinweis auf die Bestrahlungstemperatur. Danach ließ die größere Sonnennähe der Venus deren Oberfläche niemals die Abkühlungsstufe der Erde erreichen, bei der Wasser kondensationsfähig wurde.

Das Zusammenspiel dieser Kräfte hätte dann im Vergleich zur Entwicklungsgeschichte der Erdatmosphäre ungefähr folgende Wirkung: Auch der Protoplanet Venus ballte sich im sogenannten kalten Zustand bei Temperaturen unter dem Schmelzpunkt der Silikate zusammen. Die leichtflüchtigen Elemente wurden, verglichen mit der Erde in geringerer Menge, mit in diese Ursubstanz eingebaut. Die den Planeten einhüllenden Gase führten zunächst Ammoniak und Wasserstoff noch in größerem Umfang, ähnlich wie die erste Atmosphäre der Erde. Bald wurden diese aber Opfer der starken Aufheizung der jungen Venusmasse, ausgelöst vor allem durch die eingefangenen radioaktiven Elemente im Verein mit intensiverer Sonnenstrahlung.

Eine neue, zweite Atmosphäre muß sich dann in der anschließenden Abkühlungsphase wie auf der Erde als Produkt der vulkanischen Entgasung entwickelt haben. Kohlendioxid und Wasserdampf wurden zu vorherrschenden Bausteinen dieser neuen Gashülle des Planeten. Aber – und jetzt sind wir an dem Punkt angelangt, wo sich die Entwicklungswege der beiden Planetenatmosphären trennen – die Abkühlungsprozesse erreichten auf der Venus niemals so niedrige Temperaturen wie auf der Erde. Eine Hydrosphäre wurde nicht gebildet. Regen aus der Uratmosphäre verdampfte vollständig, während er in die heißen tieferen Schichten fiel, wie es sich, wahrscheinlich aber nur vorübergehend, zunächst auch auf unserem Planeten abgespielt haben mag. Auf der Erde erreichten eines Tages dann doch Tropfen die feste Kruste und „verzickten“ schließlich nicht mehr, und die ersten Senken füllten sich mit wahrscheinlich recht heißem Wasser.

Anders auf der Venus: Hier blieben die möglichen Ozeanböden zu heiß und folglich trocken. Damit entfiel aber auch das Lösungsmittel für den ständig wachsenden Kohlendioxidgehalt der Venusatmosphäre. Sedimente wie Kalkstein, in denen das Kohlendioxid im festen Mineral an Kalzium gebunden vorliegt, konnten sich hier nicht bilden. Der verbleibende Kohlendioxidgehalt der Venusatmosphäre bremste sogar zunehmend die Abkühlung; denn er verstärkte den Glashauseffekt, den diese Moleküle wie auch die des Wassers durch ihre die Wärmestrahlung verschluckenden Eigenschaften in der Atmosphäre hervorrufen. Es wurde wieder wärmer auf der Venus – und dies um so mehr, je dichter die Gasmassen sie einzuhüllen vermochten.

Die starke ultraviolette Strahlung der Sonne tat wahrscheinlich das übrige, um den einmal eingeschlagenen Entwicklungsweg der Venusatmosphäre fortzusetzen. Durch sie wurde nämlich in der höheren Atmosphäre die Trennung der Wasserdampfmoleküle in ihre Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff bewirkt. Während der freie Wasserstoff zum großen Teil nunmehr ungehindert in den Weltraum entweichen konnte, weil die Bewegung seiner Atome leicht die Barriere der Fluchtgeschwindigkeit zu überwinden vermochte, sank der schwerere und damit „trägere“ Sauerstoff bis in die bodennahen Schichten der Venus ab, wo er vermutlich gierig von sauerstoffuntersättigten Substanzen, eventuell unter Metalloxydbildung, eingefangen wurde. So stieg der Kohlendioxid- und sank der Wasserdampfgehalt Schritt für Schritt, bis sich die chemischen Verhältnisse herausgebildet hatten, welche die sowjetischen Sonden in der Venusatmosphäre antrafen. Die noch jetzt dort meßbaren Spuren von Wasserdampf faßt man heute sozusagen als Durchläufer auf. Sie wurden erst vor relativ kurzer Zeit aus der Gesteinsmasse der Venus befreit und spielen nur eine Gastrolle in der Gashülle ihres Planeten, bis die solare UV-Strahlung auch sie aufspaltet und die Wasserstoffkomponente entweichen kann.

Die Entgasung aus dem Planeteninnern ist ja bis heute sowohl auf der Venus als auch auf der Erde kein abgeschlossener Vorgang. Vielleicht klingen die Zahlen für einige erstaunlich, ja unglaublich, aber man schätzt tatsächlich, daß die zum Beispiel noch im Erdmantel gelöst enthaltene Menge des irdischen Wassers mit $4 \cdot 10^{18}$ t sogar dreimal umfangreicher ist als die bereits in den Ozeanen vereinigte Menge, die nur $1,4 \cdot 10^{18}$ t beträgt.

In diesem Zusammenhang können wir gleich eine weitere Frage beantworten. Der gegenüber den irdischen Bedingungen enorm gesteigerte Kohlendioxidgehalt der Venusatmosphäre – das Verhältnis

seiner Masse zum atmosphärischen Kohlendioxid der Erde beträgt ja etwa 30000 : 1 — bedeutet keineswegs, daß die glutflüssige Gesteinschmelze, das Magma, der Venus bisher mehr Kohlendioxid aushauchte, wie sich leicht schlußfolgern ließe. Rechnen wir nämlich auf der Erde die im Vergleich zum atmosphärischen Kohlendioxid fünfzigmal größere, im Ozean gelöste Menge hinzu und addieren auch noch die Menge des in den Sedimenten gebundenen Kohlendioxids, die diesen Betrag fast um das Zwanzigfache übersteigt, so kommen wir auf sehr nahe beieinander liegende Werte. Ausgedrückt in Gramm je Quadratzentimeter zur Verfügung stehender Entgasungsfläche, ergeben sich ungefähr $8,5 \cdot 10^4$ g für die Erde und $9 \cdot 10^4$ g für die Venus. Selbst bei einer Fehlergrenze von 50 Prozent würde dieses Zahlenpaar noch die nahe Verwandtschaft der beiden Entgasungsprozesse belegen. Von „Geburt“ her sind Venus und Erde eben doch unverkennbar Geschwister; ihre Atmosphären haben sich nur sehr auseinander entwickelt.

Vulkanausbrüche — warum?

Die Versuchung ist groß, schon jetzt über Form und Größe der atmosphäreerzeugenden Vulkane der Venus zu spekulieren. Sind sie vielleicht noch höher als unsere eigenen? Wie verteilen sie sich über den Planeten? Gibt es wie bei uns Vulkangebiete, in denen sie sich dicht an dicht reihen, und andererseits Flächen kontinentalen Ausmaßes, die fast frei von ihnen sind? Und hat die Venus überhaupt noch heute tätige Vulkane, oder ist der Vulkanismus erloschen? Befand sich vielleicht im Mai 1969 die sowjetische Sonde „Venus 6“ über einem solchen Vulkanmassiv, als sie aus fast gleichem Druckniveau von 27 atm wie ihre lediglich etwa 300 km entfernte Zwillingssonde „Venus 5“ nur noch 10 bis 12 km Bodenabstand zur Erde funkte, während ihre Nachbarin das Doppelte angab?

Diese und ähnliche Fragen beschäftigen die Planetologen natürlich schon seit geraumer Zeit. Von einer befriedigenden Antwort sind wir aber noch sehr weit entfernt. Trotzdem wollen wir versuchen, wenigstens Teillösungen zu finden.

Was zwingt uns eigentlich anzunehmen, daß es Venusvulkane geben müsse? Etwa der Lehrsatz, wonach die Planetenatmosphären zumindest der erdähnlichen Himmelskörper innerhalb der Jupiterbahn Produkte der vulkanischen Entgasung sind? Unser Mond und der sonnennahe

Merkur besitzen ja auch keine Vulkane oder, vorsichtiger ausgedrückt, wenigstens keine der irdischen „Normalform“; aber sie haben bestimmt Prozesse einer magmatischen Entgasung durchgemacht. Wenn ihre feste Kruste heute atmosphärefrei erscheint, so doch nur, weil das geringe Kraftfeld dieser kleinen Himmelskörper nicht ausreichte, die Fluchtbewegungen der Gasmoleküle unter ihre spezifische Entweichgeschwindigkeit zu zügeln.

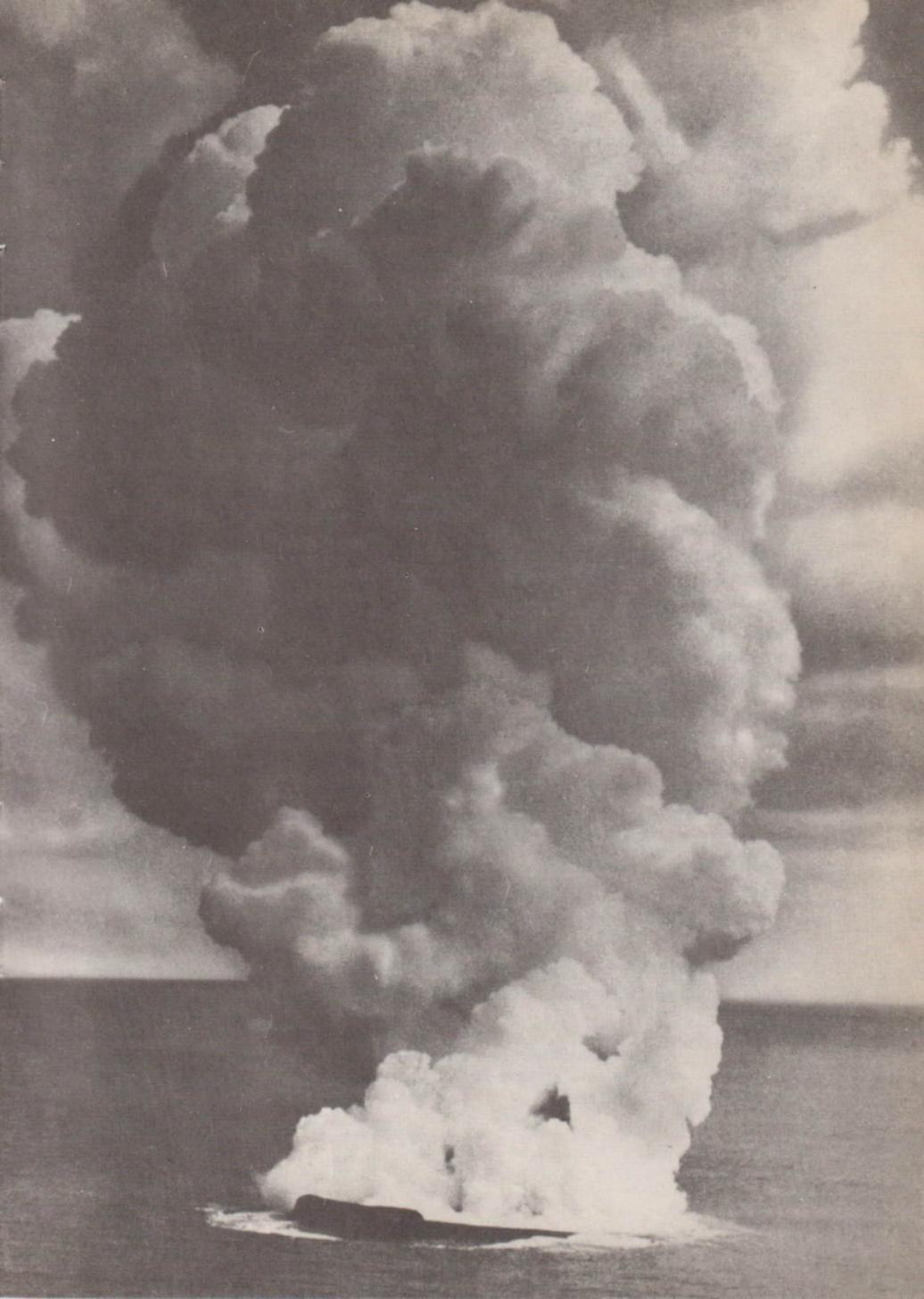
Bereits dieser erste Vergleich bringt uns auf einen ganz neuen Gesichtspunkt, nämlich die verschiedenartigen Formen der Entgasung aus dem Planeteninnern. Muß es denn grundsätzlich zu Erhebungen, zur Entstehung großer Vulkanberge kommen, wenn sich das Gas aus dem Planetenkörper preßt? Ist es nicht vielmehr verwunderlich, daß zum Beispiel auf der Erde eine solche Menge Gas aus einer fast punktförmigen Quelle, wie sie die rauchenden Schloten vieler Vulkane im Vergleich zur sonstigen Erdoberfläche nun mal darstellen, austreten kann?

Oft wird von einer magmatischen Entgasung wie von einer selbstverständlichen und zwingenden Folge der planetarischen Abkühlung gesprochen. Aber wäre es nach den physikalischen Gesetzen, die uns jeder Kochtopf vor Augen führt, eigentlich nicht gerade umgekehrt zu erwarten? Erwärmung einer Lösung treibt die Gase aus der Flüssigkeit. Andererseits wird uns beim Öffnen einer Seltersflasche demonstriert, daß der Druck eine entscheidende Rolle für die Menge der löslichen Gase in einer Flüssigkeit spielt.

Drucksteigerung und Abkühlung erhöhen die Löslichkeit der Gase, das ist wohl allgemein bekannt. Da sich die Erde seit mehr als 4 Milliarden Jahren infolge des Verbrauchs an radioaktiven Elementen zumindest in den oberflächennahen Schichten um viele hundert Kelvin abgekühlt hat, müßte also die Löslichkeit der Gase im Magma gestiegen sein, es dürfte demnach auf unserem Planeten keine Vulkane geben. Es gibt sie aber doch!

Wir sind in eine Sackgasse geraten, weil wir in unserem Beispiel einige wichtige Naturgesetze nicht genügend berücksichtigt haben. Da wir auf unserem eigenen Planeten wenigstens in dieser Beziehung gut Bescheid wissen, läßt sich der Fehler relativ schnell beheben. Doch

*Entstehung einer neuen Vulkaninsel im Mai 1965 vor der Südküste Islands
Wasserdampf und vulkanische Asche steigen aus der noch nicht vollständig
den Meeresspiegel überragenden Krateröffnung von rund 100m Durchmesser.*



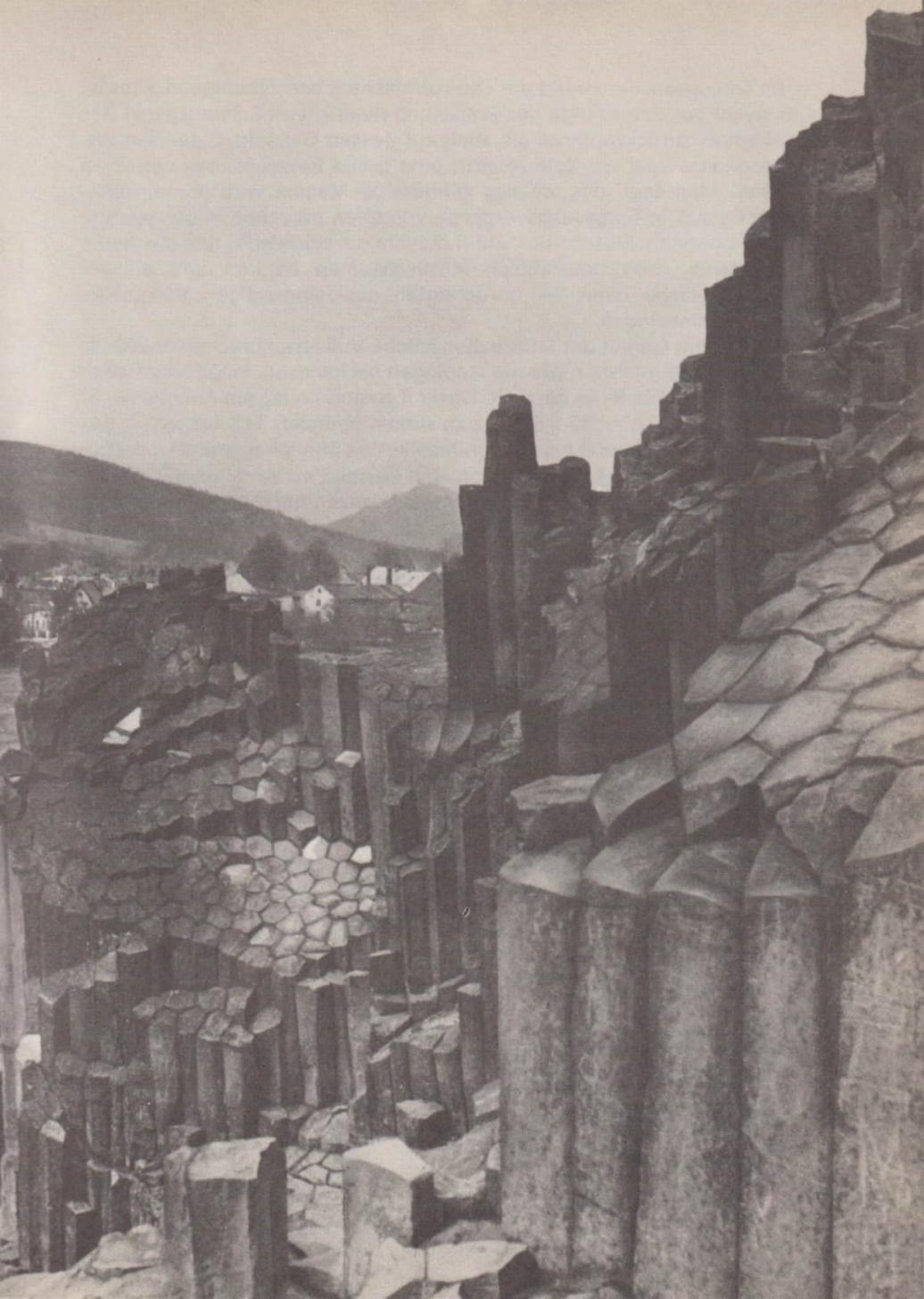
bevor wir das tun, wollen wir noch einen Augenblick über unseren „Kurzschluß“ nachdenken. Er zeigt uns, wie schnell man über kosmische Grundvorgänge zu Fehlkalkulationen kommen kann, wenn beispielsweise über ein Objekt noch nicht genug bekannt ist oder wenn man sich die Sache zu sehr vereinfacht und sie wie hier die Gestaltung der Oberflächenprozesse von nur einigen wenigen Größen ableiten will.

Klang das gegen die Existenz des Erdvulkanismus Gesagte nicht eigentlich ganz einleuchtend und logisch, und wäre es daher nicht gut vorstellbar, daß wir ohne unsere Tatsachenkenntnis dieser den wirklichen Bedingungen widersprechenden Argumentation Glauben schenken? Gäbe es nicht den irdischen Vulkanismus als drastisches Gegenbeispiel, könnten wir vielleicht unter dem Eindruck der im Zusammenhang mit der Abkühlung angeführten physikalischen Gesetzmäßigkeiten dazu neigen, auch das Fehlen eines Venusvulkanismus für begründet zu halten.

Bei dem Mechanismus, der die imposanten Vulkanbauten der Erde entstehen läßt, wirkt zum Beispiel entscheidend ein Prinzip mit, das unter dem Begriff des retrograden Siedens bekannt ist und leicht übersehen wird. Am Modell erläutert, sieht das so aus: Magma dringt aus, sagen wir, etwa 40 km Tiefe, einer Schwächezone der Erdkruste folgend, zähflüssig nach oben. Seine Anfangstemperatur entspricht den normalen Bedingungen in dieser Tiefenlage, also etwa 1 600 bis 1 800 K. Die Startgeschwindigkeiten solcher Aufstiege glutflüssiger Massen sind in ihrer Größenordnung ebenfalls bekannt; sie liegen bei einigen Metern bis wenigen hundert Metern im Jahr. Erst in der Spätphase beschleunigt sich die Aufstiegs geschwindigkeit erheblich. Bei einem derart langsamen Vorankommen kann natürlich der Wärmeverlust des heißen Magmas an das Nebengestein solche Ausmaße annehmen, daß es selbst wieder erstarrt. Dies ist wohl in der Natur sogar die Regel. Wahrscheinlich bedarf es mehrerer Nachschübe unter neuerlicher Reißbildung in der Kruste, damit sich der Magmenstrom unter allmählicher Aufheizung des Nebengesteins bis zur Erdoberfläche durchsetzen kann.

Die zwangsweise mit dem Aufstieg verbundene Abkühlung der magmatischen Schmelze droht also den Prozeß zum Stehen zu bringen.

Herrenhausfelsen bei Kamenický Šenov im Norden der ČSSR: Basaltische Lava erstarrt oft in Säulen, die senkrecht auf den Abkühlungsflächen stehen.



Im Gegensatz dazu wirkt die Druckentlastung beschleunigend. Dies ist sowohl auf den infolge der Entlastung niedrigeren Schmelzpunkt des Magmas zurückzuführen als auch auf dessen Gasgehalt, der ihm insbesondere kurz vor dem Austritt eine große Beweglichkeit verleihen kann. Man sagt, das anfangs zähflüssige Magma wird immer dünnflüssiger. Die Entgasungsvorgänge verlaufen oft schon in den letzten, also obersten Metern der Zufuhrkanäle so stürmisch, daß die heiße Schmelze noch unterirdisch aufzuschäumen beginnt und an der Erdoberfläche dann die berühmten explosionsartigen Vulkanausbrüche stattfinden.

Auf dem Gebiet der DDR haben solche Vulkanausbrüche vor 200 bis 400 Millionen Jahren, wie die Geologen nachwiesen, lange angehalten und eine große Rolle gespielt. Unser Territorium lag am Anfang dieser vulkanischen Aktivitätsphase zum überwiegenden Teil unterhalb des Meeresspiegels und wurde von Inselketten ähnlich jenem Typ durchzogen, der heute in Südostasien zum Beispiel als Archipel der Sunda-Inseln bekannt ist. Viele dieser Inseln besitzen noch immer tätige Vulkane. Die zweite große Vulkanperiode im Tertiär Mitteleuropas hatte ihre Hauptphase erst vor 10 bis 20 Millionen Jahren; unser Gebiet wurde aber nur im äußersten Süden und Norden noch von ihr erfaßt. Die Ausläufer der Basalte der Rhön im Bezirk Suhl gehören dazu, ebenso einzelne Basaltberge bei Zittau und im Erzgebirgsraum, die als Vorposten des großen nordböhmisches Vulkankomplexes gelten können.

Bemerkenswert ist, daß das jüngste vulkanische Ereignis, das unser Gebiet in Mitleidenschaft gezogen hat, erst etwa 10 000 Jahre zurückliegt. Es war der furchtbare Gasausbruch des Laacher-See-Vulkans in der Eifel, der bei vorherrschendem Westwind stattfand und dessen Ascheregen weite Teile Mitteleuropas bedeckte. Noch bei Aschersleben zum Beispiel hinterließ diese einmalige vulkanische Explosion eine zentimeterdicke Schicht vulkanischen Staubs, der in schon damals bestehenden Binnenseen versteinert ist und von Geowissenschaftlern gern als Zeitmarke verwendet wird.

Lebenslauf eines Modellvulkans

Die bis heute tätigen Vulkane stellen die besten Studienobjekte zum Erkennen der Mechanismen dar, nach denen sich der gesetzmäßige Aufbau ihres so reichen Formenschatzes vollzieht. Davon ausgehend,

können wir auf die möglichen Formen des Vulkanismus unter den veränderten physikalischen Grundbedingungen anderer Planeten schließen.

Verfolgen wir einmal den theoretischen, aber wissenschaftlich wohlbegründeten Entwicklungsweg eines irdischen Modellvulkans als Sammelform tatsächlicher Ereignisse von Anfang bis Ende seiner Tätigkeit. Der wesentliche Unterschied zu den tatsächlichen Gegebenheiten besteht vor allem darin, daß sich all diese von uns künstlich auf ein einziges Modell aufgestockten Ereignisse in der Natur weltweit auf viel weniger vollkommene Einzelbeispiele verteilen.

Unseren Mustervulkan lassen wir ganz friedlich beginnen. Für seine Entstehung dient das Verhalten des berühmten Paricutin Mexikos als Vorbild; ist doch dieser einer der ganz wenigen Vulkane, dessen Geschichte sozusagen von der ersten Stunde an genau aufgezeichnet wurde.

Man schrieb den 23. Februar 1943, als sich in der Nähe des kleinen mexikanischen Dorfes Paricuti die ersten Anzeichen seiner Geburt bemerkbar machten. An diesem Tag hatten mehrfach leichte Erdstöße eine überdurchschnittliche Unruhe im Untergrund angezeigt. Aber man war in dieser erdbeben- und vulkanreichen Zone solche Erschütterungen gewohnt, so daß ihnen nicht allzuviel Beachtung geschenkt wurde. Doch dann riß auf einem Feld vor den Augen der dort gerade beschäftigten Bauern ein nur wenige Meter langer Spalt auf, der bis zur Abenddämmerung eine zusehends kräftiger werdende Rauchsäule entließ. Schon am nächsten Morgen befand sich an dieser Stelle ein über 10 m hoher Hügel aus vulkanischer Asche und ersten Schlackefetzen. Im Lauf des Tages wurden die Gasausbrüche noch heftiger. Sie pulsierten im Rhythmus weniger Sekunden und nahmen in den nächsten Tagen zum Teil schon explosionsartige Formen an. Allmählich begrub die Asche das ganze Dorf unter einer meterhohen Schicht. Die Bevölkerung war längst zum Nachbardorf San Juan geflüchtet; aber auch dieses wurde nach 14 Tagen von einem 9 km langen Lavastrom erfaßt, der nur noch die Kirche übrigließ. 4 Millionen t tägliche Förderleistung bewirkten, daß der junge Vulkan schon nach einem Jahr fast 350 m Höhe erreichte. Dann wuchs er kaum noch. Die Förderleistung halbierte sich von Jahr zu Jahr; nach 3 Jahren war sie auf etwa 1 Million t zurückgegangen und sank von nun an etwas langsamer. 1951 erreichte sie nur noch ein Zehntel des ersten Jahrs, und 1952 galt dieser junge Vulkan bereits als erloschen.

Den vollständigen Aufzeichnungen der Vulkanologen können wir



*Vom Ausbruch des Vulkans Helgafell 1973 begrabene Häuser
der isländischen Stadt Vestmanneyjar*

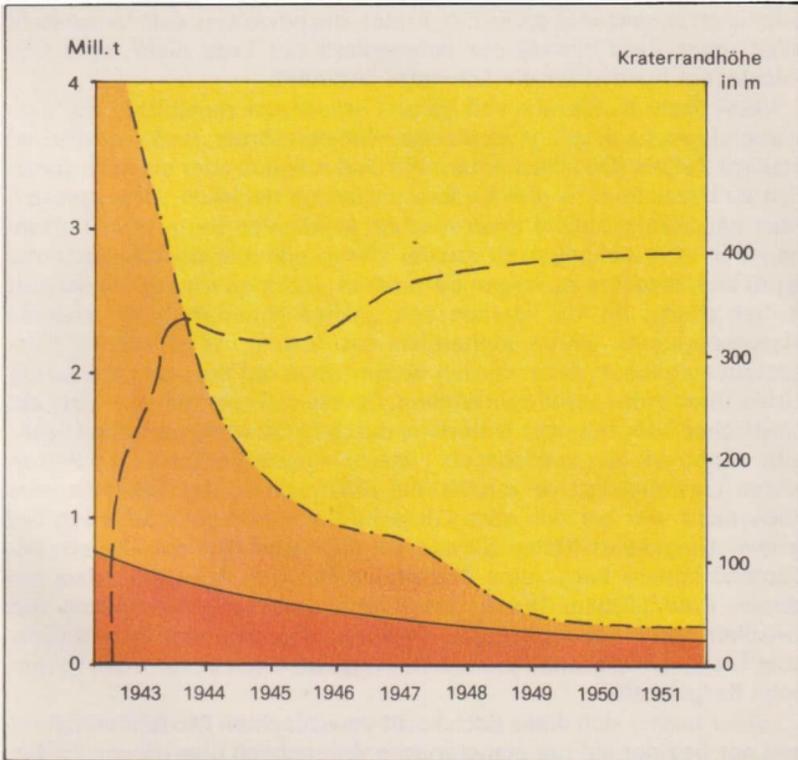
auch entnehmen, wie sich die Zusammensetzung der Förderprodukte des Paricutin im Lauf der Zeit verändert hat. Überwogen anfangs die vulkanischen Lockermassen, also der Tuff oder die Asche, mit 80 Prozent oder mehr, so war es kurz vor dem Erlöschen genau umgekehrt, und die ausströmende Lava bildete mit vier Fünfteln den Löwenanteil der letzten Jahresförderung. Der Übergang hatte sich im Zwischenzeitraum fließend vollzogen. Deutlich zeichnet sich mit diesem Verhältnis die fortschreitende Entgasung des unterirdischen Magmas ab. Man hätte danach das Verlöschen voraussagen können.

Aber was heißt hier eigentlich „erloschen“? In Wirklichkeit wäre es

wohl richtig, zunächst vorsichtig nur von Pausieren zu sprechen. Eine solche Pause kann manchmal Jahrzehnte oder Jahrhunderte dauern. Im Untergrund findet unterdessen oft ein heftiger Zweikampf statt. Druckanstieg und Temperaturabfall ringen um die Herrschaft über die Aktivität des Magmas. Der wachsende Druck der eingesperren und sich mehr und mehr anreichernden Gase will neue Ausbrüche veranlassen; die sinkende Innentemperatur versiegelt den Ausbruchsschlot und den Zufuhrkanal immer dichter mit erstarrender Lava. Wer Sieger wird, das

Ungleiches Nachlassen der Tuff- und Lavaförderung des Vulkans Paricutin

- — — Höhenwachstum des Vulkans
- Lavaförderung
- · - · - Tuffförderung



hängt stark vom Nachschub ab, der aus der Tiefe erfolgt. Hier befindet sich der eigentliche Motor des Geschehens; denn ohne diese Impulse aus der magmatischen Vorratskammer unter der Kruste muß jeder Vulkan früher oder später erlöschen.

Gehen wir davon aus, daß ein genügend großer Magmenvorrat im Untergrund vorhanden ist, dann hängt die weitere Wuchsform des Vulkans von der Art und der je Zeiteinheit zur Verfügung stehenden Menge des Magmas ab. Er wird sich bei gasreicherer Schmelze als Stratovulkan (lat. stratus = Schicht) etwa vom Typ des Vesuvs aufbauen, also im senkrechten oder Profilschnitt einen vielfachen Wechsel von Asche oder Tufflagen mit Lavaergüssen zeigen. Und er wird bei dünnflüssiger Lava einen flachen vulkanischen Schild mit weniger als 10° Flankenanstieg bilden. Je höher er sich aber in den Himmel reckt, desto mehr nimmt der Anteil an Flankenausbrüchen zu. In wachsendem Maß entstehen sogenannte parasitäre Krater, die beweisen, daß der zentrale Weg unter dem Einfluß der Schwerkraft der Erde nicht mehr den leichtesten Austritt für die Schmelze bedeutet.

Vereinfacht lautet eine von diesem Kräftespiel abgeleitete wichtige planetologische Regel: Je kleiner der Himmelskörper, desto höhere und steilere Reliefs (Oberflächenformen) sind möglich oder als noch standfest zu bezeichnen — gleiche Bausubstanzen natürlich vorausgesetzt. Man hat bereits solche theoretischen maximalen Berg- oder Vulkanhöhen in ihrer Abhängigkeit von der Planetendimension berechnet und ist zu interessanten Aussagen gekommen. Nehmen wir der Einfachheit halber einmal an, die kleinen und großen Himmelskörper unseres Planetensystems wären einheitlich aus festem, silikatischem Felsgestein aufgebaut, dann würden Bergmassive auf Erde und Venus um 10 bis 15 km Höhe stabil sein können. Davon, daß eine dünne Kruste bei plastischer oder flüssiger Unterlage durch Einsenkungsvorgänge nachgibt, sehen wir hier zunächst ab. Für einen jupitergroßen kalten Riesen wären Gesteinsmassive von 900 bis 1000 m schon das Äußerste, was noch nicht wie bei uns etwa Gletschereis auseinanderzufließen begännen. Umgekehrt hätten gerade auf kleineren Himmelskörpern bedeutend höhere Berge eine Existenzmöglichkeit. Auf Ceres, dem mit seinen rund 1000 km Durchmesser bei weitem massereichsten der zwischen Mars- und Jupiterbahn die Sonne umkreisenden Planetoiden- oder Kleinplanetenschar, könnten theoretisch sogar schon etwa 100 km hohe Berge stehen.

Leider lassen sich diese doch recht vereinfachten Modellvorstellungen nur bedingt auf die planetarische Wirklichkeit übertragen. Prüfen



Der Vulkan Tjatja auf der südlichsten Kurileninsel Kunaschir wurde nach längerer Pause 1973 durch einen Flankenausbruch wieder aktiv. Dabei entstand der kleine Seitenkrater im Vordergrund.

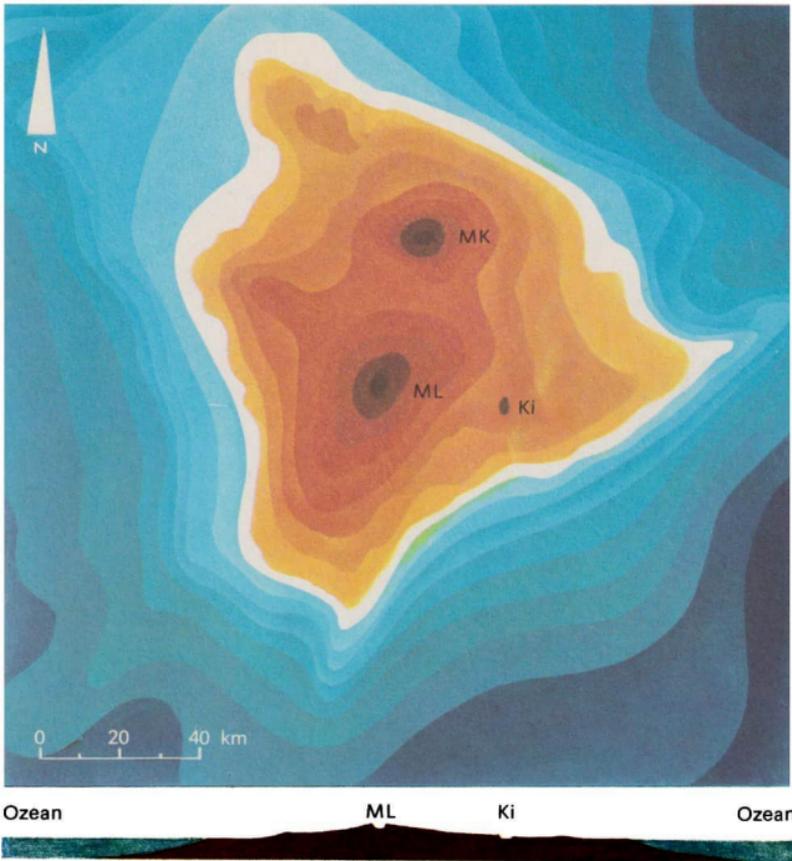
wir, inwieweit die zu beobachtenden Reliefs mit den theoretischen Spitzenwerten übereinstimmen, dann erkennen wir bald, daß die Oberflächenkonturen der Himmelskörper im allgemeinen beträchtlich unter diesen Werten liegen. Schuld daran ist in vielen Fällen die thermische Entwicklungsgeschichte der Planeten. Die noch heute bis dicht unter ihre Oberfläche sehr heißen, erdähnlichen Planeten haben sich eine große Plastizität ihrer Kruste bewahrt. Schwimmgleichgewichte werden wirksam, die das Modell „verfälschen“. Auf der Erde zum Beispiel schwimmen die leichteren, kontinentalen Massen im Durchschnitt bereits 4 bis 5 km über dem mittleren Ozeanniveau, ohne daß sich dieser Höhenunterschied mit unserer bisherigen Rechnung in Verbindung bringen ließe. Und von welcher Bezugsbasis soll man die wahre Berghöhe überhaupt messen? Der Mount Everest beispielsweise gilt mit seinen 8 848 m als höchster Berg der Erde; aber sein Bezugsniveau, der

Meeresspiegel, liegt weit weg und ist zudem eine künstliche Basis. Seine wahre eigene Reliefhöhe bis zur Talsohle der umgebenden Haupttäler beträgt nur rund 3000m, was von vielen alpinen und kaukasischen Gipfeln auch annähernd erreicht, örtlich sogar noch überboten wird. In einem Profilschnitt durch den Himalaja erhebt sich der Mount-Everest-Komplex zwar fast 8000m über die Gangesebene zu seinen Füßen, aber lediglich 3500m über das mittlere Niveau des nach Norden anschließenden tibetanischen Hochlands.

Vom Eigenrelief her gesehen, müßte der zentralpazifische Schildvulkankomplex der Insel Hawaii als höchste selbständige Berggruppe der Erde bezeichnet werden. Mit seinem Doppelgipfel Mauna Loa (4170m) und dem 40km entfernten Mauna Kea (4205m) liegt noch nicht einmal die Hälfte der wahren Höhe dieses gewaltigen Vulkansystems über dem Meeresspiegel. Auf einem jetzt etwa 250km breiten Sockel aus Lava hat sich über mehrere hunderttausend Jahre hinweg der Basaltkomplex von Erguß zu Erguß bis über 9km „Eigenhöhe“ gebildet. Eine flache, allerdings nicht ganz regelmäßig gebaute Tiefseerinne umschließt die heutige Hauptinsel. Warum wohl? Die Geologen glauben, dafür inzwischen eine Erklärung gefunden zu haben. Das Meeresbodenrelief blieb nämlich im wahrsten Sinn des Worts nicht ganz unbeeindruckt von den vulkanischen Ereignissen über ihm. Unter der ungeheuren Auflast der basaltischen Massen senkte sich das submarine (untermeerische, lat. sub = unter, marinus = Meer...) Relief muldenförmig ein, und zwar mit den größten Beträgen unter der mächtigsten vulkanischen Decke. Wir sehen von dieser Absenkung nur die schwächeren Randbereiche, die als flache Tiefseerinne die Insel hufeisenförmig umgeben.

Wollten wir uns nun nach Beispielen für ein vergleichbar intensives Relief auf noch größeren Himmelskörpern unseres Sonnensystems umschauen, würden wir wohl vergebens suchen. Wahrscheinlich sind die Oberflächen der Riesenplaneten unter ihrer viele tausend Kilometer mächtigen Atmosphäre so heiß, daß eine feste Kruste noch gar nicht existieren kann. Für Jupiter gilt das jedenfalls schon als sicher.

Bei kleineren erdähnlichen Himmelskörpern erleben wir wieder eine andere Variante zum Thema maximale Vulkanhöhen. Als Körper mit größeren Oberflächenanteilen im Verhältnis zum eigenen Volumen kühlten sie schneller aus als zum Beispiel Erde und Venus. Aber je kleiner sie waren, desto weniger leichtflüchtige Elemente wurden in ihrem ursprünglichen Ballungszentrum eingefangen. Auf Mond und Merkur kam daher die vulkanische Gasaushauchung viel eher zur Ruhe



*Schildvulkankomplex von Hawaii (Karte und Profil)
 Ki = Kilauea; MK = Mauna Kea; ML = Mauna Loa;
 Konturlinien = etwa 500m Höhenunterschied*

beziehungsweise war geringfügiger als auf der Erde. Zudem wurde die Phase der Existenz einer dünnen, beweglichen und verschiebbaren Kruste im Stadium der raschen Abkühlung an der Oberfläche sehr verkürzt. Daher fehlen diesen Himmelskörpern größere Vulkanbauten. Allerdings läßt sich das bis jetzt nur für den Erdmond mit Sicherheit



Oberfläche des Merkur, 1974 von „Mariner 10“ aufgenommen

behaupten, während es für den erst zu zwei Dritteln seiner Fläche „besichtigten“ Merkur lediglich als sehr wahrscheinlich gelten kann.

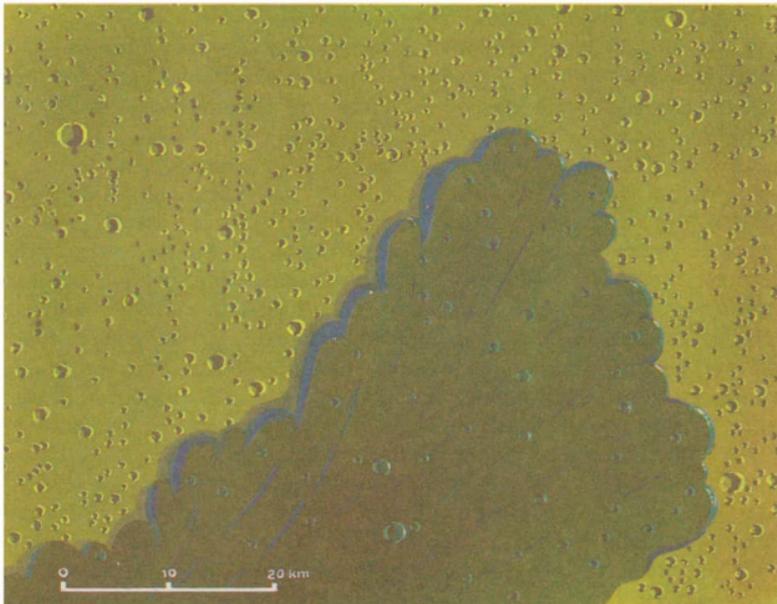
Über den Mond wissen wir dank den Raumfahrtunternehmen der sechziger und siebziger Jahre gut genug Bescheid, um mit Sicherheit nachweisen zu können, daß die Hauptform seiner vulkanischen Aktivitäten nicht im Aufbau mächtiger Zentralvulkane bestand, sondern sich

durch eine Vielzahl von Lavadeckenergüssen äußerte. Die riesigen dunklen Marefelder, die auf der uns zugewandten Seite des Erdtrabanten mehr als ein Drittel der Gesamtfläche einnehmen, wurden vor 3 bis 4 Milliarden Jahren zu idealen Sammelbecken der wahrscheinlich relativ ruhig, weil gasarm ausfließenden basaltischen Schmelzen. Satellitenaufnahmen hielten die kaum 3 Milliarden Jahre alten, letzten Ergüsse dieses lunaren vulkanischen Systems im Bild fest. Wie zum Beispiel die Aufnahmen vom bekannten Mare Imbrium zeigen, werden bei sehr tief am Mondhorizont stehender Sonne dort die jüngsten der das fast kreisrunde Becken füllenden Lavaströme von etwa 200 bis 300 km Länge sichtbar.

Dennoch, es gibt auch schon auf dem Mond erste Ansätze zur Herausbildung höherer vulkanischer Massive oder Komplexe. Das umfangreichste Vulkanfeld befindet sich im westlichen Oceanus Procellarum

Randzunge eines Lavastroms im Mare Imbrium

Die Kreise symbolisieren die unterschiedliche Kraterdichte, die gegenüber der Wirklichkeit noch etwas gesteigert wurde.

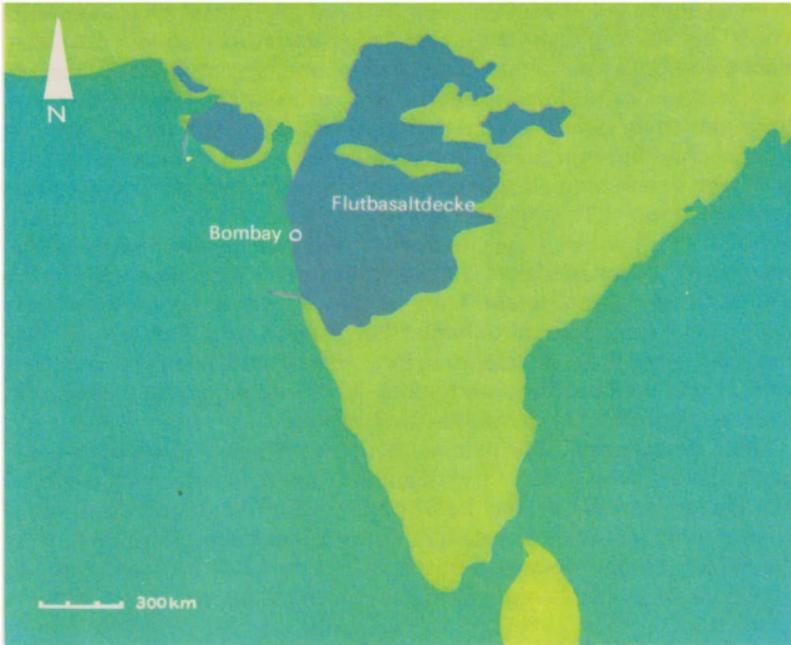


am Rand der größten zusammenhängenden Lavafläche auf dem Erdtrabanten überhaupt. Auf einem Gebiet von 150 km x 300 km bemerken wir 40 bis 50 getrennt voneinander stehende Kuppen, Dome genannt. Nur wenige hundert Meter hoch, aber oft von 10 bis 20 km Durchmesser, repräsentieren sie mit einiger Wahrscheinlichkeit den einzigen Typ des lunaren Vulkanismus, der eine Entwicklung – wenn auch lediglich im Vorläuferstadium – zu Einzelvulkanbauten, wie wir sie von der Erde her gewohnt sind, erkennen läßt.

Wir haben diesen kleinen Abstecher zu unseren benachbarten Himmelskörpern unternommen, um den eigenen Vulkanismus mehr im kosmischen Zusammenhang zu sehen. Theoretisch könnten wir unseren irdischen Modellvulkan noch bis an die 10 km Höhe wachsen lassen, wenn die Gesteinsfestigkeit allein dafür maßgebend wäre. Doch dem ist offensichtlich nicht so. In der Regel „altern“ die irdischen Vulkane ab Eigenrelieffhöhen von 3 bis 4 km zusehends. Nur unter besonders günstigen Umständen gelingt eine Aufstockung bis über 5 km, dann aber ereilt auch diese irdischen Riesen ihr Schicksal. Den so lange hinausgezögerten Selbsterstickungstod führt unter irdischen Bedingungen schließlich die Gravitation (Massenanziehung) herbei. Weil im allgemeinen die gewöhnlichen Magmenförderungsraten doch nicht für eine pausenlose Dauertätigkeit ausreichen, wird der von ihr ausgelöste Druck auf die zentrale Gesteinssäule, verstärkt durch Erstarrungseffekte, allmählich für das nachschiebende Magma unüberwindlich. Als letzter Ausweg bleibt nur die Errichtung von Notausgängen an den Flanken. Der Berg wächst von nun an mehr und mehr in die Breite und gewinnt kaum noch an Höhe. Aus dem Einzelvulkan wird ein Vulkankomplex mit vielen Austrittsöffnungen für die flüssige Lava.

Das bis jetzt in den Vordergrund gerückte Einzelbeispiel soll aber nicht dazu führen, vulkanische Komplexe ausschließlich als Weiterentwicklung ehemaliger Zentralvulkane zu sehen; vielmehr vollzieht sich der Lavaerguß oft auch von Anfang an sehr großflächig und aus zahlreichen Öffnungen gleichzeitig. Längere Eruptionsspalten (lat. erumpere = hervorbrechen) sind sogar in vielen Fällen die Vorläufer späterer Zentralvulkane. Der anfängliche Ausbruch erfolgt dann als manchmal kilometerlanger Feuervorhang, ehe sich die Aktivität auf einen bevorzugten engen Abschnitt dieses Spaltensystems zu konzentrieren beginnt. Typisch für dieses Verhalten sind vor allem die Vulkanausbrüche Islands.

Wir erwähnten bereits, daß sich der Vulkanismus des Mondes bei nur schwacher Entwicklung von Einzelbergen in erster Linie durch groß-



Vor 50 bis 100 Millionen Jahren entstandene Flutbasaltdecke Indiens

flächige Ergüsse von übrigens sehr dünnflüssiger Lava auszeichnete. Auf der Erde finden wir eine ganz ähnliche Form der Förderung großer Lavamassen – die Flutbasaltergüsse. Sie stehen etwas im Schatten der explosiveren Ereignisse, weil sie sich hauptsächlich unter dem Meeresspiegel vollziehen und erst nach längerer Dauer imposante Förderleistungen erreichen. Mächtige Deckenergüsse von basaltischen Schmelzen hat es im Lauf der Erdgeschichte aber schon sehr oft und zu fast allen Zeiten gegeben. Am besten zu belegen sind sie natürlich aus den jüngeren Abschnitten bis vor rund 200 Millionen Jahren. Auf Flächen von mehreren hunderttausend Quadratkilometern stapeln sich dann am Ende der nach vielen Millionen Jahren zählenden Gesamtaktivitätszeit oft kilometermächtig werdende Gesteinspakete auf. Charakteristisch für die innere Struktur solcher Platten ist der ständige Wechsel von lockeren Tuffmassen mit festeren Lavadecken.

Eines der bekanntesten Vorkommen dieser Art, dessen Basaltmaterial vor 50 bis 100 Millionen Jahren die Kruste durchbrach, bildet die Hochfläche von Dekan auf dem indischen Subkontinent. Viele der cañonartigen Schluchten in dem riesigen Basaltverbreitungsgebiet weisen infolge des mehrfachen Wechsels von weicherem Tuffgestein mit den eigentlichen Basaltergußlagern charakteristische stufenartige Absätze auf, nach denen man diese Flutbasalte weltweit auch als Trappergüsse (schwed. trapp = Treppe) bezeichnet.

Auffällig oft wurden uns gerade aus dem frühen Abschnitt des Mesozoikums, besonders der Trias, also aus der Zeitspanne vor 180 bis 230 Millionen Jahren, solche Trappergüsse überliefert. Sie bilden heute meist die Unterlage mittelhoher Bergländer fern der jungen Faltengebirge der Erde, so in Sibirien zwischen Jenissej und Lena, im Süden Afrikas und im Paranábecken Südbrasilens, wo sie große Flächen des alten geologischen Untergrunds überdecken.

Über Einzelheiten des Innenaufbaus der Trappergüsse wissen wir noch immer nicht genug. Es wird angenommen, daß der Mechanismus des Linearvulkanismus, das heißt der Typ der Magmenförderung aus kilometerlangen Spaltensystemen, ihre Hauptstruktur bestimmt. Aber die Frage, ob die Magmenaustritte über lange Zeiträume hinweg mit größeren Unterbrechungen erfolgten, gilt noch als weitestgehend ungeklärt.

Die Riesenvulkane des Mars

Während die große kosmische Bedeutung der basaltischen Deckenergüsse den Planetologen inzwischen außer an Beispielen für Erde und Mond auch noch für Merkur und Mars bekannt geworden ist, hat das Erscheinungsbild des irdischen Zentralvulkanismus zunächst nur durch die Marsforschung wesentliche Ergänzungen erhalten. Das kann sich aber eines Tags – wie wir schon jetzt zu vermuten wagen – durch Fortschritte in der Erforschung der Jupitermonde und der Venus rasch ändern. Doch bleiben wir erst einmal beim Mars.

*Typische Großkraterlandschaft der Südhalbkugel des Mars in der Umgebung der Ringstruktur Argyre, am 14. Juli 1976 von der amerikanischen Planetensonde „Viking Orbiter 1“ aufgenommen
Am Horizont sind zwei Wolkenschichten in 25 bis 40 km Höhe zu sehen.*



Etwa mit der Jahreswende von 1971 zu 1972 läßt sich die Entdeckung der Riesenvulkane dieses äußeren Nachbarplaneten der Erde datieren. Monate zuvor, im Mai 1971, hatten zwei sowjetische und eine amerikanische Marssonde ihre lange Reise zum Mars begonnen.

Was besaß man denn bis zu dieser Zeit überhaupt für Vorstellungen vom Reiseziel? Kurz gesagt, sehr mondähnliche. Der Grund dafür waren die Fotos dreier vorangegangener amerikanischer „Mariner“-Sonden, auf denen Krater und nochmals Krater, fast wie auf dem Mond, die Szenerie beherrschten. In den Jahren zuvor, solange überhaupt noch keine Raumfahrtresultate vom Mars vorlagen, hatte man damit nicht gerechnet. Als nach dem 15. Juli 1965 die ersten „Mariner-4“-Aufnahmen von Hand zu Hand gingen, war deshalb die Überraschung, vielleicht auch Enttäuschung, allgemein groß.

Der Mars verfügt nur über rund ein Zehntel der Erdmasse, ist aber andererseits selbst fast zehnmal massereicher als unser Mond. Er steht also in seinen Dimensionen annähernd in der Mitte zwischen diesen beiden Himmelskörpern. Müßte sich diese Mittelstellung nicht eigentlich auch in seinem Reliefgefüge deutlich bemerkbar machen? Man hatte sich viel erhofft an Zwischenformen, die vielleicht geeignet wären, entstehungsgeschichtliches Verständnis zu vermitteln. Erd- und Mondoberfläche wurden ja so verschiedenartig geprägt, stehen sich auf den ersten Blick so fremd gegenüber, daß lange Zeit der Nutzen der Mondforschung für die Geowissenschaften sogar angezweifelt werden konnte.

Und jetzt das! Zwar hatte man mit den Fotos von 1965 – 21 an der Zahl und in nur 24 Minuten während des Vorbeiflugs aus 10 000 bis 13 000 km Entfernung aufgenommen – erst weniger als 1 Prozent der Marsoberfläche ins Bild bekommen, aber das zu Erkennende schien typisch genug auch für den „Rest“ der Fläche; denn, so schloß man, wenn Meteoritenkrater in einer solchen mondähnlichen Häufigkeit und Größe, bei der 100-km-Krater keine Seltenheit darstellen, erst einmal sichtbar werden – und sei es in einem Teilgebiet –, dann bestimmen sie wohl genau wie beim Mond ebenfalls die Gestalt der noch unbekanntesten übrigen Planetenoberfläche.

Selbst die beiden nächsten, aus dem Jahr 1969 stammenden Bildstreifen, übermittelt von „Mariner 6“ und „Mariner 7“, änderten trotz verbesserter Qualität der insgesamt nun schon 200 Aufnahmen an der grundsätzlichen Aussage nur wenig. Ohne daß es allzu wörtlich verstanden werden soll, könnten wir dies auch so ausdrücken: Wurde nach „Mariner 4“ vermutet, die Marsoberfläche sei zu 99 Prozent mond-

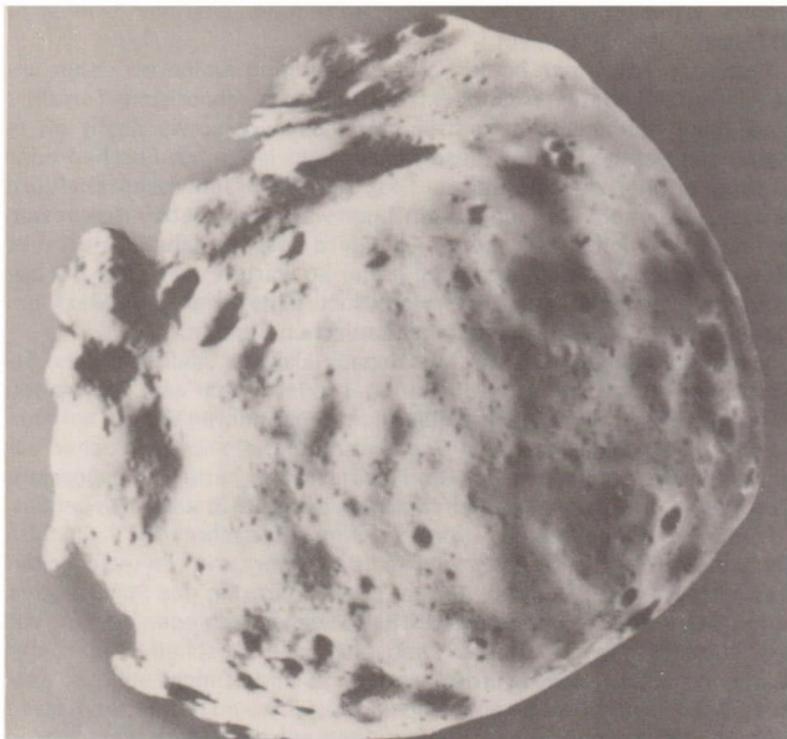
ähnlich, dann schien das nach „Mariner 6“ und „Mariner 7“ noch zu 90 Prozent der Fall zu sein.

Immerhin hatte man beim zweiten Vorbeiflug einige bis dahin unbekannte Geländetypen entdeckt, darunter das „chaotische Terrain“, eine kaum definierbare Großrümmerlandschaft, sowie damit oft in Verbindung stehend oder diese begrenzend lange, an Furchen oder Gräben erinnernde Strukturen. Dies gab den Geowissenschaftlern wieder etwas mehr Hoffnung; denn ihnen wäre es am liebsten gewesen, wenn sich nicht das mond-, sondern das erdähnlichste aller Marsmodelle als richtig erwiesen hätte. So wartete man 1971 mit besonderer Spannung auf die ersten Nachrichten der den Mars ansteuernden sowjetischen und amerikanischen Sonden.

Wenn auch spätestens ein Jahr danach klar war, daß sämtliche Erwartungen sich nicht nur erfüllt hatten, sondern sogar weit übertroffen wurden, schien doch zunächst alles einen ganz anderen Verlauf nehmen zu wollen. Die sehr schlechte Großwetterlage, die schon Wochen vor Ankunft der Sonden den Planeten beherrschte, hatte seine gesamte Oberfläche in eine schier undurchdringliche graue Staubwolke gehüllt. Das machte alle geplanten Sofortprogramme des Jahres 1971 zunichte. Start und Ankunftsstermin waren damals in erster Linie von technischen Gesichtspunkten bestimmt worden. Die Ausnutzung des Startfensters für günstige Überfahrtbedingungen hatte noch entschieden Vorrang vor der Rücksichtnahme auf das atmosphärische Geschehen über der Marsoberfläche. Heute würde man sich bestimmt nicht mehr so ausschließlich von diesen technischen Gesichtspunkten leiten lassen müssen und die physischen Bedingungen auf dem Mars viel mehr in Rechnung setzen. Auf die damalige Situation übertragen, hieße das, man würde diesen Start etwa um 2 Monate verschoben haben.

Glücklicherweise ließ sich wenigstens die geplante Fotomission der „Mariner-9“-Sonde vorübergehend in eine sehr erfolgreiche, einige Wochen währende Fotojagd nach den beiden Marsmonden umprogrammieren.

Das erste, was dann Anfang 1972 an der Planetenoberfläche aus den sich insgesamt nur sehr langsam niederschlagenden Staubmassen auftauchte, waren vier merkwürdige dunkle Punkte unweit des Äquators. Die drei schwächeren von ihnen bildeten eine fast 2000 km lange Reihe und erhielten von den vorsichtigen Wissenschaftlern zunächst nur die ganz neutralen Lagebezeichnungen Nordfleck, Mittelfleck und Südfleck. Der größte aber befand sich etwas abseits wiederum in rund 2000 km Entfernung nordwestlich von ihnen. Seine Lage entsprach, wie



Marsmond Phobos, am 18. Februar 1977 von „Viking Orbiter 1“ aufgenommen

sich später erwies, einer schon mehrfach aufgefallenen Stelle der Marsoberfläche, die sich von der Erde aus häufig als unbeständiges weißes Feld oder Wölkchen markieren ließ, das daher den Namen Nix Olympica (lat. nix = Schnee) erhalten hatte. Auch auf den „Mariner“-Aufnahmen des Jahrs 1969, die noch in der Anflugphase gemacht wurden und den Planeten als Ganzes erfaßt hatten, erschien er, nun bereits deutlicher, als weiße, ringartige Struktur.

Die ersten Höhenmessungen ließen bald erkennen, daß es sich um gewaltige Bergmassive handeln muß, die wegen ihrer enormen Höhe schon sehr früh aus dem bodenwärts immer dichter werdenden Staubvorhang des Planeten schauten. Für den höchsten von ihnen, eben jene

Nix Olympica, ermittelte man zunächst 9 bis 11 km als Gipfelhöhe. Eine Korrektur der Meßergebnisse erbrachte dann ein Jahr später die fast unglaublich klingende Höhe von etwa 27 bis 28 km.

Als nun gleichzeitig mit dem hohen Relief auch die zentralen Krater dieser Berge eindeutig als echte Einsturzkessel im Sinn einer vulkanischen Kaldera (span. caldera = Kessel) und nicht als Meteoritenkrater identifiziert werden konnten, stand fest, daß der kleine Mars auf seiner Oberfläche größere Einzelvulkane beherbergt, als sie die Erde besitzt oder jemals besessen haben konnte.

Der Vergleich von Nix Olympica – inzwischen in Olympus Mons (lat. mons = Berg) umbenannt – mit dem größten Vulkan der Erde, dem auf Hawaii, wurde sofort angestellt und erwies sich tatsächlich als sehr

Von einem See erfüllte Kaldera nahe dem Berg Kljutschewskaja Sopka auf Kamtschatka



geeignet, Ähnlichkeiten und Unterschiede beider Vulkantypen zu unterstreichen. So wie die Höhe des Marsriesen etwa das Dreifache des Hawaii-Vulkans ausmacht, so finden wir auch die Basis um annähernd den gleichen Betrag erweitert. Während für den Hawaii-Komplex vom Meeresboden an mehr als 200 km Sockelbreite angegeben werden, sind es hier etwa 600 km. Dies läßt erwarten, daß der Flankenanstieg mit sehr ähnlichem flachem Winkel erfolgt, wie ihn der Profilschnitt durch die pazifische Insel zeigt. 3 bis 6° für den unteren und 5 bis 8° für den oberen Hangabschnitt sind kennzeichnend für sehr heiße, dünnflüssige, also weit ausfließende Lava. Man reihte aus diesem Grund den Olympus Mons sehr bald in die Gruppe der Schildvulkane ein.

Im Bauprinzip stimmt mit den irdischen Schildvulkanen auch die große Caldera überein, die als ovale, 90 km × 70 km messender Kessel den Riesenvulkan des Mars krönt. Doch welcher Unterschied in der Dimension! Hier kann vom nur Dreifachen keine Rede mehr sein. Der 4170 m hohe Mauna Loa trägt die größte Gipfelcaldera von Hawaii. Sie hat ganze 3 bis 4 km Durchmesser. Doch die Paradebeispiele liegen auf Hawaii nicht zufällig etwa 50 km abseits am Südostrand der Insel. Hier findet sich ein in der Geologie viel beachtetes jüngeres Bruchsystem, in dem sich, allerdings zur Zeit noch unvollständig entwickelt, die Entstehung eines ovalen Kessels mit einem Durchmesser bis zu 25 km andeutet. Berühmt wurde diese Struktur durch das oft beschriebene nächtliche Schauspiel des jahrzehntelang zu beobachtenden glühenden Lavasees im Halemauau-Krater an ihrem Rand, dessen Durchmesser aber nur rund 1 km beträgt. Doch gerade darin, daß das zur Zeit bedeutendste Spaltensystem der insgesamt viergipfeligen Vulkaninsel von Hawaii am Rand liegt, besteht der charakteristische Hauptunterschied zwischen den beiden verglichenen Vulkanen. Während Olympus Mons auf dem Mars trotz seiner enormen Höhe noch ein echter Zentralvulkan ist mit einem sehr markanten, zentralen Eruptionszentrum, fehlt auf Hawaii diese Konzentration der Förderung in einem Punkt. Statt dessen kennzeichnen mehrere kilometerlange Förderspalten den in seinen Aufstiegsbahnen der Lava viel variabler angelegten irdischen Schildvulkan.

Die gegenüber dem Mars weit höhere Beweglichkeit der Erdkruste steht mit diesen Unterschieden im engsten Zusammenhang; doch das soll noch bewiesen werden. Hier nur soviel im voraus: Der erste kosmisch-geologische Vergleich läßt bereits ahnen, daß uns die idealere Grundform eines zentralvulkanischen Riesens, wie sie auf dem Mars verwirklicht wurde, den Modellfall vor Augen führt, der auch auf un-

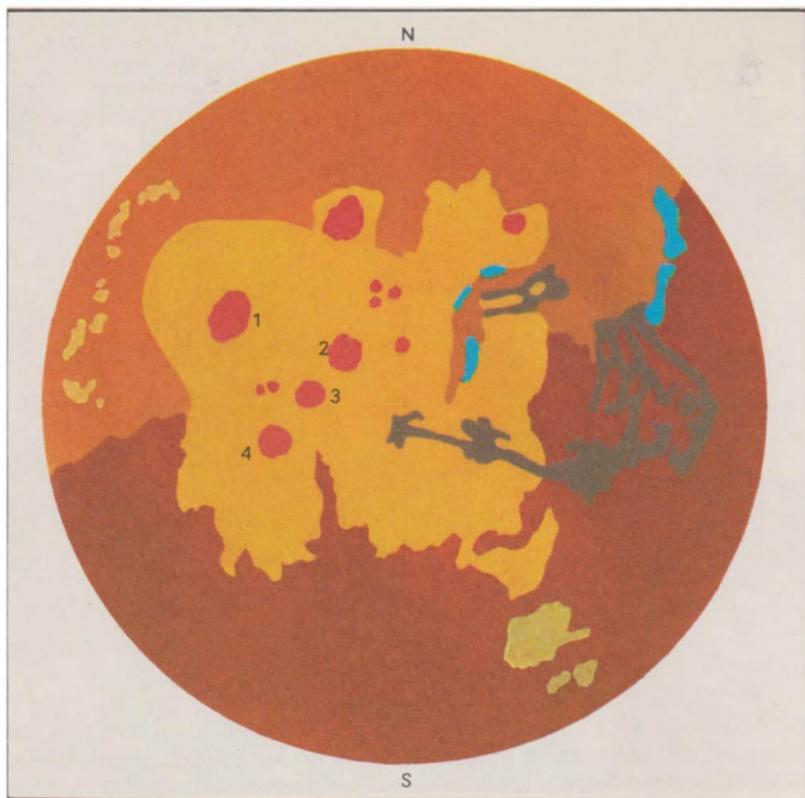


Vulkanische Einbruchskessel in der Gipfelregion des Mauna Loa auf Hawaii

-  lokaler Vulkankegel
-  größere Spalten
-  jüngere Lavaströme

serem Planeten häufiger wäre, bliebe die Erdhaut unter den Vulkanen mehr in Ruhe.

Mindestens noch vier weitere Marsvulkane übertreffen mit ihren Basisdurchmessern die 200 bis 250 km des Hawaii-Komplexes. Zu ihnen gehören die drei schon eingangs erwähnten Vulkane, der Nord-, Süd- und Mittelfleck, heute als Asraeus Mons, Arsia Mons und Pavonis



Geologische Karte des Mars mit dem Gebiet der Riesenvulkane

1 = Olympus Mons; 2 = Ascraeus Mons; 3 = Pavonis Mons; 4 = Arsia Mons

 lavaüberflutete Flächen

 kraterarme Flächen

 relativ kraterreiche Urkruste

 gestörtes Übergangsgebiet

 Grabenbrüche

Mons bezeichnet. Sie erreichen ebenfalls die beachtlichen Höhen von 16 bis 22 km und haben alle mit Olympus Mons gemeinsam, daß ihre Hänge weniger von Meteoritenkratern durchlöchert sind als ihre weitere Umgebung. Das belegt grundsätzlich das jugendliche Alter dieses Marsvulkanismus. Bewiesen ist allerdings nur, daß der Mars-

vulkanismus hier jünger als die von Großkratern übersäte Urkrustenlandschaft des Planeten sein muß. Das schließt nicht aus, daß er schon seit vielen Millionen Jahren erloschen sein kann. Erloschen ist in dem Sinn zu verstehen, daß zur Zeit keine Lavaaustritte mehr stattfinden, und soll nicht besagen, daß auch die früher wohl erheblich intensivere Entgasung ganz aufgehört hat.

Als mutmaßlicher Beleg dafür, daß noch immer eine Restentgasung aus Olympus Mons stattfindet, wurde vor allem in den ersten Monaten nach Bekanntwerden der überraschenden Bilder dieses Vulkanriesen der in seiner Nähe schon von der Erde aus sichtbare unbeständige weiße Fleck angeführt, den man als Entgasungswölkchen deuten wollte. Das ist natürlich sehr problematisch. Die Erscheinung ließe sich auch als allein reliefbedingte, also von aufsteigenden Winden am Berghang herrührende Wolkenbildung ausreichend erklären.

Die genannten Beispiele gehören alle zum jüngeren Marsvulkanismus. Daneben sind jedoch nach Auswertung der bisher zur Verfügung stehenden fotogeologischen Marskarte noch zahlreiche, vermutlich sogar sehr alte Vulkanriesen entdeckt worden, und deshalb nimmt man heute an, daß sich der Marsvulkanismus länger als auf dem Mond, über eine Zeitspanne von mehreren Milliarden Jahren, hinzog. Ob aber die letzten Lavaausbrüche nur einige Jahrtausende oder viele Jahrmillionen zurückliegen, ließ sich nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen noch nicht bestimmen.

Voraussichtlich werden verbesserte Zählungen der Meteoritenkraterdichte in der näheren Umgebung der Vulkane hier bald genauere Angaben ermöglichen. Die Marsvulkane, vor allem die jüngeren, sind nämlich keineswegs regellos über den Planeten verteilt, sondern häufen sich besonders in zwei Hochebenen, die sich auch noch durch ein kräftiges Spaltensystem von der sonstigen Urkruste mit ihrer großen Anzahl Meteoritentreffer unterscheiden.

Auf diese Zusammenhänge kommen wir später zurück, wenn es darum geht, den Bau der Marskruste mit dem der irdischen zu vergleichen.

Die ruhelose Erde



Wenn wir mehr über die Gesetze erfahren wollen, denen die verschiedenen Strukturen der Erdoberfläche, wie Kontinente und Gebirge, tiefe Ozeanbecken, große Gräben oder nur einfache Falten im Gestein, ihre Entstehung verdanken, dann müssen wir uns auch mit jenen Erscheinungen vertraut machen, welche den eindrucksvollen Formenschatz der Erdoberfläche, seien es die höchsten Berge oder die tiefsten Täler, die größten Ströme oder die zahlreichen Seen oder erst recht der Verlauf der Küste in seiner Vielgestaltigkeit, so vergänglich werden lassen.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Geowissenschaftler zum Verhalten der Erdkruste über längere erdgeschichtliche Perioden hinweg besagt, daß sich bestimmte Abfolgen von regionalen Krustenveränderungen im Lauf der Erdgeschichte ständig wiederholen. So folgt einer Aufbauphase großer Strukturen (zum Beispiel der Gebirge) unweigerlich die Phase des Verfalls, des Abtrags der Gesteine und ihres Transports durch die Flüsse zum Meer. Doch das ist meist nicht Endstation, sondern nur Zwischenstation eines Kreislaufs der Stoffe; denn schnell formen sich daraus wieder Sedimente, die oft von einer neuen Gebirgsbildung erfaßt werden. Und so beginnt der Zyklus von vorn.

Bei der Suche nach immer genaueren Antworten auf viele damit zusammenhängende Fragen weist die kosmische Geologie ebenfalls neue Erkenntniswege. Haben es doch die Erfolge der Raumfahrt ermöglicht, einige noch problematische Regeln der irdischen Krustenentwicklung durch Vergleich mit anderen Planeten besser zu begreifen.

Gebirge sind vergänglich

Sieben Gipfel über 5000 m Höhe zählt der Kaukasus. Wer das Glück hat, sie aus der Nähe bewundern zu können, wird tief beeindruckt sein von den bizarren, mit Schnee und Eis bedeckten Felswänden. Wie lange mag

es dieses gewaltige Gebirge schon geben? Und wie lange wird es wohl noch bestehen? Diese Fragen drängen sich vor allem beim Anblick der tosenden Gebirgsbäche auf, deren schäumende Wassermassen, oft bereits reichlich mit verwittertem Gesteinsmaterial beladen, unter dem Gletschereis hervorbrechen und sich zu reißenden Strömen vereinen, die im steileren Oberlauf sogar kubikmetergroße Blöcke talwärts zu bewegen vermögen.

Damit wir sie schneller beantworten können, wollen wir die Fragen etwas konkreter formulieren und vereinfachen. Wie lange dürfte es dauern, bis die Abtragung, die sich unter den augenblicklichen klimatischen Verhältnissen vollzieht, zu einer Erniedrigung des Gebirges um durchschnittlich 1 km führt? Dies läßt sich auf indirektem Weg ermitteln. Wir benötigen dazu die jährliche Abflußmenge sowie die Sedimentfracht der großen Ströme, die ein solches Gebirge entwässern. Unsere Tabelle gibt nach sowjetischen Autoren die jährliche Wasser- und Schlammführung der Zuflüsse des Kaspischen Meers an, die etwa zwei Drittel der Abflüsse des Kaukasus erfassen:

Flüsse	Wassermenge in km ³	Feststoffe in Millionen t
Wolga	225,7	25,7
Ural	13,2	4,04
Kura	17,2	25,4
Terek	11,3	25,8
Sulak	5,5	26,8
Samur	2,2	6,26
Übrige Flüsse	24,6	14,71
Insgesamt	299,7	128,71

Unter Berücksichtigung der in der Tabelle nicht enthaltenen Abflüsse zum Schwarzen Meer und der hier ebenfalls nicht wiedergegebenen Fracht der Flüsse an gelösten Stoffen läßt sich für den Gebirgsraum des Kaukasus ein durchschnittlicher jährlicher Abtrag von 0,5 bis 1 mm berechnen.

Ist das nicht recht wenig? So möchte man im ersten Moment angesichts dieser für unsere Begriffe winzigen Einheit fragen. Geologen sehen das anders. In den ihnen vertrauten Zeitmaßstäben pflegen sich solche Dimensionen hinter dem Komma oft zu gewaltigen Größen

aufzublähen. So auch hier. Knapp 1 mm im Jahr, das ist schon 1 m in 1 000 bis 2 000 Jahren oder, noch deutlicher, 1 km (!) in 1 bis 2 Millionen Jahren, was ungefähr „nur“ der Dauer der Eiszeit entspricht, also dem jüngsten Abschnitt der Erdgeschichte im Anschluß an das Tertiär.

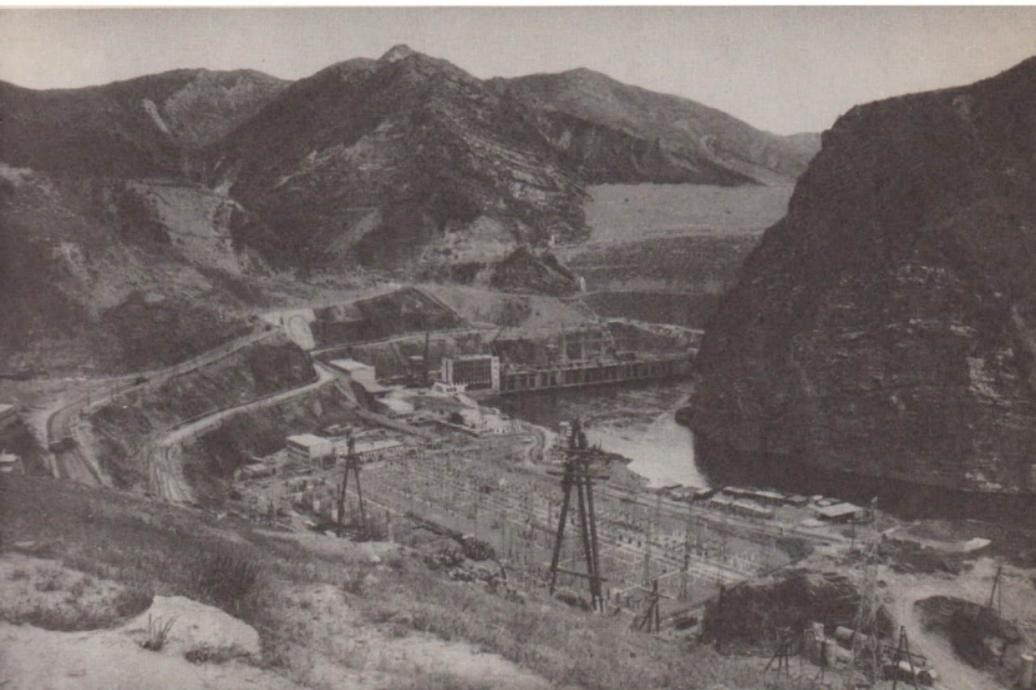
Diese Ergebnisse für den Kaukasus decken sich grundsätzlich mit dem, was für andere Hochgebirge der Erde als normal ermittelt wurde. Doch insgesamt liegen deren Raten der Denudation, der flächenhaften Abtragung (lat. denudare = entblößen), weit über dem Durchschnitt der niedrigen und weniger Höhenunterschiede aufweisenden festländischen Flächen. Für 1 m Abtrag rechnet man:

- im Hochgebirge mit etwa 1 000 bis 2 000 Jahren,
- im Mittelgebirge mit 5 000 bis 20 000 Jahren,
- in den Tiefländern mit 50 000 Jahren und erheblich mehr.

Ein nochmaliger Blick auf unsere Tabelle zeigt uns, daß die großen Tieflandströme, wie die Wolga, bezogen auf die Wassermenge, nur ein Zehntel bis ein Zwanzigstel des Feststofftransports der Gebirgsflüsse leisten — ein eindrucksvolles Beispiel für die niedrigere Abtragsrate des flacheren Landes.

In immer stärkerem Maß beeinflußt auch die menschliche Wirtschaftstätigkeit die Sedimentfracht vieler Ströme. Überall, wo Talsperren gebaut werden, schiebt man damit zugleich dem natürlichen Feststofftransport ins Meer buchstäblich einen Riegel vor. Wegen der gesteigerten Geröllfracht der Gebirgsströme ist die Lebensdauer eines Stausees im Hochgebirge erheblich geringer als die einer vergleichbaren Anlage im niedrigen Mittelgebirge. Zum Beispiel erreichen die relativ langen Sperrmauern der großen Wolgakaskade nur einige zehn Meter Höhe. Demgegenüber mißt die gewaltige Nureksperrmauer westlich des Pamir etwa 300 m Höhe. Für den dahinter liegenden tiefen Stausee wird aber eine kürzere Lebensdauer veranschlagt als für die Stauseen der Wolgakaskade. Im Gebirge Mittelasiens rechnet man mit kaum mehr als 100 Jahren, dann soll der Nurekstausee im Tal des Wachs bereits weitgehend mit Schotter aufgefüllt sein. Selbstverständlich haben sich die sowjetischen Talsperrenbauer darauf vorbereitet und auch diese Veränderungen in ihrer Planung berücksichtigt. So wurde schon jetzt oberhalb der jungen Sperre die Lage der Nachfolgeobjekte bestimmt.

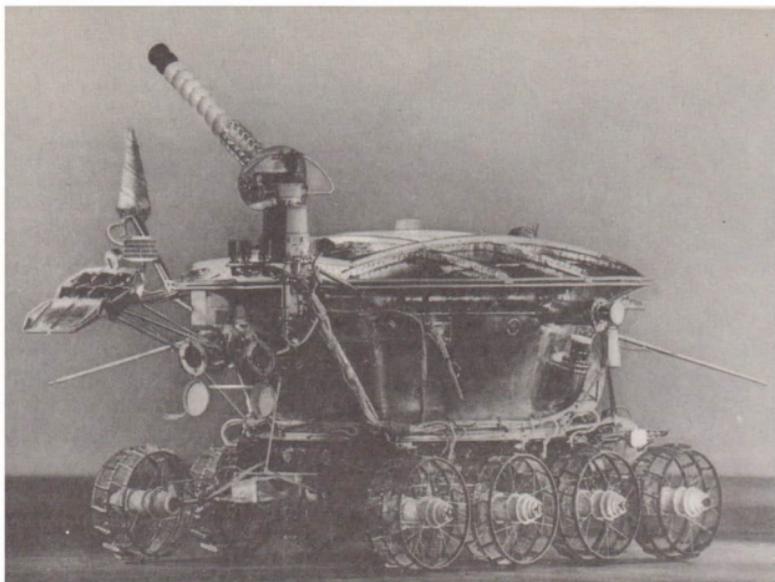
Das Wolgabispiel sollte unterstreichen, wie gering im allgemeinen der Abtrag im Bereich Mittelgebirge bis Flachland ist. Kommt noch eine geschlossene schützende Pflanzendecke hinzu, wie vielerorts in unseren europäischen Gebieten, dann kann der mechanische Abtrag sogar



*Talsperre Nurek im Bau
Am Flußufer gegenüber der Wasserkraftwerksanlage ist die typische
Verbiegung der Schichtgesteine zu erkennen.*

fast völlig aufhören. Die im Lauf der Jahre aber nie ganz ausbleibenden extremen Witterungserscheinungen wie Wolkenbrüche, Sturm und Hochwasser bewirken dennoch immer wieder eine (wenn auch nur ruckweise) Neubelebung der Denudation.

Die uns auf der Erde vertrauten Erscheinungen der Verwitterung und des Abtrags lassen wohl keinen Zweifel daran, daß dem fließenden Wasser die mit Abstand wichtigste Rolle im physikalischen und chemischen Kräftespiel solcher Prozesse zukommt. Und dieser Teil des oberirdischen Stoffkreislaufs geht vielfach so rege vonstatten, daß ohne Nachschub neuer Gesteinsmassen aus der Tiefe die Kräfte der Verwitterung längst einen weltweiten Reliefausgleich bewirkt hätten.



*Mondmobil „Lunochod 1“, am 17. November 1970 im Mare Imbrium
in Betrieb genommen*

Kosmische Verwitterung – von der Raumfahrt entdeckt

Sicherlich wird die spezifische Form der vor allem vom Wasser bewirkten Verwitterung unseres Planeten keinen Doppelgänger im Sonnensystem haben. Aber welche Verwitterungsprozesse mögen sich dann auf den anderen erdähnlichen Himmelskörpern vollziehen?

Von vornherein müssen wir hier zwischen atmosphärefreien und atmosphäreführenden Planeten unterscheiden. Je kleiner der Planet, desto besser blieben ursprüngliche Erstarrungsformen erhalten! So lautet eine Hauptregel, deren Gültigkeit wir es verdanken, daß wir unersetzbare Zeugnisse aus der Frühzeit des Planetensystems auf den kleineren Geschwistern der Erde bewahrt finden. Man glaubte sogar eine Zeitlang, die Kraterlandschaft des Mondes sei uns so gut wie unverändert als Urkruste dieses Himmelskörpers überliefert worden. Die Auffassung, wonach es sich beim Mond um einen viel älteren

Formenschatz handelt, als er auf der Erdkruste irgendwo je erhalten geblieben sein könnte, gilt zwar auch heute noch. Allerdings war bis vor einiger Zeit damit allgemein die Vorstellung verbunden, jene – wie wir heute wissen, zum Teil über 4 Milliarden Jahre alte – Großkraterlandschaft unseres Trabanten sei tatsächlich seine Urkruste im Sinn der ersten Erstarrungshaut. Daß dies nicht zutrifft und sich in Wirklichkeit zwischenzeitlich eine totale Krustenaufschmelzung vollzogen haben muß, konnte inzwischen mittels Laboruntersuchungen von Mondgestein erkannt und bewiesen werden.

Die Raumfahrt hat aber in der Phase der Monderkundung auch zur Entdeckung beziehungsweise neuen Definition der zuvor fast un-

Von „Lunochod 1“ aufgenommenes Mondpanorama wird im wissenschaftlichen Zentrum empfangen.



bekanntes kosmisches Verwitterung geführt. Darunter versteht man heute im engeren Sinn die Zerstörung des Festgesteinsverbandes bis zur Pulverisierung durch den Teilchenbeschuss der kosmischen Strahlung. Im weiteren Sinn gehören zur kosmischen Verwitterung noch zwei auch auf der Erde wirksame Komponenten: Erstens die Sprengung des Gesteinsverbandes infolge der durch wechselnde Stärke der Sonneneinstrahlung ausgelösten Temperaturschwankungen; dieser vor allem in heißen Trockengebieten auftretende Effekt wird als Insolationsverwitterung (lat. *insolare* = einstrahlen) bezeichnet. Und zweitens die Zerrüttung des Gesteinsverbandes durch seismische (griech. *seismos* = Erdbeben) Erschütterungen, ausgelöst vom kosmischen Dauerbombardement mit meteoritischer oder Kometenmaterie. Beide Komponenten sind auf dem Mond viel ausgeprägter als auf der Erdoberfläche, weil dort eine dämpfende Atmosphäre fehlt.

Während wir für Merkur und unseren Mond die Wirksamkeit der kosmischen Verwitterung vergleichsweise sehr ähnlich zu veranschlagen haben, gelten für Venus und Mars wegen des Vorhandenseins ganz unterschiedlicher Atmosphären wieder Sonderbedingungen.

Auf der Venus sollten eigentlich kosmische Verwitterungsprozesse noch seltener sein als bei uns. Selbst Meteorite um 100 t Masse werden beim Eintauchen in die Atmosphäre so stark gebremst und erleiden durch die atmosphärische Reibung einen so beträchtlichen „Glühverlust“, daß sie nicht mehr in der Lage sind, beim Erreichen der Planetenoberfläche einen größeren Aufschlagskrater zu erzeugen. Kleinere Körper, eventuell auch aus größeren durch Explosion in der Atmosphäre hervorgegangen, legen – wie auf der Erde – nach Verlust ihrer kosmischen Geschwindigkeit den letzten Teil des Absturzes gemäß den Gesetzen des freien Falls zurück, das heißt unter Venusbedingungen infolge der hohen atmosphärischen Dichte stärker gebremst als auf der Erde. Wir dürfen gespannt sein, inwieweit man bei einer zukünftigen intensiveren Erforschung des Venusbodens tatsächlich auf einen erhöhten Meteoritensplittergehalt stoßen wird.

Eine Temperaturverwitterung im Sinn von Insolationseffekten kann auf der Venus schon gar nicht mehr stattfinden, da bekanntlich nur wenige Prozent des einfallenden Sonnenlichts bis zur Oberfläche vordringen. Außerdem ließen sich bisher am Boden nur sehr geringe Temperaturunterschiede von einigen wenigen Kelvin zwischen Tag- und Nachtseite registrieren.

Die große Unbekannte auf der Venus ist die äolische (Äolus = in der griechischen Sage Beherrscher der Winde) Verwitterung, also die

Abtragsleistung des Windes. Die hohe Dichte der Venusatmosphäre eröffnet viele Möglichkeiten, doch fehlen Temperaturgegensätze als treibende Kraft. Vielleicht kommt es auch darauf an, inwieweit größere Meteoriteneinschläge oder ein zu vermutender Venusvulkanismus atmosphärische Stürme in bodennahen Schichten auszulösen vermöchten. Aber es wäre wohl müßig, über diese Dinge, die uns die Raumfahrt in absehbarer Zeit genauer zu erfassen verspricht, hier noch länger zu spekulieren.

Für den Mars bestehen dank den bisherigen Raumfahrterfolgen all diese Unsicherheiten schon nicht mehr. Die äolische Form des Abtrags übertrifft heute eindeutig alle sonstigen Arten der Verwitterung. Da die Dichte der Marsatmosphäre aber kaum ein Hundertstel der irdischen erreicht, bleibt – absolut gesehen – trotz zeitweilig auftretender Orkanböen die erzielte Abtragsleistung weit hinter den von der Erde bekannten Werten zurück. Dies hat auf dem Mars an Geländeformen eine für die kosmische Geologie in gewisser Hinsicht als ideal zu bezeichnende Mischung von Umlagerungserscheinungen und konservierten Urkrustenelementen geschaffen.

Das Nebeneinander von Meteoriteneinschlägen und Vulkanen, von Strukturen, die auf echte Krustenbewegungen zurückgeführt werden müssen, sowie von Oberflächenmerkmalen, die das strömende Wasser, das Eis oder der Wind hinterließen und die sich insgesamt über eine Zeitspanne von mehr als 4 Milliarden Jahren verteilen dürften, eröffnet natürlich der kosmischen Geologie für Fragestellungen zur Entwicklungsgeschichte der Planeten fast ungeahnte Möglichkeiten.

Wir lassen zunächst einmal die Umformungsprozesse der älteren Marsgeschichte, bei denen das Wasser noch eine viel größere Rolle spielte, außer acht und beschäftigen uns auf der Suche nach Anzeichen für die kosmische Verwitterung mit dem Mars von heute.

Mit einer hochinteressanten, aktuellen Erscheinung der äolischen Verwitterung auf diesem Planeten haben wir schon Bekanntschaft gemacht: der staubverhüllten Atmosphäre bei Ankunft der beiden sowjetischen und der amerikanischen Marssonde Ende 1971. Was dann in den folgenden Monaten unter der von Tag zu Tag klarer werdenden Marsatmosphäre in den Großkraterlandschaften zum Vorschein kam, entschädigte die Geowissenschaftler vollauf für die anfängliche Enttäuschung. Viele Krater trugen nach dem großen Sturm so etwas wie lange Bärte, bei denen es sich in Wirklichkeit um eine Staubschürze handelte, die sich am leeseitigen Hang niedergeschlagen hatte. Sofort ergab sich ein neues Problem, als ein Vergleich der Fotos zeigte, daß



offensichtlich nicht nur weiße Staubwehen hinter Kratern auf dunklem Grund existierten, sondern auch umgekehrt dunkle „Bärte“ im Lee von Kratern auf hellem Grund auftraten. Was war hier der Staub und was der freigewehte Marsboden? Gab es vielleicht hellen und dunklen Staub auf dem Mars, sozusagen als erstes Zeugnis zweier verschiedenartiger Gesteinssorten? Oder hatte man es nur mit Korngrößenunterschieden zu tun? Die richtige Antwort liegt nach modernen Auffassungen wahrscheinlich bei der letzten Variante. Entsprechend fotometrischen und anderen Meßergebnissen sollen die Staubkorn-durchmesser der dunklen Gebiete 100 bis 200 μm (0,1–0,2 mm) und die des helleren Staubs etwa 25 μm betragen. Übrigens kann der Effekt der Aufhellung einer Substanz durch Kornverfeinerung auch an zahlreichen irdischen Beispielen demonstriert werden.

Wertet man all diese Windzeugnisse auf dem Mars aus, so kommt man zu interessanten Ergebnissen. Trotz mancherlei lokaler Abweichungen läßt sich nämlich aus der nach Süden orientierten Hauptrichtung der Staubfahnen hinter den Kratern die Tendenz ableiten, daß der helle Staub besonders in den äquatornahen Breiten zum Südpol hin strömt. Die dunklen Fahnen häufen sich dagegen in Südpolnähe und verweisen gerade umgekehrt auf eine bevorzugte Verwehung von Gesteinstaub mit wohl etwas größerem Korn weg vom Pol und hin zum Äquator.

Unter Umständen konnten sich im Innern einzelner Großkrater oder anderer Senken sogar echte Dünenfelder bilden, wie wir sie bisher nur von der Erde her kennen. Ein solches Feld – größer als die Fläche der Insel Rügen – wurde schon 1972 auf der Südhalbkugel des Mars im Innern des Kraters Proctor gefunden, der 150 km Durchmesser hat. Es baut sich aus zahlreichen fast parallelen Dünenkämmen auf, deren Abstand bei 2 bis 3 km liegen soll, während die Dünen in Längsrichtung der Käme teilweise zu Ketten von mehreren zehn Kilometern Länge verschmolzen erscheinen.

Zwar sind diese Staub- oder Feinsandablagerungen ein Zeugnis dafür, daß beträchtliche Abtragsleistungen der äolischen Verwitterung auf dem Mars vorliegen. Die daraus folgende Einebnung des Marsreliefs über die enorme Zeitspanne von Jahrmilliarden mengenmäßig abzuschätzen, ermöglichen die bis jetzt ins Bild gekommenen Ablagerungen aber noch nicht mit Sicherheit. Hierzu bietet sich ein anderer

Staubniederschlag hinter Kraterrändern auf dem Mars, 1972 von „Mariner 9“ aufgenommen

Weg. Versucht haben die Wissenschaftler das bereits über einen Vergleich der Kraterdichte von Mars und Mond. Da uns dieser Vergleich wie überhaupt die Kraterlandschaften auch der anderen kleineren Himmelskörper noch eingehend beschäftigen werden, seien hier nur die zum Verständnis des äolischen Abtrags notwendigen Informationen vorweggenommen.

Erste Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Kraterlandschaften auf den benachbarten Himmelskörpern der Erde, wie Mars, Merkur und Mond, sind gleiche oder mindestens sehr ähnliche Entstehungsbedingungen. Wir gehen ferner von der begründeten Annahme aus, daß der bei weitem überwiegende Teil der Krater durch Kollisionen (Zusammenstöße) erzeugt wurde. Krater, die ihre Entstehung anderen Kräften, zum Beispiel dem Vulkanismus, verdanken, lassen sich nach Form und Anordnung von diesen meteoritisch erzeugten Kratern unterscheiden und gehen nicht in unsere Vergleichsstatistik ein.

Als charakteristisches Ergebnis eines Mars-Mond-Vergleichs gilt, daß die Kraterlandschaften des Mars – von regionalen Unterschieden einmal abgesehen – generell weniger kosmische Einschläge aufweisen als unser Mond, daß sich aber außerdem auf dem Mars bei Kratern unter 50 km Durchmesser die Anzahl kleinerer und kleinster Narben von Meteoriteneinschlägen zusätzlich verringert zeigt. Vor allem in den hochgelegenen Altkraterlandschaften werden für diese Verminderung die äolischen Verwitterungsprozesse verantwortlich gemacht; denn je kleiner der Krater, desto geringer ist seine absolute Relieffhöhe und desto leichter läßt er sich einebnen. Als mittlere Geschwindigkeiten für die relieflöschenden Verwitterungsprozesse wurden Auffüllungs- beziehungsweise Abtragsraten von Zentimetern in 10 000 Jahren genannt.

Nachdem die Ergebnisse der „Viking“-Sonden vorliegen, beurteilt man heute die Rolle der äolischen Verwitterungsprozesse bei der Verminderung der Kleinkrater etwas vorsichtiger. Nicht daß etwa grundsätzlich die außerordentliche Bedeutung der Sandstrahlgebläsewirkung des Windes auf dem Mars angezweifelt würde, man hat vielmehr noch weitere Faktoren, die in gleicher Richtung Einfluß ausüben können, besser einzuschätzen gelernt.

Was verraten die Schichtgesteine ?

War schon bei den Verwitterungsprozessen auf der Erde die wichtige Rolle des Wassers unübersehbar, so ist sie es bei der Ablagerung der Verwitterungsprodukte erst recht. Die Endstation der Geröllfracht der Flüsse, ihrer Schlammassen und Sande sowie der gelösten Salze bildet letztlich doch das Meer, auch wenn es viele Zwischenstationen gibt.

Der Absatz an der Küste erfolgt in Abhängigkeit von der Transportkraft des Wassers. Da diese im Meer gegenüber den Flüssen gewöhnlich erlahmt, kommt es zunächst zur Ablagerung oder Sedimentation der größeren Anteile. Küstennah setzen sich also, falls überhaupt noch vorhanden, zuerst der Kies und der Grobsand ab, dann folgen die feinerkörnigen Sande und zuletzt aus der Schwebfracht der feinstkörnige Ton. Im allgemeinen reicht die Meeresströmung aus, um diesen Bestandteil der Flüsse als Schwebstoff noch weit in küstenfernere, meist tiefere Meeresbeckenbereiche zu transportieren, wo endlich auch er – gleichsam unter Stillwasserbedingungen – abgesetzt wird.

Wieviel Zeit mag vergehen, bis 1 mm Sinkstoff in den küstenfernen Tiefseebecken abgelagert wird? 1000 Jahre, manchmal mehr und manchmal weniger, geben die Geologen zur Antwort. Es hängt eben sehr von der Sedimentzufuhr und den Bodenströmungen über dem endgültigen Absatzraum ab. Wenn wir uns aber umsehen unter den unzähligen Schichtprofilen des festen Landes, deren Gesteine einst im Meer entstanden und durch gebirgebildende Kräfte den Kontinenten wieder einverleibt wurden, dann finden wir solche geringen Ablagerungsraten von einem Millimeter in 1000 Jahren oder von einem Meter in einer Jahrillion nur in ganz wenigen Ausnahmefällen; meist ist es mehr, viel mehr sogar. Diese Sedimente müssen folglich unter anderen Bedingungen entstanden sein.

Etwa das Fünf- bis Zehnfache, also 50 bis 100 m in 10 Millionen Jahren, betragen die tatsächlichen Sedimentationsraten, die für die Ablagerungen der Schichtfolgen Mitteleuropas, speziell auch der DDR, im Lauf der Erdgeschichte die Regel waren. Daneben haben aber einzelne Gebiete für kürzere Zeiträume noch ein Vielfaches dieser Sedimentmengen abgefangen.

Es ist den Geologen schon lange bekannt, daß unterschiedlichen Sedimentmächtigkeiten gleicher Zeiträume ebenfalls charakteristische unterschiedliche paläogeographische (griech. palaios = alt) Situationen, das heißt unterschiedliche Küstenabstände und Tiefenlagen des Meeresbodens, entsprechen und daß davon nicht nur die Mächtig-



Fossiles Muschelpflaster auf thüringischem Kalkstein der Triaszeit

keit, sondern sehr stark auch die Gesteinsausbildung der jeweiligen Schichten geprägt wurde. So verraten geringmächtige, dunkle Tone eine Entstehung in küstenferneren, tieferen Meeresbecken, versteinungsreiche Kalksteine bildeten sich meist in ungetrübten, lichtdurchfluteten und warmen Flachwasserregionen der Ozeane, während sich die sehr mächtigen Wechsellagerungen von Ton und Sand oft als Sedimente von Flußmündungen und deren Deltas wiedererkennen lassen.

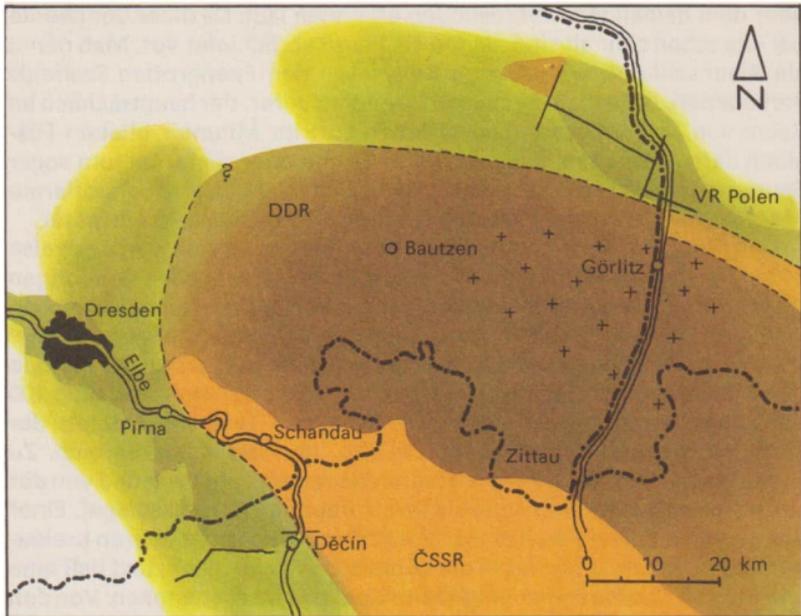
Auf dem Gebiet der DDR haben trotz der Kleinheit unseres Territoriums, bedingt durch eine sehr wechselvolle Entwicklungsgeschichte des geologischen Untergrunds, fast alle diese unterschiedlichen Situationen einmal bestanden, so daß sich auch zahlreiche Beispiele dafür finden. Es könnte vielleicht ganz reizvoll sein, auf diesem Weg etwas mehr über die geologische Entwicklungsgeschichte unserer Heimat kennenzulernen.

Unter den geringmächtigen Sedimenten mit sehr kleiner Ablagerungsgeschwindigkeit wäre als erstes Beispiel der Faulschlamm zu nennen, ein Stillwassersediment mit Resten abgestorbener Organismen, dessen Sulfidgehalt einen lebensfeindlichen Sauerstoffmangel

über dem damaligen Meeresboden erkennen läßt. Da diese Sedimente bei uns schon sehr alt sind, liegen sie heute als Schiefer vor. Man nennt sie Alaunschiefer, wie sie zum Beispiel in den Feengrotten Saalfelds vorkommen, oder man spricht von Kupferschiefer, der hauptsächlich im Raum von Sangerhausen und Eisleben auftritt. Mitunter blieben Fossilien daraus erhalten, beispielsweise Fische oder später im Jura sogar Saurierreste, deren Lebensraum natürlich nicht der sauerstoffarme Meeresgrund war, sondern das nährstoffreiche Oberflächenwasser.

Den Typ der Schelf- oder Tafelsedimente, der sich vorzugsweise unter Flachwasserbedingungen herausbildete, wie sie etwa im heutigen Nord- und Ostseeraum bestehen, treffen wir in unseren heimatlichen Profilen häufig an. (Schelf nennt man den unter dem Meeresspiegel liegenden Rand der Kontinente.) Fast während der gesamten Periode des Mesozoikums, also des geologischen Erdmittelalters vor rund 100 bis 230 Millionen Jahren, befanden sich große Teile des Gebiets der DDR, vorwiegend der nördlichen Hälfte, im Flachwasserbereich. Zu Zeiten besonders weiter Meeresvorstöße ragten vom Harz und von der Lausitz nur die höchsten Teile als Inseln über den Meeresspiegel. Einer der letzten und weitesten dieser Vorstöße reichte in der oberen Kreidezeit über das Elbtal bis tief in die böhmische Senke hinein und ließ eine von breiten Sandstränden umgebene Lausitzer Insel entstehen. Von den schon damals reichlich vorhandenen granitischen Gesteinen dieser Insel blieb nach Verwitterung unter tropisch-feuchten Bedingungen fast nur der Quarz als eines der widerstandsfähigsten Minerale übrig. Und so konnten sich im Lauf von einigen Jahrmillionen mehrere hundert Meter sandige Sedimente rund um die Insel ablagern. Nachdem sie zu Sandstein verfestigt und 120 Millionen Jahre später erneut gehoben worden waren, arbeitete die Elbe mit ihren Nebenflüssen die bekannten Steilwände der Sächsischen Schweiz aus dem südwestlichen Teil des Sandsteinrings um die Lausitzer Insel heraus.

In weiten Gebieten Osteuropas, besonders in der europäischen Sowjetunion, hat dieser Sedimentationstyp der Schelfe sogar noch länger vorgeherrscht als bei uns, nämlich nicht erst seit dem Mesozoikum, sondern außerdem nahezu das ganze Paläozoikum hindurch, also fast über 500 Millionen Jahre. Hier auf der Russischen Tafel, wie sie die Geologen nennen, markieren zahlreiche Schichtlücken im Gesamtprofil auch mehrere zwischenzeitliche Hebungsphasen. Es sieht nach unseren heutigen Kenntnissen so aus, als würde die Erdkruste neben den bekannteren starken Vertikalbewegungen, die zum Aufbau der großen Kettengebirge führen, noch eine Art sanfterer Schwingungen vollzie-



Vermutete Ausdehnung der Lausitzer Insel zur Kreidezeit



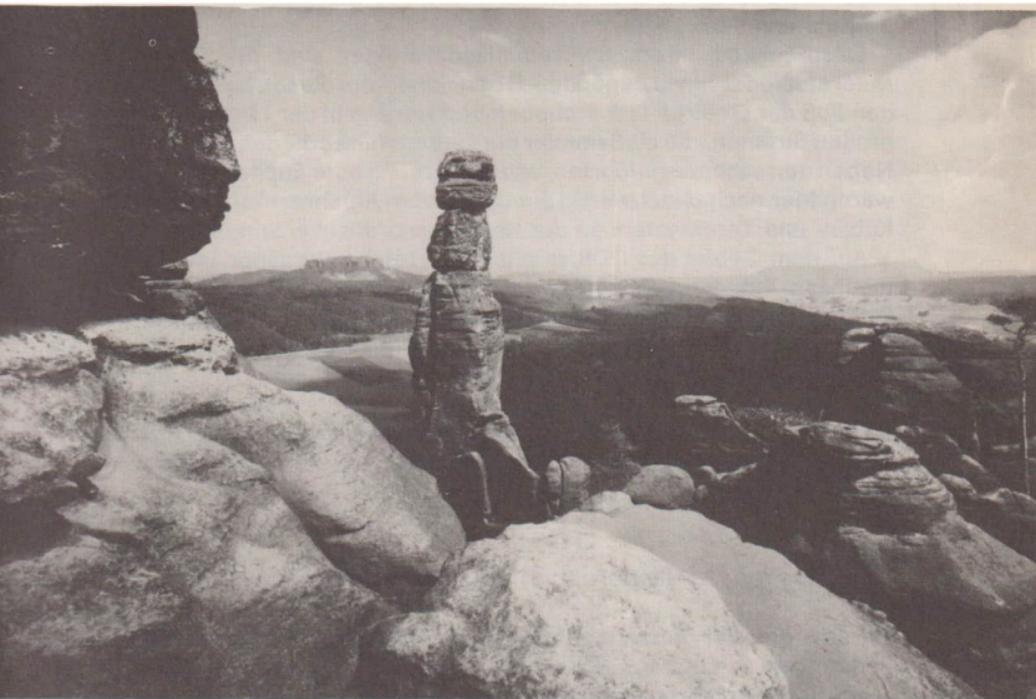
hen, deren Periode einige zehn bis vielleicht sogar mehrere hundert Millionen Jahre umfassen kann und die uns diese Schichtlücken auf den flachen Plattformen der Kontinente widerspiegeln.

Aber wir haben in der Erdgeschichte Zentraleuropas demgegenüber auch Zeiten zu verzeichnen, in denen bei uns Spitzengeschwindigkeiten der Sedimentation herrschten. 1 km Sediment in 10 Millionen Jahren, das ist zum Beispiel eine Ablagerungsgeschwindigkeit, wie sie in Schelfen nur ganz selten auftritt, dafür jedoch um so mehr in Sedimentationströgen oder – wie es in der Fachsprache heißt – in Geosynklinalen, die durch große Krustenabsenkungen entstehen und wahre Sedimentfänger sein können. In 10 Millionen Jahren werden darin oft sogar 2 oder 3 km, ja manchmal noch mehr Sediment gebildet. Man hat

den Ablagerungsräumen, die zu diesem ganz schnellen Typ der Sedimentation gehören, besondere Namen gegeben. So spricht man von Vorsenken an Kontinentalrändern und nennt die Füllung Molasse (franz. mollasse = allzu weich), wegen der sehr weichen, das heißt leicht zerbröckelnden Sandsteine, die meist darin abgelagert wurden. Da häufig schon an den Rändern dieser Vorsenken wenigstens an einer Seite ein verstärkt Sedimente lieferndes Gebirge existiert, werden sie auch als Saumsenken der Faltengebirge bezeichnet.

Charakteristisch ist bei sehr starker Gebirgsschuttfuhr in solchen Saumsenken selbst heute noch, daß die dauernd stattfindende Absenkung den Sedimentgewinn mit der Zeit nicht mehr ausgleichen kann

Barbarine am Pfaffenstein, einer der markantesten Sandsteintürme der Sächsischen Schweiz



und der Meeresarm oder Küstenstreifen infolgedessen oft allmählich verlandet. Bei uns geschah das etwa zur mittleren Karbonzeit. Doch hierfür lassen sich auch eine ganze Reihe gegenwartsnaher und deshalb vielleicht deutlicherer Beispiele anführen. Halb schon verlandet, zur anderen Hälfte aber noch zum Meer gehörig, befindet sich die Kombination Poebene — Adria am Rand der Alpen und der jugoslawischen Kettengebirge der Dinariden in einem solchen Übergangsstadium. Weiter im Südosten wiederholt sich diese Situation in der Euphrat- und Tigrizebene mit ihrer derzeitigen Fortsetzung im Persischen Golf am Rand der Faltenketten des Iran.

In einem fortgeschrittenen Stadium und daher bereits völlig trocken sind die Nordrandtröge der Alpen und des Kaukasus. Aber auch die südliche Saumsenke des höchsten Gebirges der Erde, des Himalaja, wurde durch überreichliche Schutzzufuhr dem Meer entrissen. Hier in der Gangesebene hat die Mächtigkeit der sehr sandigen Molasse örtlich sogar bereits 20 km und mehr erreicht. Als durchschnittlich gelten Beträge von 5 bis 10 km.

Entsprechend ihrem Schwemmlandcharakter sind die über den Meeresspiegel hinausragenden Oberflächen der Randtröge oft bis an den Fuß der Gebirge fast tischeben und werden in der Längsachse von großen Strömen, die als Sammler der Gebirgsflüsse dienen, entwässert. Neben den schon angeführten, wie Ganges, Po oder Euphrat und Tigris, wären hier noch gleichwertig die Donau vom Alpennordrand sowie das Kuban- und Tereksystem an der Kaukasusnordflanke zu nennen.

Auf dem Gebiet der DDR spielten sich solche Vorgänge im Zusammenhang mit der Entstehung des variszischen Gebirges ab, dessen Faltenketten ja bekanntlich von Zentralfrankreich quer über Mitteleuropa bis nach Südpolen reichen. Viele Sedimente im Innern unserer Mittelgebirge, hauptsächlich des Harzes, des Thüringischen Schiefergebirges und des Vogtlands, wurden in solchen Senken gebildet. Sie haben vorwiegend devonisches und karbonisches Alter, sind also vor 250 bis 350 Millionen Jahren entstanden und gehören damit alle noch in das Paläozoikum.

Überraschende Ablagerungen am Meeresboden

Da sich uns der Zusammenhang zwischen Hochgebirgen und ihren Randtrögen so einprägsam darstellt, kann es nicht verwundern, daß er schon fast ein Jahrhundert lang als geklärt gilt. In der Verborgenheit

unterhalb des Meeresspiegels ging jedoch ein für die Beziehung zwischen Gebirge und Sedimentation nicht minder wichtiger Prozeß vor sich. Erst seit Anfang der fünfziger Jahre haben moderne Methoden der Submarineologie Schritt für Schritt den Schleier gelüftet. Bis dahin stand man ziemlich ratlos vor vielen Sedimentprofilen der Gebirge, in denen sozusagen verbotenerweise Flachseeablagerungen mitten zwischen Tiefseesedimenten auftraten. Manchmal geschah das sogar durch Einschaltung von Blöcken in einem dann ziemlich chaotisch wirkenden Gesteinsverband; von einer Schichtung war hier nicht mehr viel zu sehen. Wie kommen kopfgroße Blöcke, ja mitunter sogar solche von Kubikmetergröße in so küstenferne und ruhige Meeresregionen, wenn selbst reißende Gebirgsbäche kaum imstande sind, sie zu bewegen?

Bevor die wahren Zusammenhänge erfaßt werden konnten, beherrschten zwei Meinungen die öffentlichen Diskussionen der Geowissenschaftler. Dort, wo die Geröllverteilung in den Profilen eine relativ geringe Dichte aufwies, fühlte man sich an Eiszeitsedimente erinnert, an Moränen – von Gletschern abgelagerten Gesteinsschutt – in erster Linie, die ja ebenfalls durch regellos eingestreute Blöcke – Geschiebe genannt – gekennzeichnet sind. Könnte es nicht sein, so meinten einige Theoretiker, daß von schmelzenden Eisbergen, die weit über die Ozeane dahintrieben, dieses einst eingefrorene Moränenmaterial direkt auf die Tiefseeböden absank und dann als Fremdkörper in deren Sedimente eingebettet wurde? Bot sich hier nicht sogar ein neues Mittel, vergangene Eiszeiten aufzuspüren, von denen sich sonst keinerlei Reste mehr auffinden lassen?

Tillite nannte man solche fossilen „Moränenmaterialien“ – die echten wie die falschen –, die im günstigsten Fall, wie vom etwa 280 Millionen Jahre alten und nach wie vor unangefochtenen Paradebeispiel einer Eiszeit aus Südafrika bekannt, sogar in Verbindung mit Gletscherschleifspuren auf dem Untergrund vorkommen können. Auf einmal wimmelte es von Eiszeitbelegen in vielen Formationen der Erdgeschichte. Das machte schließlich doch stutzig. Aber selbst heute ist der Streit um die Echtheit mancher dieser Eiszeit Spuren noch nicht abgeschlossen, weil sich die Merkmale für die Entscheidung, ob Tillit oder Pseudotillit, oft gar nicht so ohne weiteres finden lassen. In der DDR zum Beispiel standen devonische und ordovizische Schichten unter diesem „Eiszeitverdacht“. Für die devonischen Schichten war das nur eine kurze Episode; ihr Pseudotillitcharakter wurde schnell erkannt, zumal annähernd gleichaltrige Korallenkalke untrüglich ein tropisch-

warmes Klima anzeigten. Aber um die Deutung der Gerölle im etwa 480 Millionen Jahre alten sogenannten thüringischen Lederschiefer des Ordoviziums setzt sich der Meinungsstreit bis in die Gegenwart hinein fort. Viele Geologen sehen die Gerölle eher als Geschiebe an, zumal auf ihnen Schleifspuren ähnlich denen echter gekritzter (geschrammter) Geschiebe der letzten Eiszeit gefunden wurden.

Die zweite Deutung kam aus den Alpen, speziell den Schweizer Alpen. Hier hatte die geologische Strukturforschung um die Jahrhundertwende dank den großartigen Vorarbeiten vieler Geologen einen spürbaren Fortschritt in der Analyse des Alpenkörpers erzielt. Der Schweizer *Albert Heim* (1849–1937) stellte in seinem 1919 bis 1922 erschienenen Gesamtwerk zur „Geologie der Schweizer Alpen“ diese bedeutsamen geologischen Erkenntnisse sehr anschaulich dar. Er widmete auch der Beschreibung eines zuvor meist weniger beachteten Sediments breiten Raum, das den Namen Flysch erhalten hatte. Dieser Begriff ist von dem Schweizer mundartlichen Ausdruck für fließen abgeleitet und unterstreicht die höchst unangenehme Eigenschaft dieser Gesteine, bei Durchnässung leicht ins Rutschen zu kommen.

Für die Geologen aber waren die darin eingeschlossenen Fremdlinge von Geröll- und Blockgröße das Hauptmerkmal. Das Bild glich vielerorts jenem, welches bereits von den Pseudotilliten gezeichnet wurde. Hier aber kam, besonders in der Nachbarschaft der Berner Alpen, noch eine ungeheuerliche Steigerung hinzu. Ungeheuerlich vor allem deshalb, weil die eingeschlossenen Fremdkörper nicht mehr nur nach Zentimetern zu messen waren, sondern auch kubikmeter-, ja über hausgroß in einem schlierig-verkneteten Gemisch von Ton, Sand und Geröll auftraten. Wo lag überhaupt die obere Grenze der Blockgröße? Die Aufschlüsse reichten ja bald nicht mehr aus, einen einzigen dieser Riesen vollständig zu erfassen! Die weiteren Forschungsarbeiten haben dann tatsächlich nachzuweisen gestattet, daß die 10- und 100-m-Dimension noch nicht die Endgröße derartiger Blockriesen markiert, sondern daß ganze Berge aus nur einem solchen Fremdling bestehen können. Man hat auch an Profilen anderer Faltengebirge der Erde, zum Beispiel des Tienschan im Süden der Sowjetunion, inzwischen erkannt, daß ein fließender Übergang von geschiebegroßen Fremdlingen im Sediment zu Riesenblöcken überall dort vorhanden ist, wo diese gewaltigen Schubmassen angehören.

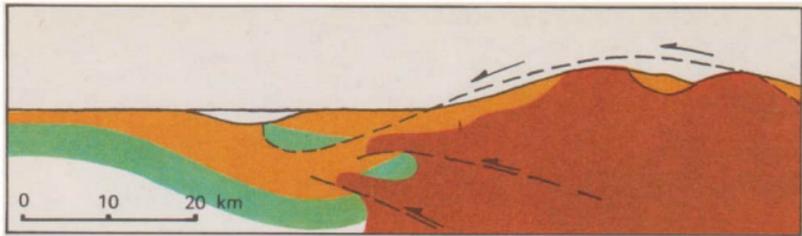
Und hier setzte die neue Deutung an. Die Fremdlinge, auch exotische Blöcke genannt, wurden als Trümmer von den Fronten wandernder Gesteinsdecken angesehen. Gesteinsdecken sind oft über hundert



Typische Verfallung von feinschichtigen sandigen Sedimenten, die durch Gleitvorgänge am geneigten Meeresboden entstand

Kilometer lange und mehrere zehn Kilometer breite, aber vielfach nur einige hundert Meter bis wenige Kilometer dicke Pakete. Daß die Alpen aus Gesteinsdecken bestehen, hatte man erst wenige Jahre zuvor begriffen, und es war nicht leicht, die hiermit verbundenen, für die damalige Zeit fast abenteuerlich klingenden Ideen zu verteidigen. Sollte es doch nach der Lehre vom alpinen Deckenbau möglich gewesen sein, daß sich Gesteinspakete von mehreren Kilometern Mächtigkeit auf über 200 bis 300 km breiter Front um einige zehn, vielleicht sogar mehr als 100 km über ihr Vorland geschoben hatten! Das heißt mit anderen Worten: Kalkige Meeressedimente, die einst im damals noch submarinen Bereich Oberitaliens abgelagert wurden, finden wir heute beispielsweise als Nördliche Kalkalpen wieder.

Unabhängig davon, ob diese Deutung bis in alle Einzelheiten das Richtige traf – der neue Sedimenttyp, dessen soeben beschriebene Extremform die Bezeichnung Wildflysch erhielt, blieb für Jahrzehnte im Gespräch. Dies auch schon deshalb, weil die Anzahl der Decken-



Einfaches Deckenbauschema vom Rand junger Gebirgsbögen



baubelege aus anderen Gebirgszügen der Erde immer weiter anwuchs. Bald wurde diese Bauformel als zutreffend für das Skandinavische Gebirge, für Teile Schottlands, die Appalachen Nordamerikas, den Himalaja und einige andere zentralasiatische Gebirge erkannt. 1927 wendete der damalige Direktor des Leipziger Geologischen Instituts, *Franz Kossmat* (1871–1938), die neue Theorie erstmalig auf den Harz an und löste eine Flut von Für- und Gegenschriften aus. Wenn auch die Geologen der DDR dem alten Kossmatschen Deckenbaukonzept nach den ihnen inzwischen zur Verfügung stehenden, weitgehend verbesserten Unterlagen nicht mehr folgen können – der anregende Grundgedanke seiner Vorstellungen ging dennoch in die gegenwärtigen Auffassungen über den Bauplan des Harzes ein. Diese aber sind auf das engste mit den modernen Erkenntnissen zur Flysch- und Wildflyschentstehung verbunden.

Um es vorwegzunehmen: Es ist gar nicht notwendig, die Ursache für das zunächst überraschende, im Flysch gefundene Nebeneinander so unterschiedlicher Blöcke, die mal aus Granit oder Basalt, mal aus Korallenkalk und mal aus Sandsteinen bestehen, ausschließlich in zerfallenden Gesteinsdecken zu suchen, sondern die dazu führenden Vorgänge vollziehen sich, wie wir heute wissen, vorzugsweise an den Schelfrändern als dort gar nicht so seltener Sedimentumlagerungsprozeß.

Beweisen konnte man dies aber erst, nachdem es möglich geworden war, mit Hilfe verbesserter technischer und geophysikalischer Methoden vom Tiefseeboden Bohrkerne ans Tageslicht zu fördern oder das submarine Relief und den Feinbau des oberflächennahen Untergrunds

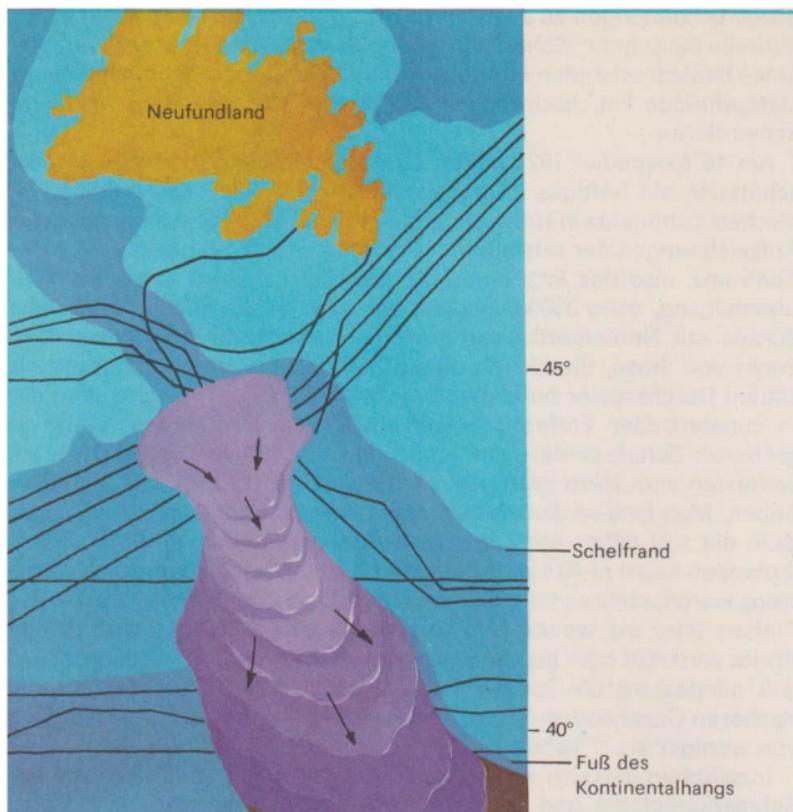
durch Echolotungen zu analysieren. Mit diesem Rüstzeug sowie etwas „kriminalistischem“ Scharfsinn gelang es sogar, den wahren Charakter eines beeindruckenden Ereignisses, das 1929 vor der Neufundlandbank stattgefunden hat, nachträglich zu erfassen und den Vorgang zu rekonstruieren.

Am 18. November 1929 gegen 21.32 Uhr mitteleuropäischer Zeit erschütterte ein heftiges Erdbeben die Atlantikküste des nordamerikanischen Kontinents in Höhe der Neufundlandbank. Die Auswertung der Aufzeichnungen der seismischen Stationen ergab die genaue Lage des Zentrums, also des Entstehungsherdes, bei 44° Nord direkt am Kontinentalhang, etwa 300 km südlich der Insel Neufundland. Zahlreiche Europa mit Nordamerika verbindende Transatlantikkabel lagen dort. Sechs von ihnen, die sich in einem herdnahen Bereich von mehr als 100 km Durchmesser befanden, brachen sofort. Fünf weitere aber, die in zunehmender Entfernung hangabwärts folgten, brachen erst in größeren Zeitabständen, das letzte und mit 500 km Distanz auch am weitesten vom Herd entfernte 13 Stunden und 17 Minuten nach dem Beben. Man fand es damals besonders merkwürdig, daß im Gegensatz dazu die viel näher am Zentrum befindlichen, aber nördlich vorbeilaufenden Kabel nicht zerstört wurden. Reparaturschiffe, die bald unterwegs waren, stellten fest, daß die Reste der zerbrochenen Kabel in der Tiefsee über ein weites Feld von 600 km Länge und bis etwa 500 km Breite verstreut oder begraben lagen. Außerdem war schon damals klar, daß mindestens die letzten drei Brüche auf dem über 4 km tiefen, flacheren Ozeanboden erfolgt sein mußten, der dort nur eine Neigung von weniger als 1° haben kann.

Inzwischen ließ sich auf Grund der oben erwähnten Fortschritte der Submarinegeologie und mit Hilfe von einigen sehr wertvollen Bohrkernen aus dem Bereich des südlichsten Kabelbruchs der wahre Ablauf der Ereignisse folgendermaßen deuten:

Durch das Erdbeben vom 18. November 1929 kam an der Neufundlandbank ein gewaltiges Sedimentpaket nahe dem Kontinentalabhang ins Rutschen. Viele Millionen Tonnen Schlamm wurden aufgewirbelt und formierten sich unter dem Meeresspiegel zu einem sogenannten turbulenten Trübstrom, der sich, seinen Konturen nach etwa einer Schneestaublawine vergleichbar, sehr schnell zum Fuß des Kontinentalhangs hin bewegte. Dabei erreichte er Spitzengeschwindigkeiten von über 100 km/h.

Wie es in einer Modellversuchsanlage kaum hätte besser vorgeführt werden können, gestatteten es die stufenweisen Kabelbrüche, die



Feld der submarinen Rutschungen und Kabelbrüche südlich der Neufundlandbank

-  gerutschte Meeressedimente
-  Überseekabel
-  Bewegungsrichtung

genaue Ankunftszeit der aufgewirbelten Schlammmassen am jeweiligen Kabellager zu registrieren, so daß wir auch über die Geschwindigkeitsänderungen, vor allem in dem sehr langen und flachen unteren Abschnitt, recht gut informiert sind. Danach hatten die Schlammmassen beim Erreichen des flacheren Tiefseebodens immer noch eine Ge-

schwindigkeit von annähernd 70 km/h, die sich erst beim Überqueren des südlichsten Kabels auf etwa 20 km/h verlangsamt.

Schließlich konnten mit Hilfe von Bohrungen Ausdehnung und Mächtigkeit der aufgewirbelten und wieder niedergeschlagenen Schlammmassen abgeschätzt werden. Danach legte der von der Rutschung erfaßte Schlamm Entfernungen bis zu 1000 km zurück und bedeckt heute den Tiefseeboden mit einer durchschnittlich 1 m dicken Schicht in einem Gebiet von mehr als 200 000 km², also von der doppelten Fläche der DDR.

Seit diese Erkenntnisse zum erstenmal veröffentlicht wurden, ist schon wieder über ein Vierteljahrhundert vergangen. Durch den nunmehr möglichen weltweiten Vergleich hat sich einwandfrei belegen lassen, daß der turbulente Trübstrom vor der Neufundlandbank kein

*Gesteinstrümmer eines rund 300 Millionen Jahre alten sandigen
Rutschmassensediments aus dem Devon des Harzes
Helle Brocken = Kalkstein*



Einzelfall war, sondern daß sich derartiges an den Schelfrändern aller Kontinente ständig abspielt. An besonders aktiven Zonen der Kontinentalhänge haben sich sogar über die Jahrtausende hinweg submarine Cañons als mehrfach benutzte riesige Spülrinnen herausgebildet. Unser Beispiel von der Neufundlandbank gehört übrigens im weiteren Sinn auch dazu; denn praktisch handelt es sich um einen Seitenast der untermeerischen Fortsetzung der Einmündungsrinne des großen Sankt-Lorenz-Stroms in den Atlantik.

In der DDR finden wir Flyschsedimente hauptsächlich im Harz, im Thüringischen Schiefergebirge und im Vogtland. Wer bei einer Wanderung durch den Harz, besonders in der weiteren Umgebung von Stolberg – Hasselfelde bis Harzgerode, mitten in einem sonst nur aus Tonschiefer und Grauwacken aufgebauten Gebiet plötzlich vor einem kleinen Kalkfelsen oder Kalksteinbruch steht, darf mit großer Wahrscheinlichkeit damit rechnen, einem echten exotischen Block begegnet zu sein, der in der Fachsprache heute Olistholith (Gleitstein) heißt.

Die reißen Ströme des Mars

Das sichtliche Fehlen des Wassers auf unseren engeren Nachbarn hat uns bisher veranlaßt, uns beim Analysieren der an sein Vorhandensein gebundenen Um- und Ablagerungsprozesse auf irdische Verhältnisse zu beschränken. Doch gibt es bekanntlich eine Ausnahme. Die Oberflächenformen des Mars weisen weite Talzüge auf, deren innere Strukturen an heute trocken liegende Flußbetten erinnern. Wie wir in dem Abschnitt über die vereisten Pole des Mars erfahren haben, wurden sie als Ergebnis der Wirkung fließenden Wassers erklärt.

Bei der Deutung ist aber Vorsicht am Platz; denn schon einmal erlitt eine sehr ähnliche Konzeption Schiffbruch, als man nämlich versuchte, durch Wasserausbrüche aus dem Mondinnern die stark gewundenen lunaren Täler zu erklären. Damals hielt man es noch nicht für ganz ausgeschlossen, daß wenigstens während einer kürzeren Zeit sogar die tiefsten Mare unter Wasser gestanden haben. Dann aber gelang der Raumfahrt durch die Mondlandeunternehmen die direkte Gesteinsuntersuchung im Labor, und sie bewies: Es hat auch in keiner Phase der vergangenen Mondgeschichte jemals freies Wasser an seiner Oberfläche gegeben. Dies läßt sich so bestimmt sagen, weil in allen bisher untersuchten Gesteinen keine Mineralien mit Hydroxylgruppen



*Von nahezu parallelen Spalten oder Gräben und feinverästelten Fluß-
tälern durchzogene Marslandschaft westlich der großen Ringstruktur
Argyre, 1976 von „Viking Orbiter 1“ aufgenommen*

(OH-Gruppen) vorkommen. Erste Spuren eines schwachen Wassergehalts im Gestein wären nämlich auf der Urmondoberfläche nicht gleich frei aufgetreten, sondern bei der Krustenerstarrung zunächst zur „Absättigung“ in bestimmte silikatische Mineralien eingebaut worden. Aus ihnen hätten sich dann in erster Linie die auf der Erde so häufigen Glimmer und Hornblenden gebildet, die jedoch nach den bisherigen Ergebnissen auf dem Mond fehlen.

Da Wasser folglich als Urheber der gewundenen Mondrillen praktisch ausfällt, aber nach allen Anzeichen eine Flüssigkeit die Rillen erzeugt haben muß, kam man auf den Gedanken, daß es sich hier um Kanäle einstmals strömender heißer Lava handele.

Während sich für die gewundenen Mondrillen diese von irdischen

Lavafeldern abgeleitete Entstehungstheorie mehr und mehr durchgesetzt hat, soll bei den Rillentälern des Mars trotz mancherlei äußerlicher Ähnlichkeiten alles ganz anders vor sich gegangen sein. Fassen wir die Argumente aus dem Abschnitt über die Pole des Mars hier noch einmal zusammen und ergänzen sie durch einige neue:

Erstens weisen die Marsflüsse eine klimaorientierte Verteilung auf, indem sie eindeutig die äquatornahen, wärmeren Breiten bis 50° Abstand nach Nord und Süd bevorzugen. Diese Orientierung fehlt auf dem Mond.

Zweitens lassen die lunaren Rillen alle Anzeichen von echten Seitentälern vermissen. Diese sind aber auf dem Mars sehr wohl ausgebildet.

Drittens fehlen den Talsohlen der Mondrillen stets Merkmale der Überformung durch strömendes Wasser; auf dem Mars sind sie dagegen stark ausgeprägt.

Diesen Unterschieden zum lunaren Rillensystem entsprechen umgekehrt jeweils gerade Ähnlichkeiten zwischen marsischen und irdischen durch fließendes Wasser bewirkten Erosionserscheinungen. Es gibt aber auch hier Gegensätze.

Einmal fehlen auf dem Mars all jene Merkmale, welche auf ein langperiodisches Einwirken der Erosionskräfte hinweisen würden. Zum Beispiel sind keine „ausgereiften“ Erosionslandschaften im irdischen Sinn entstanden. Statt dessen überwiegt unter den Talformen der cañonartige Typ wie in den Trockengebieten der Erde. Jenseits der steilen Flanken vieler Täler beginnt auf der Hochfläche eine von äolischen Denudationsmerkmalen gekennzeichnete Landschaft. Es muß also nicht oberflächlich gesammeltes Niederschlagswasser gewesen sein, das die Täler des Mars formte.

Das zweite Unterscheidungsmerkmal zu irdischen Flußläufen ist in gewisser Hinsicht nur eine Folge des ersten: Durch fließendes Wasser transportierte Abtragsmassen am Ende der Talungen — etwa in Form von deltaartigen Schwemmfächern — fehlen weitgehend. Damit soll keineswegs behauptet werden, daß andernorts auf dem Mars nicht doch bedeutende Sedimentlager vorhanden wären, die vielleicht vom Wind zusammengetragen wurden.

Als Schlußfolgerung ergibt sich demnach für die cañonartigen Täler, daß, wenn wirklich in ihnen Wasser geflossen ist — und daran bestehen kaum noch Zweifel —, dies vermutlich nur sehr kurzphasig, aber dennoch heftig geschah.

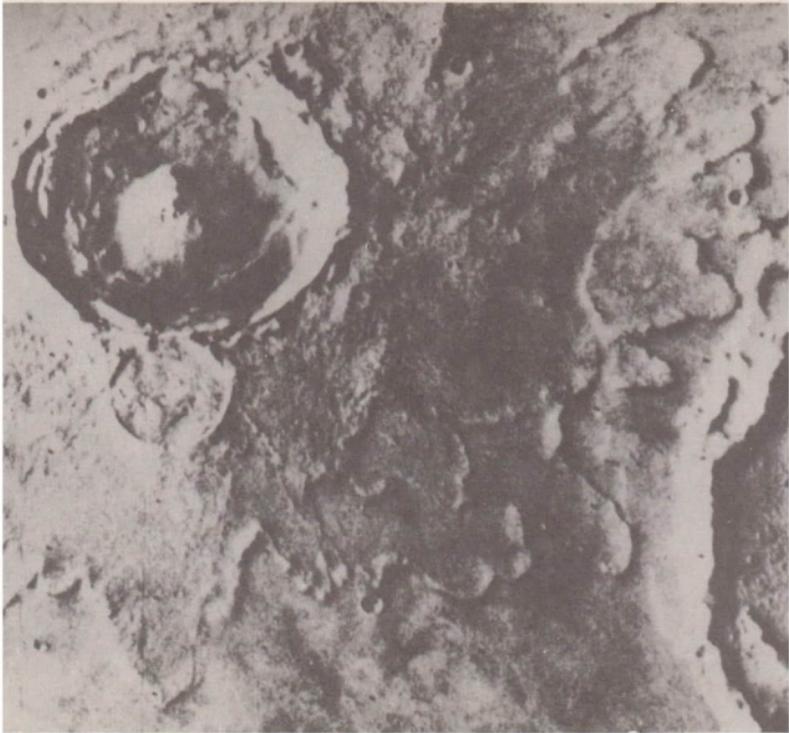
Auf der Erde sind solche Erscheinungen ebenfalls nicht ganz un-



Hangrutschungen auf dem Mars

bekannt. Wir finden sie zum Beispiel immer dort, wo natürliche oder künstliche Stauseen plötzlich ihre Riegel durchbrachen. Katastrophenfluten, so nennen es die Fachleute, erzeugten die Strömungsbilder dieser Flußläufe.

Aber woher das viele Wasser auf einmal nehmen? Auf dem Mars ist ja mit Sicherheit keine offene Wasserfläche mehr vorhanden. Wo wir uns auch immer umsehen – überall, selbst in seinen äquatornahen Breiten, herrscht eiskaltes Wüstenklima. Aber gerade diese Bezeichnung kann uns auf die richtige Spur führen. Stellen wir uns vor, unter einem Dauerfrostboden von einigen hundert Metern oder vielleicht sogar Kilometern Mächtigkeit befindet sich in den zur Tiefe immer wärmer werdenden Gesteinen des Mars gespanntes, das heißt unter hohem Druck stehendes Grundwasser. Normalerweise wird ihm der Austritt durch die obere eisführende Gesteinsschicht, die wie ein



Den 18 km großen Meteoritenkrater Yuty auf dem Mars umgibt ein Schuttmantel, der durch seine zungenförmige äußere Begrenzung deutlich Fließvorgänge nachzuweisen gestattet (aufgenommen von „Viking Orbiter 1“).

hermetischer Verschluß zu wirken vermag, versperrt. Kommt es aber zu Störungen, etwa zu grabenbruchartigen Schollenversetzungen, dann gerät unter Umständen plötzlich ein Profilabschnitt der Grabenwände ans Tageslicht, dessen Wasserinhalt nicht gefroren ist und im Fall tatsächlich vorhandenen höheren Drucks stürmisch bis zur Erschöpfung der Schichtquelle auslaufen müßte. Wahrscheinlich könnten dabei auch größere Gesteinsmassen mit ins Fließen oder Abgleiten geraten, so daß sich neben dem freien Wasser Schlammströme in die Schluchten hineinbewegen würden.

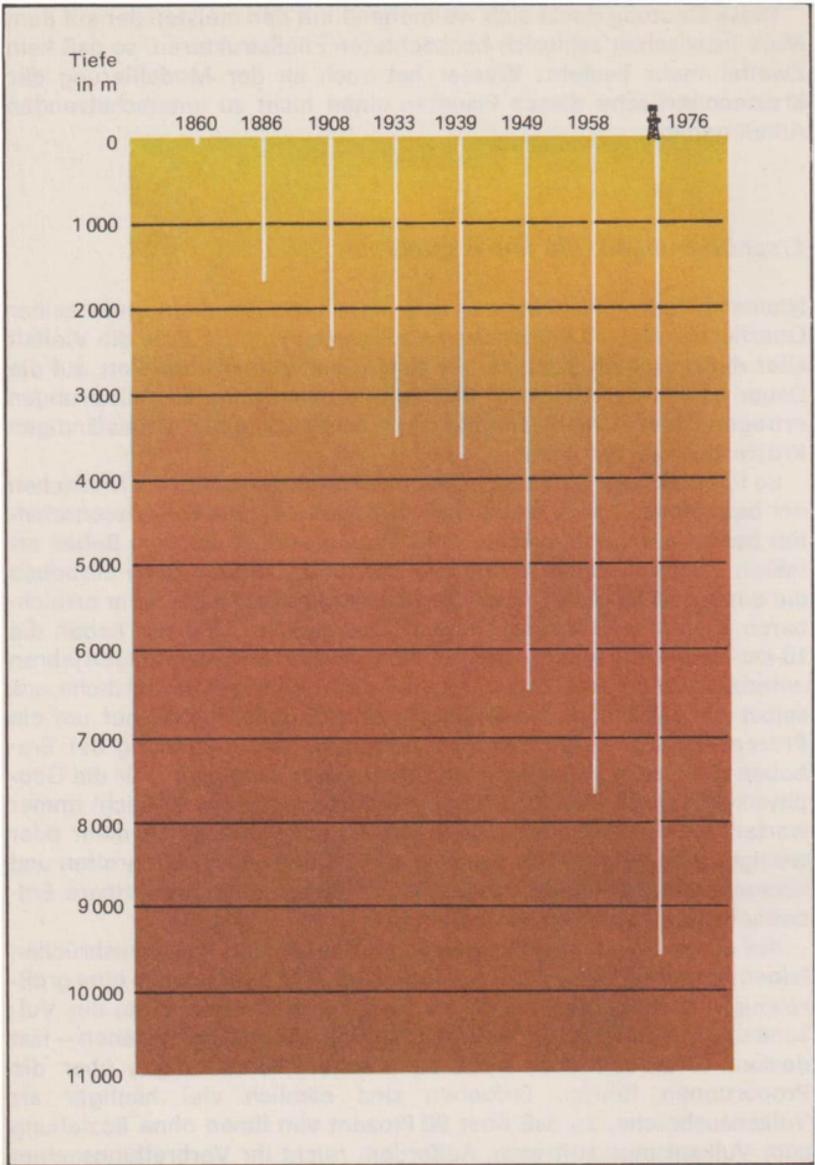
Diese Deutung deckt sich weitgehend mit den meisten der auf dem Mars inzwischen zahlreich beobachteten Fließstrukturen, so daß kein Zweifel mehr besteht: Wasser hat auch an der Modellierung der Krustenoberfläche dieses Planeten einen nicht zu unterschätzenden Anteil gehabt.

Erschütterungen, die uns erreichten

Niemand darf wohl erwarten, daß die Haut eines dicht unter seiner Oberfläche noch so glühendheißen Planeten wie der Erde die Vielfalt aller dynamischen Prozesse, die sich in und auf ihr abspielen, auf die Dauer ganz ohne Risse und Brüche und damit ohne Erschütterungen ertragen kann. Unmißverständlicher Ausdruck einer unbeständigen Kruste sind die Erdbeben.

So fürchterliche Wirkungen die Beben im einzelnen für die Menschen der betroffenen Gebiete auch haben mögen — für die Geowissenschaften besitzt der gesetzmäßige Schwingungsverlauf der vom Beben erfaßten Gesteine außerordentliche Bedeutung. Bieten doch Erdbeben die einzige Möglichkeit, über die durch Bohrungen nicht mehr erreichbaren Tiefen realistische Aussagen zu machen. Und wir haben die 10-km-Marke mit unseren größten Bohrgeräten erst vor wenigen Jahren unterteuft. Wenn wir bedenken, daß diese winzigen Nadelstiche uns selbst bei fünffacher Verlängerung dem Erdmittelpunkt nur um ein Prozent nähergebracht hätten, schätzen wir die Bedeutung der Erdbeben für die Geowissenschaftler schon eher richtig ein. Für die Geophysiker jedenfalls ist ihre Aussagekraft so groß, daß sie nicht immer warten können, bis die Natur ihnen ein solches Ereignis mehr oder weniger zufällig vorführt, sondern zu künstlichen Mitteln greifen und versuchen, durch Großsprengungen möglichst viele auswertbare Erdbebenwellen zusätzlich zu gewinnen.

Auf einige lokale Beziehungen von Erdbeben und Vulkanausbrüchen haben wir schon hingewiesen. Tatsächlich gibt es aber auch eine großräumige Verknüpfung, indem die Hauptverbreitungsgebiete der Vulkane und die Zonen häufiger Erdbeben sich — insgesamt gesehen — fast decken. Dies soll aber nicht zu falschen Vorstellungen über die Proportionen führen. Erdbeben sind nämlich viel häufiger als Vulkanausbrüche, so daß über 90 Prozent von ihnen ohne Beziehung zum Vulkanismus auftreten. Außerdem reicht ihr Verbreitungsgebiet



weit über das der Vulkane hinaus. Mitteleuropa, und damit auch unsere engere Heimat, ist ein überzeugendes Beispiel dafür. Wir haben keinen Vulkanismus, aber Erschütterungen, die von Erdbebenherden ausgehen, erreichen uns dennoch.

Einige der Erdbebenherde liegen direkt unter uns. Sie waren zwar niemals sonderlich intensiv, aber das, was geschah, reicht aus, einen ersten Einblick in die charakteristischen Gesetzmäßigkeiten und Begleiterscheinungen der Beben überhaupt zu geben. Und außerdem ist es schon etwas anderes, wenn man selbst von derartigen Erschütterungen betroffen wird oder weiß, daß sie auch für uns zumindest eine versteckte Gefahr darstellen. Also beschäftigen wir uns zunächst mit ihnen, ehe wir uns einer stärkeren Dosis zuwenden.

Nur selten – vielleicht ein- oder zweimal im Jahr – finden wir in unseren Tageszeitungen einen Hinweis auf Erdstöße, welche die Bewohner unserer Republik, meist der südlichen Bezirke, gespürt haben sollen. Spüren ist wohl das richtige Wort; denn im allgemeinen bleiben diese Beben so schwach, daß kein Sachschaden auftritt. Immerhin, die stärksten erreichen in Sonderfällen die Intensitätsstufen VI bis VII, und dabei können sich auch schon Mauerrisse bilden oder Putz von den Wänden bröckeln.

Was ist eigentlich unter Intensitätsstufen zu verstehen? Wenn es zum Beispiel in Pressemeldungen hieß, das jugoslawische Erdbeben vom 26. Juli 1963, das zahlreiche Gebäude zerstörte und 1070 Menschenleben forderte, habe die Stärke oder Magnitude (M) von 5,9 besessen, so ist das keineswegs weniger, sondern eine Angabe nach einem anderen Wertungssystem.

Wir müssen bei diesen Stärkebezeichnungen zwischen der zwölfteiligen Intensitätsstufenskale nach dem Italiener *Giuseppe Mercalli* (1850–1914) und der Magnitudenskale nach dem Amerikaner *Charles Francis Richter* unterscheiden. Bei dieser entspricht die Magnitude von $M = 8,6$ bereits der Endstufe XII der Intensitätsskale. Während die Intensitätsskale schon im vergangenen Jahrhundert ohne Instrumente, einfach nach Schätzungen der Auswirkungen auf den Menschen und typischer Zerstörungen an Gebäuden und in der Natur entworfen und später durch den deutschen Geophysiker *August Sieberg* (1875–1945) und zuletzt durch *Sergej Medwedew* und andere den modernen Erfordernissen angepaßt wurde, entstand die Magnituden- oder Richter-

Immer tiefer reichen die Bohrungen.

Skale auf instrumenteller Basis erst ab 1935. Da hierfür die von den Seismometern (Erdbebenmessern) der Erdbebenwarten registrierten Schwingungen exakt ausgewertet werden, stellt diese Skale ein Maß der bei den Beben tatsächlich freigesetzten Energien dar. Ferner bedeuten 2 Stufen Unterschied in der logarithmisch aufgebauten Richterschen Magnitudenskale bereits das Tausendfache an freigesetzter Energie.

Stark gekürzt sei hier die in der Öffentlichkeit auch weiterhin viel benutzte zwölfteilige Intensitätsskale wiedergegeben. Da die Definition ihrer Stufen auf den von Menschen spürbaren Auswirkungen der Beben beruht, kann selbst die Kurzform noch ein lebendiges Bild natürlicher Ereignisse vermitteln. Zum Vergleich wurden die dem etwa entsprechenden Magnitudestärken der Richter-Skale hinzugefügt. Dabei ist folgendes zu beachten: Nach dem unterschiedlichen Charakter der beiden Meßsysteme kann jedes Beben nur einen einzigen Wert auf der Richter-Skale haben. Dem stehen aber, je nach Herdentfernung des Beobachters, noch eine ganze Reihe möglicher Intensitätsstufen gegenüber.

Zwölfteilige Erdbebenskale nach Intensitätsstufen

(in Klammern die annähernden Stärkegrade der Richter-Skale, ausgewiesen als Magnitude)

Stufe I „unmerklich“: Die Intensität der Erschütterungen liegt unterhalb der Fühlbarkeitsgrenze. Sie kann nur mit seismischen Instrumenten nachgewiesen werden. (Magnitude unter 3,0)

Stufe II bis III „kaum merklich bis schwach“: Die Erschütterungen werden nur von Einzelpersonen wahrgenommen, vorzugsweise in höher gelegenen Stockwerken. (Magnitude 3,0–3,9)

Stufe IV bis V „aufweckend“: Die Erschütterungen sind von Personen auch im Freien zu spüren. Gegenstände, wie Bilder an der Wand, können ins Pendeln geraten. (Magnitude 4,0–4,9)

Stufe VI bis VII „erschreckend“: Erste Gebäudeschäden treten auf. (Magnitude 5,0–5,9)

Stufe VIII bis IX „Zerstörung von unverstärkten Gebäuden, Panik entsteht“: Erste kleinere Hangrutschungen sind zu beobachten. (Magnitude 6,0–7,4)

Stufe X „allgemeine Geländezerstörung“: Schwere Schäden, zum Beispiel an Brücken, entstehen. (Magnitude 7,5–7,9)

Stufe XI „vernichtend“: Schwere Zerstörungen treten an den stabilsten Gebäuden, Brücken, Dammbauten und Eisenbahnschienen auf. Horizontale und vertikale Verschiebungen kilometermächtiger Schollen lassen sich feststellen. Felsstürze werden ausgelöst. (Magnitude 8,0 bis 8,4)

Stufe XII „landschaftverändernd“: Hoch- und Tiefbauten werden vernichtet. Die Schollenverschiebungen sind beträchtlich. Flüsse verändern ihren Lauf, neue Seen werden aufgestaut. (Magnitude 8,5 bis 8,9)

Der Schwerpunkt der schwachen Beben in der DDR, die oft nur von Spezialinstrumenten, den Seismometern, wahrgenommen werden können, liegt eindeutig im Gebiet des Oberlaufs der Weißen Elster und der Zwickauer Mulde. Diese Vogtlandbeben zeigen als Besonderheit vielfach ein schwarmartiges Auftreten, das heißt, sie häufen sich – für Menschen nicht spürbar – in Perioden von mehreren Tagen und Wochen. Der eigentliche Herd, also der Ort, an dem durch Schollenverschiebungen die Erschütterungen ausgelöst werden, liegt im Vogtland bei schwachen Beben in etwa 5 km Tiefe, während sich die stärkeren aus Tiefen bis zu 30 km verfolgen lassen.

Das größte Erdbeben, das unser Gebiet nach den jüngeren Überlieferungen betroffen hat, ereignete sich vor nunmehr schon über 100 Jahren, am 6. März 1872, und ist als Mitteldeutsches Erdbeben in die Literatur eingegangen. Ein Augenzeuge berichtete darüber:

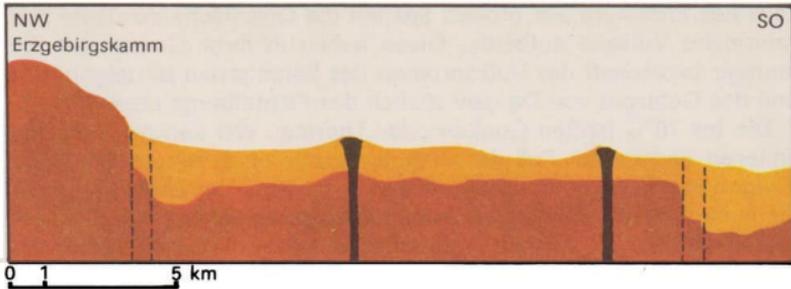
„... das Ereignis trat um 4 Uhr auf und mag 6–10 Sekunden gedauert haben. Die Erschütterung war eine ganz eminente ... verschiedene Schornsteinköpfe stürzten von den Häusern ... Personen wurden durch herabfallende Ziegelstücke verletzt und in ärztliche Behandlung genommen, auf Alle aber, welche sich innerhalb von Gebäuden befanden, machte es den Eindruck, als stürze das Haus zusammen. Daher kam es, daß in Zeit von einer Minute fast alle Bewohner auf den Straßen standen und dort nach den betreffenden Dachgiebeln schauten, um zunächst nachzusehen, wie viel wohl eingestürzt sei ... Schreiber dieser Zeilen befand sich im Moment des Ereignisses auf der Fürstl. Bibliothek des Residenzschlosses Osterstein ... Die Bibliothek befindet sich in den höchsten Räumen des riesigen Steinkolosses und mag es wohl dem

zuzuschreiben sein, daß dort die Schwingungen so außerordentlich stark waren. Während der wenigen Augenblicke war es kaum möglich, sich aufrecht zu erhalten, und dabei ein so furchtbares Krachen und Prasseln vernehmbar, daß der erste Gedanke auf den Einsturz sämtlicher tiefer liegenden Etagen gerichtet war, denen im nächsten Momente nun auch diese oberste nachfolgen werde. In den verschiedenen Bibliotheksräumen waren Tausende von Büchern umgefallen und lagen zum Teil zerstreut auf den Dielen umher. Der Eindruck dieser, in einem Nu hervorgebrachten Verheerung war unbeschreiblich.“*

Viele Einwohner des Raums Halle und Eisleben haben vielleicht noch Erinnerungen an ein lokales Erdbeben im Jahr 1940. Ausgelöst wurde es am 24. Mai durch den Zusammenbruch großer Abbauhohlräume auf 2 km Länge und 300 bis 500 m Breite in einem Salzbergwerk bei Teutschenthal etwa 15 km westlich der Stadt Halle. Man hatte zuwenig Versatz in die Abbauhohlräume eingebracht, so daß die Sicherheitspfeiler die Last des Deckgebirges in 500 m Tiefe nicht mehr tragen konnten. Bis heute ist der dadurch verursachte Gebirgsschlag, wie solche durch den Bergbau erzeugten Erdbeben auch genannt werden, der größte in Zentraleuropa geblieben. Übrigens unterscheiden sich die physikalischen Begleiterscheinungen in nichts von natürlichen Erdbeben. Der plötzliche Zusammenbruch fast des gesamten seinerzeit aufgeschlossenen Grubenfelds kostete 42 Bergleute das Leben. Die Erschütterung war so groß, daß sie selbst noch in 700 km Entfernung registriert wurde.

Die gewissenhafte Sammlung sämtlicher Berichte über das Ereignis von 1872 ermöglichte es schon damals den Wissenschaftlern, viel von den Gesetzmäßigkeiten dieses Bebens aufzuklären. So ließ ein Zeitvergleich aller genaueren Angaben über den von Ort zu Ort verschiedenen Eintritt des Ereignisses erkennen, daß sein Herd – also das Zentrum des Bebens – etwa unter dem Raum Ilmenau bis Gehren zu suchen war; denn hier traten die Erschütterungen zuerst auf und pflanzten sich nach allen Seiten mit etwa 40 km in der Minute sehr schnell fort. Man bemerkte folglich das Ereignis in Dresden nur 5 Minuten später als in Ilmenau, und die maximale Entfernung, bis zu der es überhaupt spürbar war, betrug 400 km. Selbst die Tiefenlage des Bebenherds konnte damals schon mit knapp 20 km ermittelt werden. Aber über die Ursachen wußte man wenig.

* Zitiert nach: Karl von Seebach, Das mitteldeutsche Erdbeben vom 6. März 1872, Leipzig 1873, S. 91 f.



Profil vom Erzgebirgsabbruch ins böhmische Vulkangebiet

- altes Kristallin des Erzgebirges
- Sedimente des Tertiärs und der Kreidezeit
- Zufuhrkanäle der Vulkane
- Störungslinien

Was könnte in Mitteleuropa überhaupt solche Bodenunruhen hervorrufen? Geologen und Geophysiker führen vor allem zwei Ursachen an:

Erstens liegt das Vogtland, speziell der am meisten betroffene Südzipfel der DDR, an der Kreuzungsstelle zweier geologischer Hauptstruktur- oder Störungsrichtungen Zentraleuropas, der nordöstlich verlaufenden des Erzgebirges und der nordwestlich orientierten des Thüringer Walds. Beide Mittelgebirge werden ja von dementsprechenden kräftigen Bruchlinien an ihren Längsrändern begrenzt. Man bezeichnet solche Überlagerungen von mehreren Störungsrichtungen auch als Schwächezonen der Erdrinde, und es gibt noch zahlreiche andere Punkte, wo sie sich ebenso als Unruheherde erweisen.

In unserem Fall läßt sich zweitens auch eine interessante Beziehung zum Vulkanismus finden, für die es gleichfalls weltweite und oft viel markantere Parallelen gibt. Wer einmal das Erzgebirge von Nord nach Süd überquert hat, dem ist vielleicht in Erinnerung, daß dem langsamen Höhenanstieg bis zum Kamm des Gebirges aus dem Raum der DDR bald ein steiler Abfall nach Süden zum Tal der Ohře im Gebiet der ČSSR folgt. Dieser sogenannte Erzgebirgsabbruch zur großen Grabenstruktur des Ohřetals ist, nach geologischen Maßstäben betrachtet, erst sehr jung. Vor etwa 10 bis 15 Millionen Jahren und vereinzelt noch in späterer Zeit waren die Schollenverschiebungen hier so intensiv, daß die flüssige

Lava des Erdinnern aus großen Spalten die Oberfläche erreichte und zahlreiche Vulkane aufbaute. Diese haben in ihrer Gesamtheit die heutige Landschaft der Vulkanruinen des Böhmisches Mittelgebirges und des Gebirges von Doupov südlich des Fichtelbergs erzeugt.

Die bis 70°C heißen Quellen oder Thermen von Karlovy Vary und anderen Bädern am Fuß des Erzgebirgsabbruches werden als späte Zeugen der noch immer übernormalen Aufheizung der Erdkruste durch die in der Tiefe stehengebliebenen magmatischen Massen angesehen. Dabei muß die allgemeine Auffassung der Thermalquellen als späte oder letzte Zeugen des Vulkanismus gar nicht so unbedingt das Charakteristische der heutigen Strukturentwicklung treffen. Wir wissen von anderen Vulkangebieten der Erde zwar, daß sich diese Definition vielfach als richtig erweist, aber sehr oft sind Thermen auch nur Pausenzeichen des Vulkanismus. Und so läßt sich hier am Erzgebirgsrand angesichts der Vogtlandbeben ebenfalls nicht ganz ausschließen, daß wir uns gegenwärtig in einer Phase der Pause oder der Wiederbelebung des Vulkanismus und der Krustenbewegung befinden.

Wo Erdbeben zum Alltag gehören

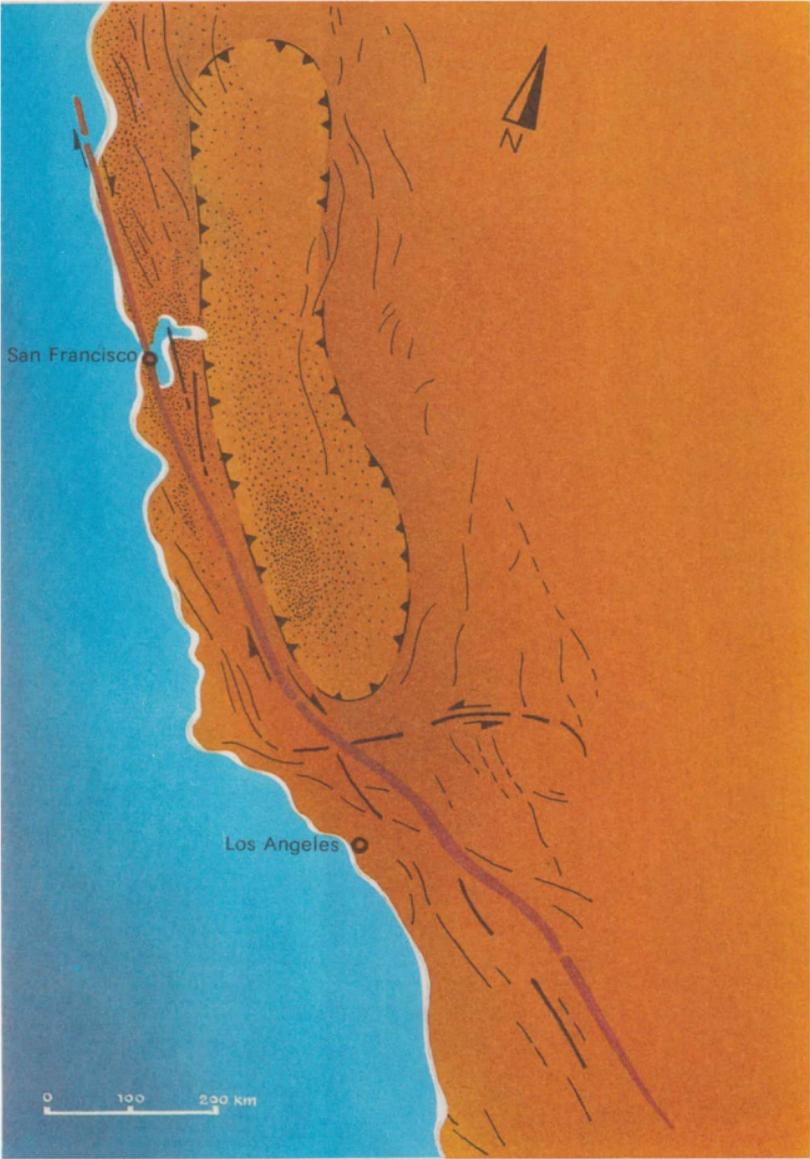
So aufschlußreich die Krustenbewegungen, die unser Gebiet betroffen haben, für uns auch sein mögen – verglichen mit dem, was jährlich anderenorts, sozusagen als Normalereignisse im Weltmaßstab, geschieht, bleiben sie unbedeutend.

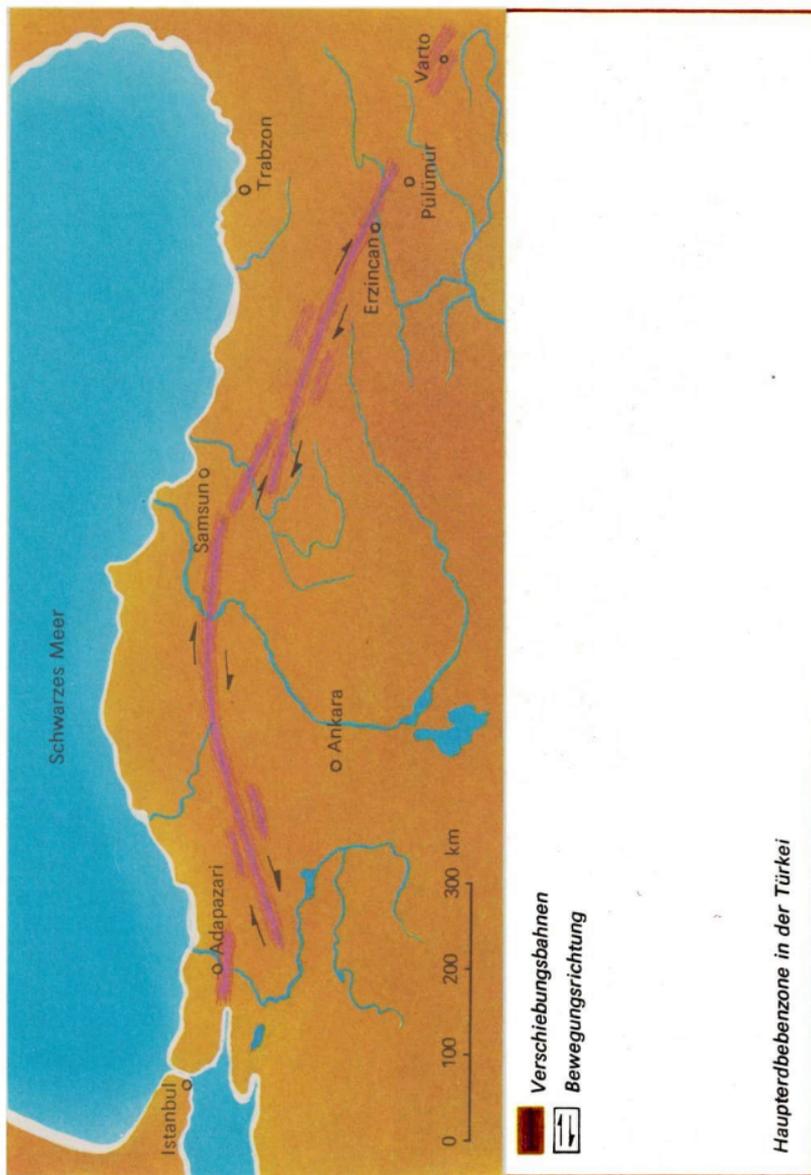
Sehen wir uns erst einmal bei unseren Nachbarn in Europa um. Der ganze Norden, mit Ausnahme Islands, ist ruhig. Auch der europäische Teil der Sowjetunion gilt im wesentlichen als bebenfrei, obwohl 20 Prozent des gesamten riesigen Territoriums der UdSSR zu den erdbebengefährdeten Gebieten zählen. In Europa sind es die Mittelmeer-

Horizontalverschiebung an der San-Andreas-Spalte

Die Dichte der Punktierung entspricht der Stärke der Bodenerschütterungen während des großen Bebens von 1906.

-  San-Andreas-Spalte
-  Haupt- und Nebenstörungen
-  Grabeneinbruch des Großen Tals
-  Bewegungsrichtung





Haupterdebenzone in der Türkei

länder, welche die ganze Last dieser Art von Naturkatastrophen zu tragen haben. Zwar verteilen sich die Bebenzentren auf die gesamte Länge Südeuropas, doch einige Zonen ragen als besonders erdbebengefährdet noch deutlich heraus, so das südliche Jugoslawien, die Ägäis und der Norden und Osten der Türkei. Allein das Gebiet der Balkanhalbinsel und der griechischen Inseln verzeichnet über 100 Beben im Jahr, von denen 15 zwischen der V. und IX. Intensitätsstufe liegen. Hier handelt es sich ausschließlich um tektonische (griech. tektonikos = zum Bau gehörig) Beben, die 90 Prozent aller Erdbeben bilden, während lediglich 7 Prozent durch Gasexplosionen bei Vulkanausbrüchen (vulkanische Erdbeben) hervorgerufen werden und gar nur 3 Prozent durch den Einsturz unterirdischer Hohlräume entstehen – wie das Einsturzbeben, das der Bergbau Teutschenthal 1940 auslöste.

Zu den tektonischen Beben gehören alle, die auf Bruchbildungen und Verschiebungen in der Erdkruste zurückgeführt werden können – gleich, ob diese Bewegungen vertikal oder horizontal stärker ausgeprägt sind. Die Ägäis zwischen Griechenland und der Türkei stellt zum Beispiel ein solches erdgeschichtlich junges Bruchfeld mit vorwiegenden Senkungerscheinungen dar; denn noch kurz vor der Eiszeit existierte eine breite Landverbindung zwischen Griechenland und der Türkei über die heutigen Inselgruppen hinweg.

Eines der bekanntesten Beispiele für höchst aktive Horizontalverschiebungen in der Kruste bietet die große San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien. Sie geht mitten durch die Millionenstadt San Francisco. Bei dem katastrophalen Erdbeben vom 18. April 1906, das fast 1 000 Menschenleben forderte und bei dem der Stadtkern hauptsächlich durch ausbrechende Feuersbrünste vernichtet wurde, ließen sich an ihr sogar Schollenverschiebungen bis zu 7 m beobachten. An dieser riesigen, bis auf 2 000 km Länge zu verfolgenden Bruchzone der Erde verschiebt sich der östlich angrenzende Teil des nordamerikanischen Kontinents seit Jahrtausenden ruckweise gegenüber dem Pazifischen Ozean in südlicher Richtung. Dabei werden einige Teile des Festlands nahe der Küste, so die Halbinsel Baja California, von der ozeanischen Kruste langsam mit nach Norden verschleppt, und darum finden wir diese Störungszone auch nicht genau an der heutigen Küste vor, sondern teilweise bis zu 100 km landeinwärts versetzt, fast parallel zur Pazifikküste Nordamerikas ziehend.

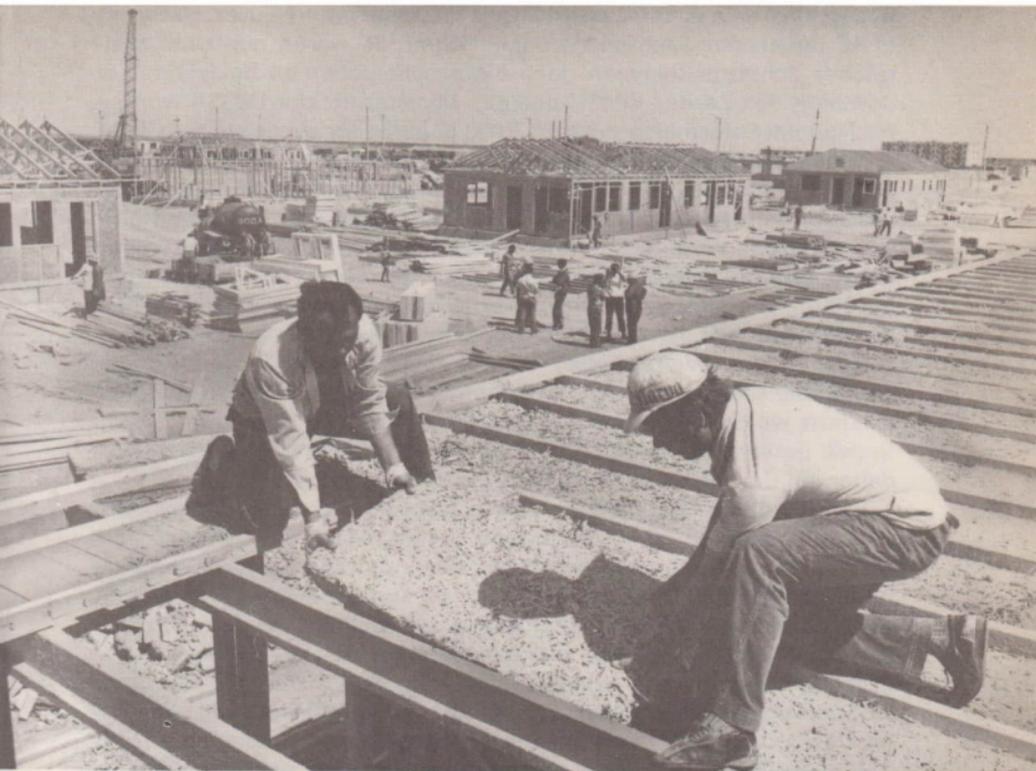
Doch wir brauchen nach den neueren geophysikalischen Forschungsergebnissen gar nicht mehr so weit zu gehen, um ähnlichen großen und aktiven Horizontalverschiebungen zu begegnen. Nachrichten von zum



Durch Erdstöße zerstörte Wohnhäuser der Industriesiedlung Gasli

Teil sehr starken und katastrophalen Erdbeben aus der Türkei, aber auch aus Zentralasien, einschließlich der Gebirgsregionen im Süden der Sowjetunion, belegen uns, daß die Kruste dort ebenfalls nicht zur Ruhe kommt.

Als in der Sowjetunion mit am stärksten durch Erdbeben gefährdet gelten die Kirgisische und die Tadshikische SSR sowie jene Teile Kasachstans und Usbekistans, welchen die Hochgebirgsregionen des westlichen Tianschan und des Pamir angehören. Die Großstädte dieser Gebiete, beispielsweise Alma-Ata und Taschkent, wurden in den letzten Jahrzehnten besonders schwer betroffen. Aber gerade hier zeigt sich



Baubrigaden errichten einstweilige Wohnstätten für die Bevölkerung von Gasli.

auch, daß die Menschen im Sozialismus über ausgezeichnete Möglichkeiten zu Schutzmaßnahmen verfügen und sie zu nutzen wissen. Geschehen Katastrophen, dann eilt praktisch das ganze Land zu Hilfe, um möglichst schnell die Not zu lindern.

Als zum Beispiel am 8. April 1976 ein starkes Beben das 13000 Einwohner zählende usbekische Städtchen Gasli erschütterte, wobei sich Risse in den Häusern und Straßen zeigten und viele Strom- und Telefonkabel brachen, zogen die Einwohner zur Sicherheit rasch in eine eiligst errichtete Zeltstadt um. Wie richtig das war, erwies sich schon 6 Wochen später; denn am 17. Mai 1976 zerstörte ein noch schwereres

Beben innerhalb einer Minute fast alle leerstehenden Häuser. Hatte das erste Beben nur Sachschaden angerichtet, so waren nun trotz zahlreicher Schutzmaßnahmen doch 6 Menschenleben zu beklagen. Auf Beschluß des ZK der KPdSU und des Ministerrats der UdSSR wurden nach einem Soforthilfsprogramm 3000 Bauarbeiter sowie weitere Zelte und natürlich Nahrungsmittel und Medikamente zu der gerade erst 20 Jahre alten Erdgassiedlung Gasli gebracht. Bereits nach wenigen Monaten konnte ein großer Teil der Bevölkerung in die schnell herangeschafften vorgefertigten Holzhäuser umziehen. Aber selbst diese Zwischenstation währte nicht lange; denn bei einer Neubauzeit von 800 bis 900 m² Wohnraum im Monat wurde die Stadt in nur einem Zehntel der alten Bauzeit, in rund 2 Jahren, völlig neu errichtet.

Nach der Weltstatistik fallen durchschnittlich jedes Jahr 14000 Menschenleben den Erdbeben zum Opfer. Auch in anderen Ländern, wo Erdbeben zum Alltag gehören, wie besonders in Japan oder in den pazifischen Randgebieten Amerikas und Neuseelands, ist man daher auf der Suche nach vorbeugenden Schutzmaßnahmen.

Viel wurde bisher geleistet, aber zahlreiche Wünsche bleiben noch unerfüllt. Zunächst geht es um eine Verbesserung der Bebenvorhersage. In der SU und anderenorts hat man inzwischen gelernt, die Vorboten großer Erschütterungen, die sich oft als schwache Schwingungen oder Vorbeben kundtun, immer besser als wichtige Warnsignale auszuwerten. Doch leider sind sie keine sehr zuverlässigen Begleiter der Erdbeben. Auch ohne irgendwelche zuvor spürbaren Oberflächenveränderungen oder Schwingungen können aufgestaute Spannungen im Untergrund urplötzlich Zerreißprozesse ablaufen lassen und damit Beben auslösen, und dies manchmal sogar in Gebieten, in denen über Jahrhunderte oder Jahrtausende alles ruhig blieb.

Umgekehrt erfolgt mitunter eine Zeitlang eine stetige, gleichsam elastische, allmähliche Verformung oder Verbiegung der Erdkruste. So beobachtete der japanische Seismologe *Akitune Imamura* eine Hebung der Küstenlinie vor der Bucht von Tokio schon kurz nach der Jahrhundertwende und leitete daraus 1905 eine der ersten wissenschaftlichen Voraussagen von Erdbeben überhaupt ab. Diese Katastrophe trat auch tatsächlich ein, aber erst – und hier zeigt sich die große Unsicherheit der Vorhersagen – 18 Jahre später. Am 1. September 1923 wurden im Großen Japanischen Beben von Tokio bis zur 100 km entfernten Sagami-Bucht 700000 Häuser fast völlig zerstört, und es gab 247000 Tote, Verletzte und Vermißte. Viel zusätzlichen Schaden verursachte dabei eine im Anschluß an das Beben vom Meer her über die



Mitarbeiter des Instituts für erdbebensicheres Bauen und Seismologie der Akademie der Wissenschaften der Tadshikischen SSR setzen Versuchsgebäude künstlichen Erdstößen aus.

Küste hereinbrechende seismische Woge von örtlich über 10 m Höhe. Als Begleiter vieler japanischer Beben stellen derartige Erscheinungen nichts Ungewöhnliches dar.

Neben Versuchen, durch Warndienste die Menschen zu schützen, steht die Vorbeugung – das Bestreben, durch besser an die Gefahrensituation angepaßte Baumaßnahmen Schäden weitgehend zu verringern. So meidet man für größere, störanfällige Bauvorhaben möglichst die Haupteerschütterungszonen und wendet dort, wo sich dies aus ökonomischen Gründen nicht durchführen läßt, eine relativ erdbebensichere Architektur an. Sowjetische Fachleute haben eine Dreizonengliederung von Taschkent vorgenommen, die je nach dem Gefährungsgrad bestimmte Bautypen vorschreibt. Es wurde aber zum

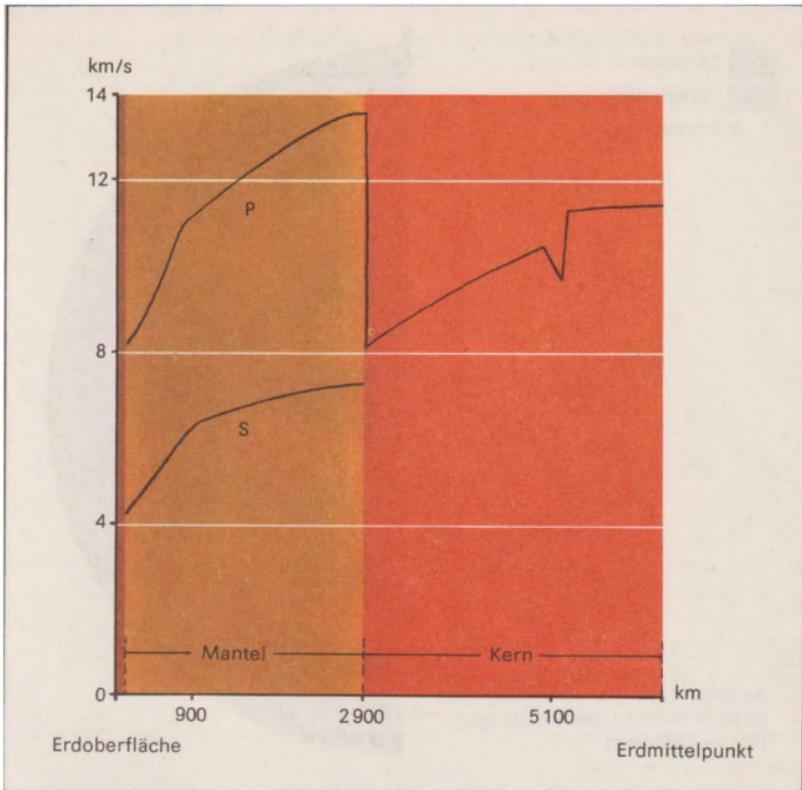
Beispiel beim U-Bahn-Bau auch für die weniger gefährdeten Stadtteile eine zusätzliche Stützkonstruktion entwickelt und eingesetzt, die den Zusammenbruch der Strecke zumindest im Fall der häufigen leichteren Erdstöße verhindern kann.

Das Schalenmodell vom Erdinnern

Neben der Vorbeugung und der Beseitigung der folgenschweren Erscheinungen der Erdbeben beschäftigt die Wissenschaftler vor allem die Frage, was die Gebiete mit derartigen Häufungen an Erdbeben denn für ein besonderes Kennzeichen haben und warum sich die uns inzwischen nicht mehr ganz unbekannteste Krustendynamik überhaupt so lokalbetont und auf bestimmte Erdzonen konzentriert abspielt.

Diese Frage läßt sich nicht leicht beantworten. Dazu sind Kenntnisse über den tieferen Innenbau der Erde nötig, und das erfordert die systematische Auswertung aller registrierbaren Schwingungen, die von den einzelnen Bebenzentren ausgehen und ihren Lauf nicht nur dicht unter der Erdoberfläche nehmen, sondern – was hier für uns zum Teil noch wichtiger ist – auch größere Tiefen des Erdinnern, vielleicht sogar dessen Kern durchdringen. Die Laufzeiten dieser meßbaren Erdbebenwellen hängen einerseits vom Gesteinsmaterial und andererseits von der Schwingungsart ab. An der Ausbreitung der Energie des Erdstoßes können sich sowohl Längs- oder Longitudinalwellen als auch Quer- oder Transversalwellen beteiligen. Die Longitudinalwellen sind die schnellsten. Als elastische Kompressionswellen (Druckwellen) breiten sie sich im Gestein wie der Schall aus. Eine ihrer vorzüglichen Eigenschaften ist, daß sie nicht nur die feste Kruste durchlaufen, sondern auch Flüssigkeiten, allerdings stark verlangsamt, durchdringen, während Transversalwellen vor ihnen kapitulieren. Weil die schnellsten Schwingungen als erste die seismischen Stationen erreichen, haben die Geophysiker sie *undae primae* (lat. *unda* = Welle, *prima* = erste) getauft, also Erste Wellen, kurz P-Wellen genannt.

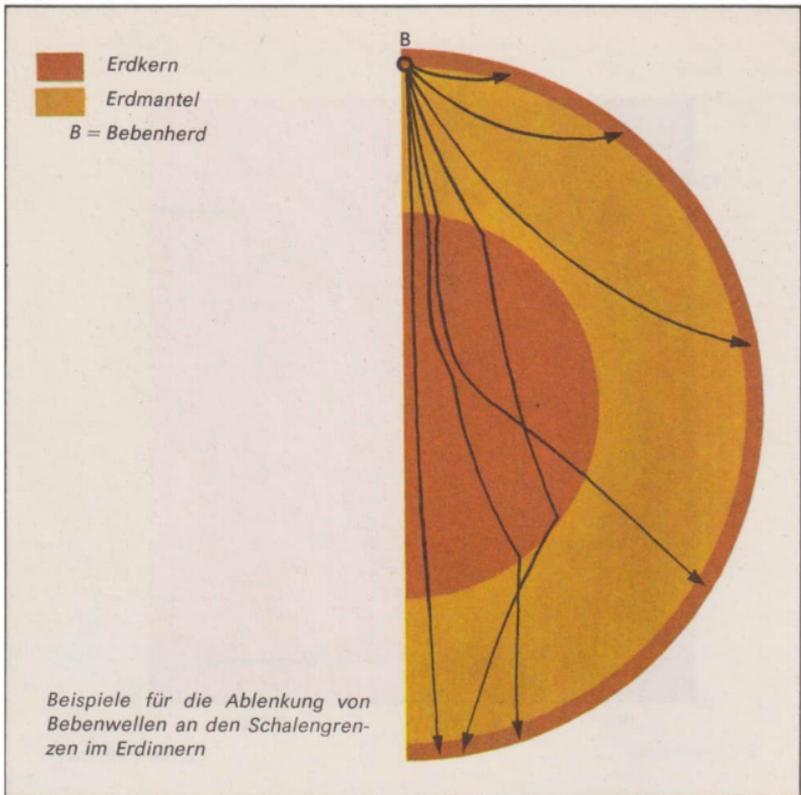
In Fällen, wo sich die Meßstationen fast einen halben Erdumfang vom Bebenherd entfernt befanden, ließ sich an den Laufzeiten der schnellen P-Wellen deutlich ablesen, daß ein Teil von ihnen für seine Reise den kürzesten Weg gleich durch den Erdkern gewählt hatte, ein anderer aber erst auf Umwegen, manchmal an der Erdoberfläche mehrfach reflektiert, die Station erreichte.



*Geschwindigkeitsverlauf der Bebenwellen im Erdinnern
P = Longitudinalwellen; S = Transversalwellen*

Die jahrzehntelangen Auswertungen der vielen hundert über die gesamte Erdkugel verteilten seismischen Stationen haben es ermöglicht, nach diesen Laufzeitkurven den schalenförmigen Aufbau des Erdinnern bis hin zum Kern zu zeichnen.

Nach kurzen „Startschwierigkeiten“ in den obersten Lockermassen, wo die P-Wellen noch recht langsam sind, erreichen sie in der Kruste bald die für Granite und Basalte typischen Normalgeschwindigkeiten von 5 bis 7 km/s. Ab etwa 20 bis 40 km Tiefe – unter Ozeanen eher als unter Kontinenten – schnellen die Laufzeiten unvermittelt auf die



vorläufige Spitzenhöhe von 8,2 km/s. Man hat diese Grenzzone als Basis der Erdkruste oder Lithosphäre definiert und läßt darunter den Erdmantel beginnen.

Zwischen 60 und etwa 150 km Tiefe zeigen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, ehe sie zum Erdinnern hin weiter ansteigen, eine charakteristische, schwach rückläufige Tendenz. Diese früher wenig beachtete Erscheinung hat heute außerordentliche Bedeutung für die modernen Vorstellungen von der Erdkruste erlangt. Die Verlangsamung der Bebenwellen wird nämlich darauf zurückgeführt, daß die Gesteine dieser Zone infolge der allgemeinen Temperaturzunahme in Richtung Erdinneres erweichen. An der Oberfläche hätte ein Magma von 1 800 K

längst den flüssigen Zustand erreicht, aber wegen des enorm hohen Drucks im Erdinnern entsteht er hier nicht in der uns gewohnten Weise, sondern zwischen fest und flüssig bildet sich ein plastisch-zäher Zwischenzustand heraus. Das genügt jedoch völlig, um die darüber befindliche Lithosphäre mit ihren Kontinenten in geologischen Zeiträumen ins Schwimmen zu bringen und Kontinentalverschiebungen zuzulassen.

Unter dieser Erweichungszone des oberen Erdmantels, die wegen der geschilderten Eigenschaften den Zusatznamen Asthenosphäre erhalten hat, was soviel heißt wie Schwächezone, steigen dann, wie bereits erwähnt, die Laufzeiten allmählich wieder an und erreichen das Maximum in rund 2900 km Tiefe mit fast 14 km/s. Dort verlangsamen sie sich plötzlich erneut auf etwa 8 km/s, bevor sie ihren Weg weiter in das Erdinnere fortsetzen. Die Transversalwellen brechen hier sogar ganz ab.

Das ist das Signal, daß wir von dieser Tiefe an mit einem neuen Zustand, wahrscheinlich dem einer Flüssigkeit, zu rechnen haben. Man läßt daher an dieser markanten Grenze den Erdmantel enden und bezeichnet alles noch tiefer Liegende als zum Erdkern gehörig. Diesen hätten wir uns also zunächst überwiegend flüssig vorzustellen, doch ein nochmaliger kleiner Sprung in den Laufzeiten zu ein wenig schnelleren Werten spricht für die Existenz eines festen inneren Kerns ab Tiefen unter 5100 km.

Für die physikalischen Bedingungen im Erdmittelpunkt, 6378 km unter der Oberfläche des Planeten, werden heute noch etwas voneinander abweichende Daten angegeben, vor allem für die schwierige zu bestimmenden Temperaturverhältnisse. Temperaturen von 4000 bis 6000 K hält man nach modernen Berechnungen für am wahrscheinlichsten, nachdem jahrzehntelang auch die Auffassung vertreten worden war, daß im Erdkern echte stellare (lat. stella = Stern) Bedingungen mit vielleicht sogar über 10000 K herrschen könnten. Wir wissen nämlich heute, daß der zunächst noch sehr rasche Temperaturanstieg nahe der Erdoberfläche in Richtung zum Erdinnern – in der DDR sind es 2 bis 3 K auf 100 m –, der als geothermische Tiefenstufe bezeichnet wird, schnell nachlassen muß. Würden wir selbst einen so niedrigen Wert des Anstiegs, wie ihn eine Temperaturerhöhung von 1 K auf 100 m Tiefenfortschritt bedeutet, nur bis 1000 km Tiefe fortsetzen, dann hätten wir ja hier schon 10000 K! Dem widerspricht aber das gesamte physikalische Verhalten des Planeten. Es bleibt also bis heute eine recht erhebliche Unsicherheit über den wahren Verlauf der Temperaturzunahme zum Erdmittelpunkt hin bestehen, die alle theoretischen Ent-

würfe von dem Erdinnern und seiner Entwicklung problematisch macht.

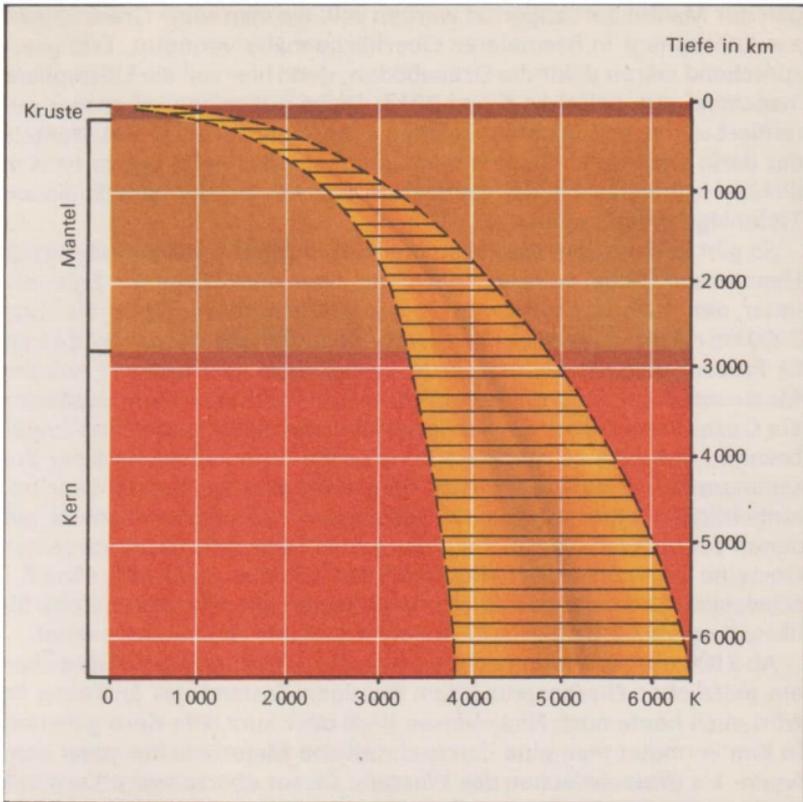
Noch viel mehr gilt das für die Versuche, zu Aussagen über die chemischen Substanzen des Erdinnern zu kommen. Hier stellen unsere gegenwärtigen Auffassungen eine nicht immer ganz glückliche Verbindung von kosmischen Fakten und Laborergebnissen dar.

Als geeignete Anschauungsbeispiele für die Zusammensetzung des Erdinnern werden schon seit längerer Zeit sowohl die meteoritischen Substanzen als auch die Produkte der Schmelzprozesse im Hochofen angesehen. Von der zunehmenden Beweiskraft der kosmischen Substanzen für den vermuteten inneren Aufbau der Erde werden wir später, besonders im Zusammenhang mit der frühen Entwicklungsgeschichte unseres Planeten, noch Gebrauch machen. Zunächst wollen wir von den auf der Erde selbst ableitbaren Grundlagen ausgehen und versuchen, erste Aussagen über das unter der Kruste verborgene Mantelgestein zu erhalten.

Zwischen den Gesteinen der Lithosphäre erscheint zum Beispiel in einigen Gebirgen als sogenannter Quetschkörper zuweilen ein olivinreiches, silikatisches Material, dessen Mineralbestand sich nicht ohne weiteres mit chemisch verwandten Gesteinskomplexen und Entstehungsbedingungen an der Erdoberfläche gleichsetzen läßt. Hauptgrund für den Vergleich mit Mantelsubstanz, also mit Erstarrungsgesteinen aus Erdtiefen noch unter der Lithosphäre, ist das Auftreten einer Mineralausbildung großer Dichte, die spezifische Merkmale der Anpassung an die in solchen Tiefen herrschenden hohen Druckbedingungen aufweist. Man spricht von Hochdruckmodifikationen der Minerale. Modifikationen sind verschiedene Formen chemischer Elemente oder Verbindungen, die bei gleicher chemischer Zusammensetzung unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen.

Für diejenigen, welche es genauer wissen wollen, sei als Beispiel die Umwandlung des Basalts, des häufigsten Gesteins der tieferen Lithosphäre, in seine Hochdruckform, den sogenannten Eklogit, erwähnt, die als Mantelsubstanz aufgefaßt wird. Dabei bilden sich die drei Hauptgemengeteile des Basalts, Diopsid, Plagioklas und Olivin, in die dichteren Minerale Omphazit und Granat sowie zu einem neuen Orthopyroxen um. Ergebnis: Aus einem Gestein von der Dichte des Basalts um 3,1 entstand ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung, allein durch neue Minerale mit dichterem Kristallgitter, der Eklogit mit der höheren Dichte von 3,4.

Trotzdem weiß bis heute kein Geowissenschaftler mit Sicherheit



Temperaturverlauf zum Erdkern hin

Schraffiert = möglicher Spielraum wegen noch unsicherer Deutung

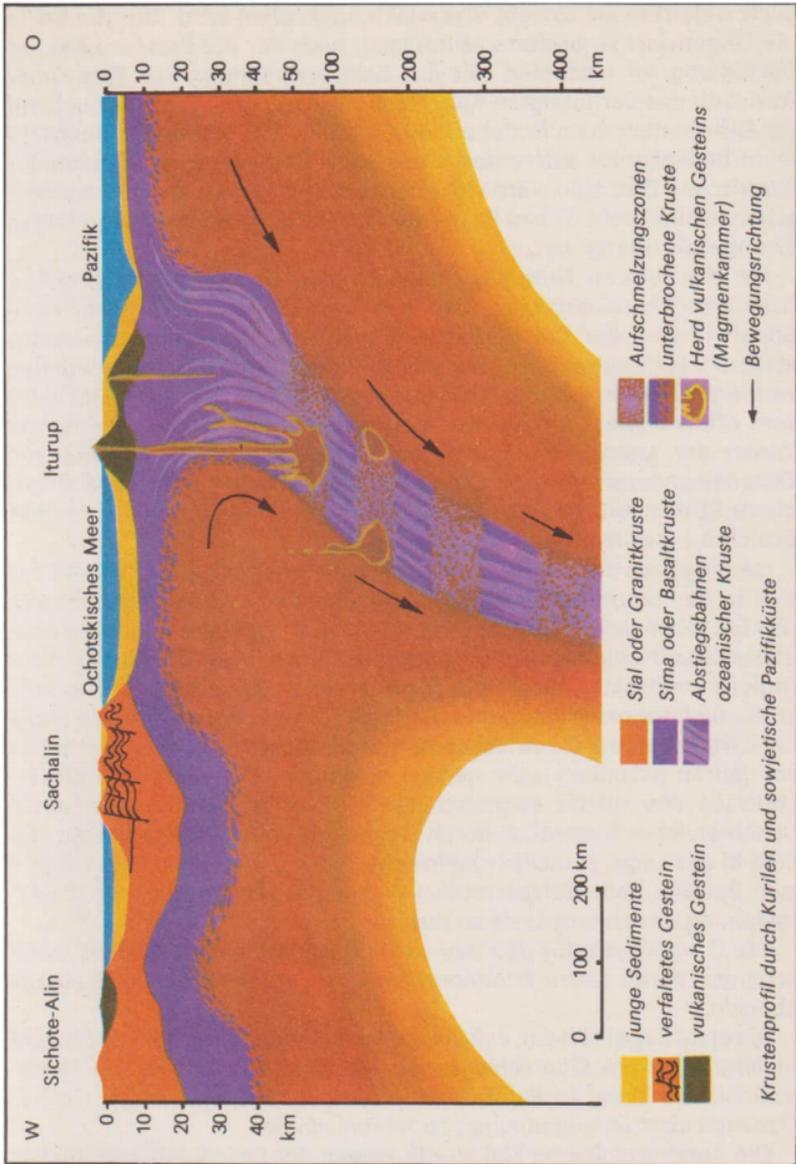
anzugeben, ob wirklich irgendwo auf der Erde echte Mantelsubstanz entweder durch Aufpressungsvorgänge oder durch extremes Ausdünnen der Lithosphäre bis zur Oberfläche durchdragen konnte. Vielleicht wurden auch alle bisher dafür gehaltenen Gesteine dem vermuteten echten Mantelgestein nur so ähnlich, weil bei ihrer Mineralumwandlung kräftige dynamische Prozesse den Druck der Tiefe in seiner Wirkung ersetzten. Wegen dieser Unsicherheiten tauchen immer wieder Projekte auf, wonach mit Hilfe sogenannter übertiefer Bohrun-

gen der Mantel dort angeritzt werden soll, wo man seine Grenzschicht zur Lithosphäre in besonderer Oberflächennähe vermutet. Erfolgversprechend wären dafür die Ozeanböden; denn hier soll die Lithosphäre manchmal nur zwischen 5 und 10 km Dicke aufweisen. Aber wer garantiert schon, daß bei einer solchen abnormen Hochlage des Mantels das darin enthaltene Gestein noch „normal“, das heißt mit so typisch dichter Mineralausbildung geblieben ist, wie es der gewöhnlichen Tiefenlage entsprechen würde?

So gibt es denn über die Zusammensetzung des Mantels vorläufig nur Hypothesen. Dabei wäre es so wichtig, über diese Zone der Erde, die unter der dünnen Kruste von 20 bis 40 km mittlerer Tiefe bis rund 2900 km reicht, etwas mehr zu wissen; denn zum Mantel gehören damit 82 Prozent des Erdvolumens oder zwei Drittel ihrer Masse! Aus der Masseverteilung im Erdinnern folgt, daß der mittleren Mantelsubstanz ein Gestein der Dichte um 4,5 entspricht, aber es ist auch schon länger bekannt, daß eine so mächtige Zone große Unterschiede in ihrer Zusammensetzung aufweisen muß, vergleicht man die bereits sehr un einheitlichen lithosphärennahen Substanzen des oberen Mantels mit denen des unteren. So geht man heute davon aus, daß die Dichte seiner Gesteine gegenüber dem Mittelwert von 4,5 doch von 3,3 bis etwa 6,7 schwanken kann und daß es sich am ehesten um sehr eisenreiche Silikate handeln dürfte, deren Eisengehalt zur Tiefe allgemein zunimmt.

Ab 2900 km Tiefe folgt nach Aussage der Erdbebenwellen dann aber ein plötzlicher Phasensprung zum flüssigen Zustand des Erdkerns. Er wird auch heute noch Nickel-Eisen-Kern oder kurz Nife-Kern genannt. In ihm vermutet man eine durchschnittliche Materiedichte sogar vom Neun- bis Dreizehnfachen des Wassers. Dieser überschwere Kern soll ja die Differenz, die sich aus der geringeren Dichte der Lithosphärenschale von nur 2,8 bis 3,3 und des Mantels um 4,5 zum Mittelwert der Gesamterde von 5,5 ergibt, größtenteils ausgleichen.

Bei den Versuchen, die Entstehung dieses Kerns zu erklären, wurde mitunter zu stark vereinfacht. So haben neuere Berechnungen der Geophysiker ergeben, daß sich durch gravitative Differentiation, also durch Trennung der Stoffe infolge Absinkens ihrer schwereren Bestandteile, eigentlich kein Eisenkern im Erdinnern abgesondert haben kann. Dagegen sprechen in erster Linie die vermutlich zu langsamen Konvektionsströmungen mit ihren auf- und abwärts gerichteten Zirkulationen im Mantel, ohne die sich wiederum dessen Abkühlung bis zur festen Phase kaum erklären ließe. Diese neueren Konzeptionen besagen zunächst wenig über die tatsächliche Zusammensetzung des Erdkerns, der



auch weiterhin als extrem eisenreich angesehen wird. Nur die bis in die Gegenwart verbreitete Auffassung, nach der die Prozesse bei der Verhüttung im Hochofen mit der Schwereretrennung der Erze unter Absinken des verflüssigten Roheisens zur Basis grundsätzlich auch auf die Differentiation im Erdinnern anwendbar sein sollten, läßt sich nicht mehr bedenkenlos aufrechterhalten. Nach den neueren Befunden der kosmischen Geologie wäre viel eher zu schlußfolgern, daß der Erdkern schon in einer sehr frühen Phase der Planetenentstehung seinen hohen Eisengehalt erlangt hat.

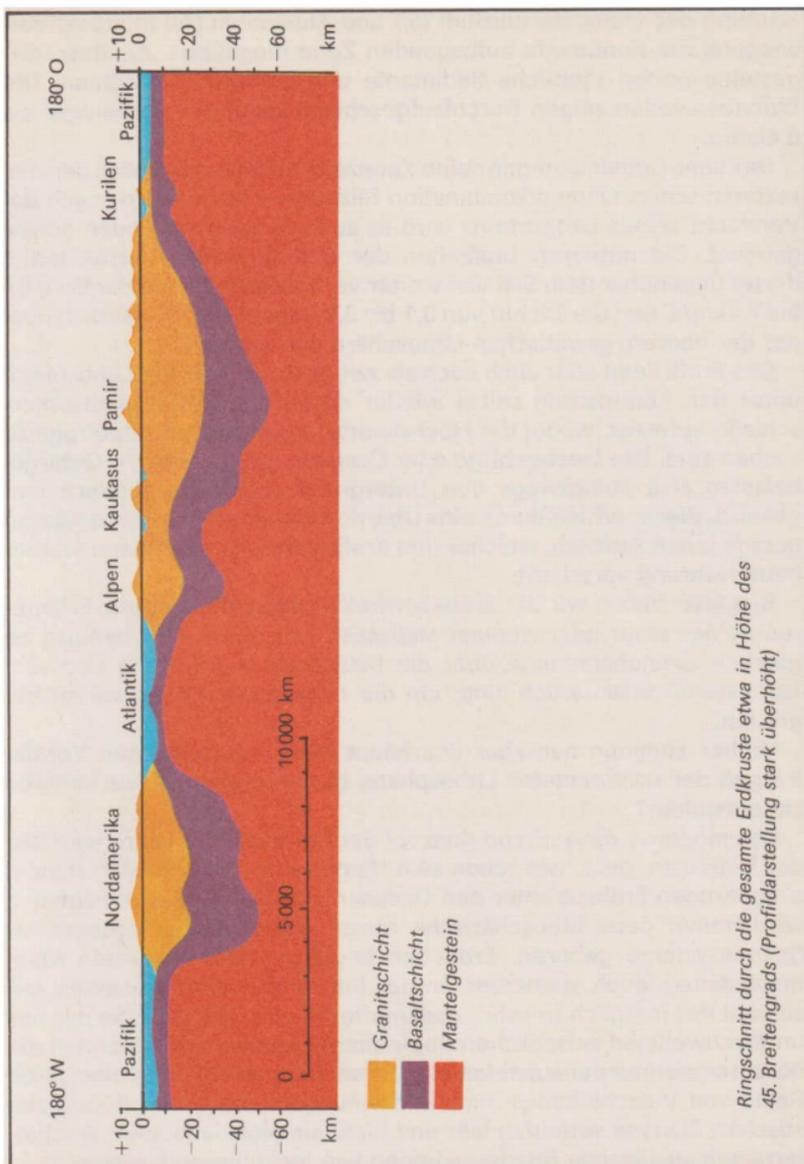
Für die tieferen Teile des Erdinnern mag ein einziger senkrechter Schnitt zur Charakterisierung genügen. Die regional viel differenziertere Situation nahe der Erdoberfläche läßt sich aber so noch keineswegs erfassen. Hier müssen längere Schnittlinien unter die Lupe genommen werden. Ein interessantes Profil durch große Teile der Sowjetunion bis zum offenen Meer veranschaulicht, wie unterschiedlich mächtig die Zonen der Lithosphäre unter den Kontinenten einerseits und den Ozeanen andererseits sind. Die größten Differenzen weist danach ihre obere Schicht auf, die sogenannte Granitschicht. Im Raum des Pazifiks östlich der Kurilen fehlt jede Spur von ihr.

Heute geben die seismischen Profile, die aus den Laufzeitkurven der sich in den einzelnen Gesteinen unterschiedlich schnell fortpflanzenden Erdbebenwellen gewonnen werden, über die Verbreitungsgrenzen dieser Granitschicht genauere Auskunft. Da man in der Sowjetunion der regionalen Struktur, nicht zuletzt wegen ihrer Bedeutung für die Rohstoff- und Lagerstätten erkundung, seit je eine hervorragende Rolle beimißt, haben die Geowissenschaftler das gesamte Territorium schon vor Jahren seismisch sehr genau vermessen. Dabei wurden die Ergebnisse des relativ engmaschigen Netzes an festen seismischen Stationen noch wesentlich durch solche fahrbarer Art ergänzt. So war man in der Lage, zusätzlich zahlreiche Großsprengungen, wie sie sich zum Beispiel beim Talsperrenbau immer wieder ergeben, für die Erforschung des Untergrunds zu nutzen.

Die Grundregeln für den Bau der Lithosphäre lassen sich aus Profilschnitten durch ganze Kontinente und ozeanische Krusten am besten ablesen.

Als erste Regel fällt auf, daß die bekannte Zweiteilung der Lithosphäre in eine leichtere Oberschicht, das Sial, und eine schwerere Unterschicht, das Sima, im kontinentalen Bereich stets vorhanden ist, den Ozeanen aber im allgemeinen zu fehlen scheint.

Die Kurzbezeichnung Sial wurde wegen der überdurchschnittlichen



Ringschnitt durch die gesamte Erdkruste etwa in Höhe des 45. Breitengrads (Profildarstellung stark überhöht)

Häufung der Elemente Silizium (Si) und Aluminium (Al) in dieser vorwiegend die Kontinente aufbauenden Zone eingeführt. Als ihre Leitgesteine gelten sämtliche Sedimente und granitische Magmen. Die Erdbebenwellen zeigen Durchlaufgeschwindigkeiten von weniger als 6,4 km/s.

Das Sima erhielt dagegen seine Kennzeichen Si und Ma nach der charakteristischen Elementkombination Silizium – Magnesium; nach der Vormacht seines Leitgesteins wird es auch Basaltschicht oder -schale genannt. Die mittleren Laufzeiten der Erdbebenwellen erreichen in dieser gegenüber dem Sial viel weiter verbreiteten Schale der Erde 6,4 bis 7,4 km/s, und die Dichte von 3,1 bis 3,3 liegt ebenfalls deutlich über der der oberen, granitischen Lithosphäre von 2,8 bis 2,9.

Das Profil zeigt aber auch noch als zweite Regel, daß die Lithosphäre unter den Kontinenten selbst wieder erhebliche Mächtigkeitsunterschiede aufweist, wobei die Höchstwerte unter den Hochgebirgen zu suchen sind. Die Hochgebirge oder Orogene (griech. oros = Gebirge) belasten also keineswegs den Untergrund zusätzlich, sondern umgekehrt, dieser erhielt durch eine Überdosis leichterer Gesteinsmassen gerade jenen Auftrieb, welcher den Kräften des Abtrags immer wieder neue Nahrung verschafft.

Bis jetzt haben wir die Erdbebenwellen ausschließlich zur Erläuterung eines mehr oder weniger statischen Krustenmodells benutzt, da gewisse Grundkenntnisse über die Bauformel des Erdballs und sein Baumaterial erforderlich sind, um die dynamischen Prozesse zu begreifen.

Woher kommen nun aber überhaupt diese merkwürdigen Verdickungen der kontinentalen Lithosphäre, beziehungsweise wie konnten sie entstehen?

Das moderne *dynamische* Konzept der Tektonik, der Lehre vom Bau der Erdkruste, geht, wie schon sein Name sagt, von einer sich ständig erneuernden Erdhaut unter den Ozeanen aus. Durch Magmenaufstieg wird immer neue lithosphärische Masse längs riesiger ozeanischer Spaltensysteme geboren. Erdbeben begleiten zwar auch den Magmenaufstieg, doch, gemessen an der Intensität dieses Prozesses, geschieht das lediglich in sehr „gedämpfter“ Form. Als Ursache der nur unterschwellig seismischen Begleitmusik können wir allgemein die hohe Temperatur der aufsteigenden Schmelzen ansehen, die eine ganze Reihe von Verschiebungs- und Verformungsprozessen im flüssig-plastischen Zustand verlaufen läßt und nicht als plötzliche, eher Erschütterungen auslösende Bruchreaktionen wie im kühleren Gestein.

Nun gehört zur Neuschöpfung riesiger Krustenflächen auch irgendwo ein entgegengesetzter Prozeß, es sei denn, die Erde dehnt sich in Wirklichkeit mehr und mehr aus. Und tatsächlich hat es in der Anfangsphase der modernen Erkenntnisse über das Verhalten ozeanischer Krusten eine Flut von Hypothesen gegeben, deren Vertreter darauf hinauswollten, daß der Zuwachs an ozeanischer Kruste eine Ausdehnung der Erde anzeige. Heute kennen wir die „Antizuwachszonen“ der Lithosphäre besser und wissen einiges, wenn auch **nicht genug**, über das Wiederabtauchen ozeanischer Kruste nahe **oder unter** den Kontinentalrändern.

Die auftauchende Komponente des großen **geotektonischen** Massenkreislaufs, das Gebirge, wurde, weil sie **der** Forschung leichter zugänglich ist, zuerst gesehen und gedeutet. Die Erforschung der Prozesse unter den Ozeanen, sowohl der Krusten Neubildung als auch der Wiederauflösung, setzte später ein und erwies sich als viel schwieriger. Diese Prozesse finden im verborgenen statt, zum Teil in großer Krustentiefe, oft unter den Gebirgswurzeln, wo die Lithosphäre sich ohnehin schon durch anormale Dicke auszeichnet. Wie sollen da überhaupt noch Belege zu uns gelangen?

Über die Dynamik können nur die seismischen Wellen zu uns sprechen; denn die Bewegungen spielen sich in nicht mehr zu erbohrenden Tiefen ab.

Die meisten Erdstöße sind sogenannte Flachbeben. Dazu gehört alles, was sich aus Herden meldet, die weniger als 50 bis 60 km tief liegen. Immer noch zahlreich, vor allem in den beweglichen Gürteln der Erde, werden Beben aus Herdtiefen bis etwa 300 km unter der Oberfläche wahrgenommen. Doch das ist nicht der Weltrekord der Tiefbeben — den hält der Schelf der Sundainseln mit 730 km. Aber auch der Ostrand der Anden Südamerikas sowie zahlreiche pazifische Inselgruppen erleben Erdstöße aus 700 km Tiefe.

Während solche Tiefbeben aus Herdlagen zwischen 300 und 700 km weltweit gesehen durchaus keine Seltenheit sind, bricht kurz unterhalb der 700-km-Marke die Beben-tätigkeit der Kruste spontan ab. Warum wohl? Dies war bis vor wenigen Jahren ein ebenso großes Problem wie die Gegenfrage: Wie kann es überhaupt noch in Tiefen unter 80 bis 100 km Erdbeben geben? Sollte nicht spätestens ab hier die Temperaturzunahme im Erdinnern zu einem dermaßen starken Erweichen, wenn nicht gar zum schmelzflüssigen Zustand der Gesteinskörper geführt haben, daß Erdstöße einfach physikalisch unmöglich werden, weil die plastische Verformbarkeit des silikatischen Materials dabei

allmählich zu Fließvorgängen überleitet? Diese Frage erweist sich als durchaus berechtigt. Unterhalb der 700-km-Marke ist es selbst für schnell abtauchende ozeanische Krusten zu warm geworden; ein bruchartiges Zerreißen der Platte kann nicht mehr erfolgen. Umgekehrt verbindet sich aber mit diesem Abtauchvorgang gerade in den höheren Teilen der sinkenden ozeanischen Kruste die Befähigung zur Erdbebenerzeugung. Mit der Substanz der sinkenden Scholle wird ja gleichzeitig ein großer Kälteverrat – bezogen auf die neue Tiefenlage – verschluckt, der erst thermisch verdaut, das heißt aufgeheizt sein will.

Erschütterungen auf anderen Himmelskörpern

Auch die Krusten des Mondes und der Nachbarplaneten sind bestimmt nicht frei von Erschütterungen – soviel läßt sich jetzt schon sagen. Denn einer von ihnen, der Mond, wurde ja bereits getestet und hat den Beweis geliefert. Im Rahmen des „Apollo“-Programms brachte man 5 Seismometer an verschiedene Punkte der uns zugekehrten Seite des Erdtrabanten und registrierte die Mondbeben bis zum Jahr 1977. Ergebnis: Die seismische Aktivität des Mondes entspricht nur dem hundertsten bis tausendsten Teil der irdischen Stärke, und es lassen sich Meteoriteneinschlagsbeben und „echte“ tektonische Beben aus dem Mondinnern unterscheiden. Die „echten“ Beben wiesen häufig Herdlagen zwischen 600 und 1000 km Tiefe auf. Damit reicht – den Erwartungen entsprechend – die starrere Mondkruste in weit größere Tiefen hinab als die Kruste auf der Erde. Wir müssen aber diese Zahlen auch relativ betrachten. 1000 km unter der Oberfläche bedeuten bei rund 1800 km Mondradius, daß schon mehr als die halbe Weglänge in Richtung lunares Zentrum zurückgelegt wurde, was auf der Erde erst in knapp 3200 km Tiefe der Fall wäre.

Nicht übersehen ließ sich außerdem, daß sich die Mondbeben etwa in Monatsabständen häuften, und zwar immer dann, wenn sich unser Trabant in Erdnähe befand. Lunas Umlaufbahn um die Erde weicht ja um einiges von einer idealen Kreisbahn ab. So schwankt ihr Abstand von der Erde zwischen 356 000 und 406 000 km, also um rund 50 000 km oder ungefähr 12 Prozent. Da die Erdanziehung auf dem Mond entsprechend dem Massenverhältnis beider Körper fast hundertmal größer ist als umgekehrt (genauer 81:1), kann es kaum verwundern, daß die Be-

bentätigkeit seiner Kruste abhängig von der Umlaufposition pulsiert.

Über Mars- und Venusbeben werden wir bald aussagekräftigere instrumentelle Ergebnisse erhalten. Erwartet wird für den Mars eine Krustenaktivität, die zwischen irdischen und lunaren Intensitätsgraden liegt. Aber allein um das zu erfahren, würde man so kostspielige Unternehmen nicht starten. Es geht um mehr. Der wie bei der Erde nur seismisch zu ermittelnde Innenaufbau des Planeten liefert das Leitmotiv für einen solchen Instrumenteneinsatz.

In dieser Hinsicht wäre das Venusprofil für Geowissenschaftler fast noch interessanter. Unsere sonnennähere Schwester ist die eigentliche große Unbekannte unter den Verwandten der Erde. Die hohen Bodentemperaturen von fast 500°C und eine Masse von etwa 80 Prozent unserer eigenen sprechen für eine mit der irdischen vergleichbare dünne Venuskruste. Aber wurde sie je stärker durchbewegt? Das fehlende Magnetfeld läßt jedenfalls kaum auf Strömungen im Planeteninneren schließen. Ist das nur auf die schwache Rotation des Planeten zurückzuführen? Oder verbirgt sich hinter der anormalen Rückwärtsdrehung der Venus außerdem eine Eigenart der Kruste? Das sind alles sehr interessante, aber gegenwärtig noch nicht zu beantwortende Fragen der kosmischen Geologie, die verständlich machen, daß besonders die Planetologen und Wissenschaftler verwandter Disziplinen die nächsten Venusforschungen kaum mehr erwarten können.

Krustenfahrpläne

Die modernen Vorstellungen vom Werden und Vergehen der Kontinente und Ozeane an der Erdoberfläche berücksichtigen alle in irgendeiner Weise die kaum zwei Jahrzehnte alte epochemachende Entdeckung, wonach in der lichtlosen Tiefe der Ozeanböden riesige Reißnähte existieren, von deren Flanken große Teile der Erdkruste seit Jahrmillionen ständig auseinander driften.

Wäre dieses neue Konzept der Globaltektonik nicht schon auf Grund der Erdforschung entwickelt worden, die kosmische Geologie hätte es eines Tags durch die Beweiskraft ihres ständig wachsenden Vergleichsmaterials ebenfalls erzwungen. Bereits nach den bisherigen Ergebnissen der Raumfahrt entspricht das Verhalten der Lithosphäre unserer

Erde nur einer Übergangserscheinung von der völligen Krustenerstarrung der kleinen zur völligen Oberflächenverflüssigung der großen Planeten. Und diese Vermittlerrolle steht der Erde ja eigentlich auch zu – ist sie doch der größte der kleinen inneren Planeten des Systems und andererseits der kleinste der großen, wenn wir die Planetenriesen mit in Betracht ziehen.

Diesen Übergangszustand unserer Kruste zwischen fest und flüssig, dieses Pendeln von Erstarrung zu Wiederaufschmelzung und erneuter Erstarrung können wir wohl am ehesten mit dem brodelnden Auf und Ab der heißen Schmelzen in Lavaseen großer vulkanischer Kalderen vergleichen. Hier wie dort gibt es eine immer wieder aufreißende Kruste, aus der schmelzflüssige Lava hervorbricht und erstarrt; hier wie dort verbergen sich im Untergrund noch heißere Massen, die sich in Konvektionsströmung befinden und die erstarrten Schollen der Krusten mitfahren lassen, das Aufreißen erzwingend und auch das Absinken einzelner Bruchstücke. Doch damit sollte der Vergleich enden. Die Schollen der Erdkruste haben die Größe von Superkontinenten und die planetarischen Dimensionen ihre eigenen Gesetze.

Das Wesen und zugleich das Neue der modernen Krustenstrukturlehre macht uns am besten eine Gegenüberstellung mit den bis vor kurzem noch für gültig gehaltenen geotektonischen Hypothesen deutlich.

Bis etwa zu Beginn der sechziger Jahre beherrschte nicht eine geotektonische Theorie das Feld, sondern eine Vielzahl von Meinungen. Und ähnlich wie bei der Hypothesenflut zur Eiszeitentstehung ahnte mancher, daß dies nur ein Anzeichen dafür sein konnte, wie weit die Geowissenschaftler noch von der Enträtselung des wahren Sachverhalts entfernt waren.

Etwa zehn Hypothesen galten als diskussionswürdig und hatten meist auch ihre namhaften Vertreter, die sie mit Eifer verfochten. Je nachdem, welchen geophysikalischen Prozessen die Hauptbedeutung beigemessen wurde, lassen sich diese Entwürfe zur Erklärung des Entstehens und Vergehens der Großformen unserer Erdoberfläche in mehrere Gruppen zusammenfassen.

Zu den ältesten gehören die Kontraktionstheorien (lat. *contractio* = zusammenziehen). Bis kurz nach der Jahrhundertwende herrschten sie sogar vor. Weil man zahlreiche erst in den folgenden Jahrzehnten erfaßbar gewordene geophysikalische Werte und Prozesse nicht kannte, erschien manches viel einfacher, als es in Wirklichkeit war. Man glaubte, die Erde schrumpfe wie ein Bratpfel. Früher ein

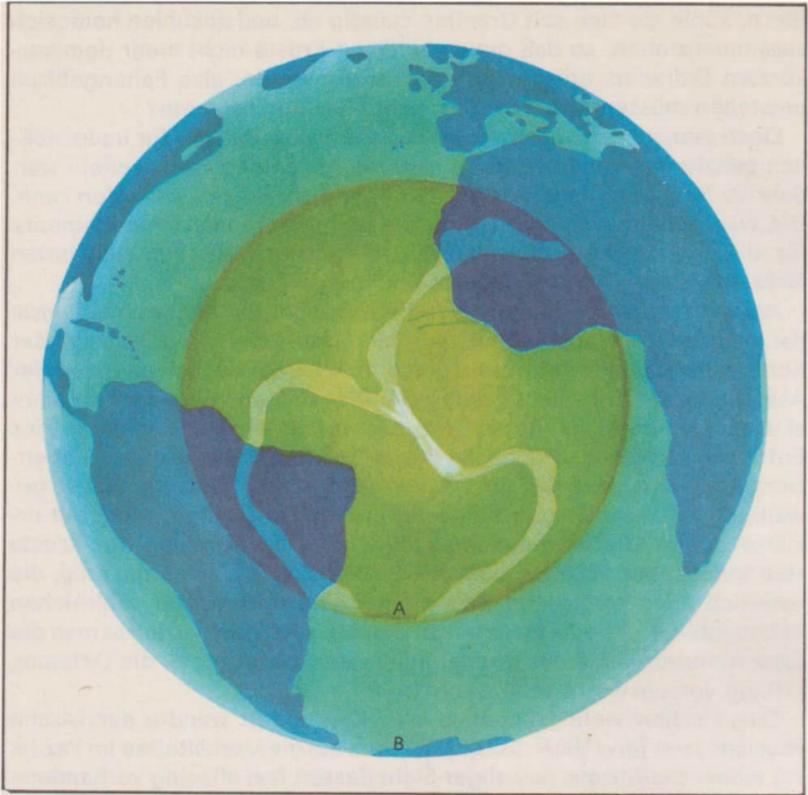
Stern, kühle sie sich seit Urzeiten ständig ab, und abkühlen heißt sich zusammenziehen, so daß die vorzeitliche Kruste nicht mehr dem verkürzten Erdradius entspreche und runzlig werde, also Faltengebirge entstehen müssen. Leuchtet das nicht alles durchaus ein?

Doch einige Skeptiker bemerkten bald, daß selbst der für unumstößlich gehaltene Grundsatz der generellen Abkühlung anzuzweifeln war. Sehr zu Recht übrigens, wie aus heutiger Sicht bestätigt werden kann. Die wachsenden Kenntnisse über die Rolle der radioaktiven Elemente für die thermische Entwicklungsgeschichte unseres Planeten boten Nährstoff genug für abgeänderte Erklärungsversuche.

Am extremsten verhielten sich die Anhänger der Expansionstheorie (lat. *expandere* = ausbreiten). Sie verkehrten das Grundkonzept der Kontraktionstheoretiker in sein Gegenteil, indem sie statt andauernder Abkühlung der Erde deren stetige Aufheizung aus dem Zerfall radioaktiver Elemente ableiteten und daraus auf eine Ausdehnung des Erdradius schlossen. Auf solche Weise ließen sich die großen Grabenzonen der Erde, wie das Rote Meer samt der Fortsetzung dieses gewaltigen Bruchsystems in den ostafrikanischen Gräben, recht gut erklären; denn Gräben entstehen dort, wo eine Dehnung der Kruste stattfindet. Aber Schwierigkeiten ergaben sich, als es darum ging, die natürlich nicht wegzuleugnenden Einengungsformen der zahlreichen Faltengebirge unseres Planeten zu deuten. Also differenzierte man die Expansionsvorgänge der Kruste, indem man behauptete, die Dehnung erfolge vorzugsweise subozeanisch.

Diese schon viele Jahrzehnte alte Konzeption wandte der irische Physiker *John Joly* (1857–1933) besonders auf die Verhältnisse im Pazifik an, wobei bereits aus damaliger Sicht dessen fast allseitig vorhandene Randgebirge als Folge des Aufpralls der sich ausweitenden ozeanischen Kruste verstanden wurden. In groben Zügen kommt diese Vorstellung der gegenwärtigen Deutung der Bewegungsverhältnisse im Randbereich des Pazifiks recht nahe. Aber das gilt wirklich nur für den pazifischen Raum und bei sehr allgemeiner Betrachtungsweise. Die heutigen Vorstellungen über Motor, Dimension und Mechanismus der Ausbreitung ozeanischer Krusten weichen in Wirklichkeit von dieser Variante einer Expansionstheorie doch ziemlich weit ab.

Immerhin fühlten sich die Expansionstheoretiker zunächst mit als erste angesprochen, als sich die modernen Auffassungen von der Theorie des *Sea floor spreading* (engl. = Meeresbodenausbreitung) Anfang bis Mitte der sechziger Jahre allmählich durchzusetzen begannen. Dies ließ eine bis in die siebziger Jahre hineinreichende zweite



Schema zur Theorie der Erdexpansion

A = Erdkugel mit Kontinentalverteilung vor mehr als 200 Millionen Jahren

B = Land- und Meerverteilung auf expandierter Erde heute

Welle expansionstheoretischer Schriften entstehen, die – weil nicht selten sehr populär gehalten – auch ein erhebliches Echo in der Öffentlichkeit fanden.

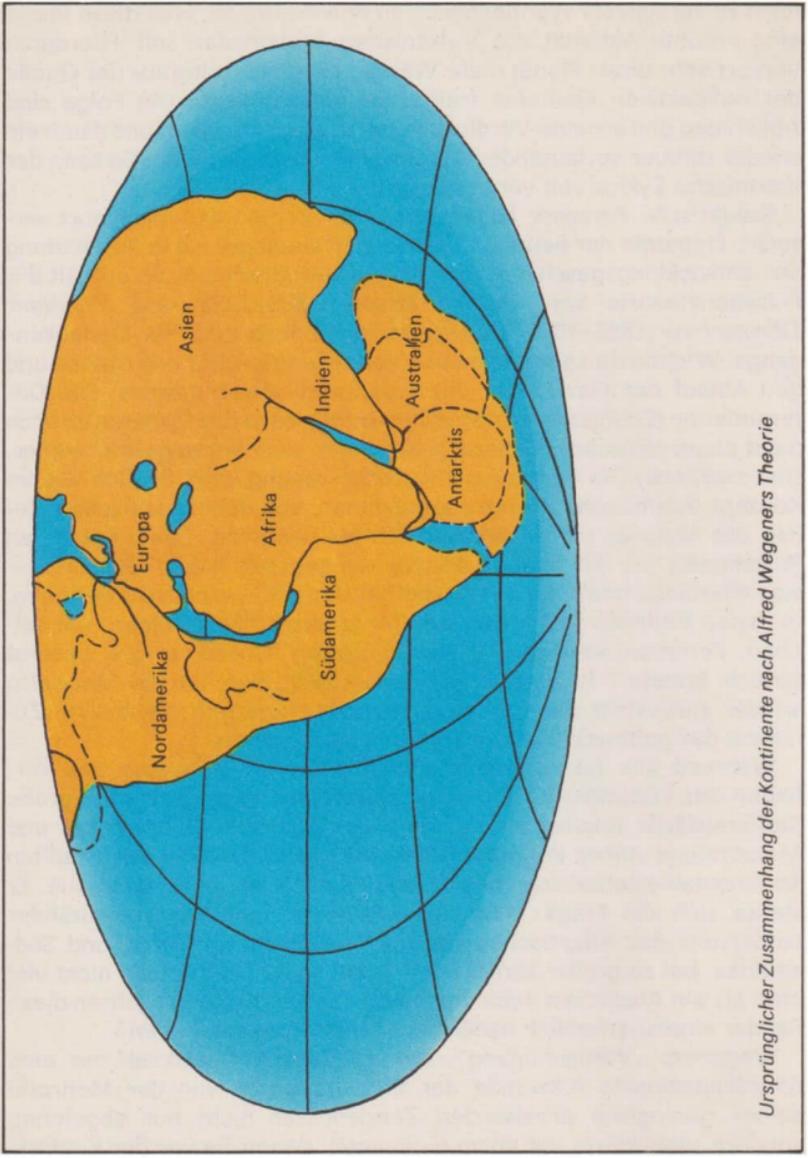
Etwa seit Mitte dieses Jahrhunderts vertiefte sich der Streit über die Stärke der radioaktiven Aufheizung der Erde mehr und mehr. Neben den Extremisten der Expansionstheorie stand schon bald eine gemäßigte Gruppe. Ihr Konzept: Die radioaktive Erwärmung der Erde bewirkt ein Erweichen der Schichten des oberen Erdmantels einschließlich der Lithosphäre, was eine Konvektionsströmung in Gang kommen läßt. Sie

führt zu verstärkter Wärmeabgabe an den Weltraum, weil diese Phase eine erhöhte Aktivität des Vulkanismus hervorrufen soll. Hierdurch verliert aber unser Planet mehr Wärme, als gleichzeitig aus der Quelle der radioaktiven Elemente freigesetzt werden kann. Die Folge sind Abkühlung und erneute Verdickung der starrereren Erdhaut und damit ein wieder ruhiger verlaufender Abschnitt der Erdgeschichte. So kann der thermische Zyklus von vorn anfangen.

Sowjetische Forscher haben schon vor Beginn der Raumfahrt versucht, Elemente der heutigen kosmischen Geologie mit in die Deutung der Entwicklungsgeschichte der Kruste einzubeziehen. So enthält die Pulsationstheorie von *Michail Ussow* (1883–1939) und *Wladimir Obrutschew* (1863–1956) eine ganze Reihe noch aktueller Gedankengänge. Wichtigste Leitmotive ihrer Vorstellungen über den Aufbau und den Ablauf der Geschichte des Erdkörpers waren erstens: Die Differentiation (Entmischung) des Magmas im Innern des Planeten ist noch nicht abgeschlossen, sondern geht, wenn auch verlangsamt, weiter. Und zweitens: Die Stärke der Krustenbewegung wird, ähnlich wie im Konzept thermischer Zyklen angenommen, von dem spezifischen Gehalt des Magmas an radioaktiven Stoffen bestimmt. Dabei entstehen Pulsationen, die der Theorie den Namen gegeben haben. Sie sollen – was allerdings heute für sehr hypothetisch gilt – expansive Perioden, in denen Reliefverflachungen und Meeresvorstöße erfolgen, mit solchen Perioden abwechseln lassen, deren Charakter als geokrat (griech. *kratein* = herrschen) bezeichnet wird, in denen das Meer also wieder zurücktritt, die kontraktiv verlaufen und sich durch eine Zunahme der gebirgebildenden Prozesse auszeichnen.

Während alle bisher beschriebenen Theorien entweder das Verhalten der Lithosphäre als Ganzes zu erklären versuchen oder große Stoffkreisläufe rekonstruieren, ging der deutsche Geophysiker und Meteorologe *Alfred Wegener* (1880–1930) in seiner 1912 aufgestellten Kontinentalverschiebungstheorie von Oberflächenmerkmalen aus. Er stellte sich die Frage: Kann die „Paßform“ der Kontinentalränder beiderseits des Atlantischen Ozeans, besonders von Afrika und Südamerika, bei so großer Länge noch Zufall sein? Oder ist sie nicht viel eher als ein Anzeichen dafür zu deuten, daß vor Millionen Jahren diese Ränder einmal erheblich näher beieinander gelegen haben?

Wegeners „Verdächtigung“, der Atlantische Ozean sei nur eine überdimensionale Reißwunde der Erdhaut, wurde von der Mehrzahl seiner geologisch arbeitenden Zeitgenossen nicht nur abgelehnt, sondern schockierte vor allem diejenigen, denen die von der Kontrak-



Ursprünglicher Zusammenhang der Kontinente nach Alfred Wegeners Theorie

tionstheorie diktierte Meinung, die Kontinentalabstände hätten sich in der Erdgeschichte nur wenig verändert, zum geologischen Glaubensbekenntnis geworden war. Er selbst fand aber seinen Verdacht noch dadurch erhärtet, daß diese Verschiebungen offensichtlich an einigen Kontinenten ihre Spuren hinterlassen haben. So sah er in den Kordilleren eine Art Bugwelle der westwärts driftenden amerikanischen kontinentalen Schollen. Da er eigentlich Geophysiker war, lagen ihm Deutungen im Sinn planetarischer beziehungsweise kosmisch-geologischer Zusammenhänge besonders nahe. So glaubte er an eine Steuerung der Kontinentalverschiebungen nach planetarischen Rotationsgesetzen. Erstens sollten sie eine Polflucht der Kontinente auslösen, weil sich auf diesen das Durchschnittsniveau der Erdoberfläche überragenden Landmassen die Fliehkraft verstärkt; und zweitens wurde für die kontinentale Westdrift die erdgeschichtlich wirksame Gezeitenbremse der Rotation durch unseren Erdtrabanten verantwortlich gemacht. Sehr vereinfacht heißt das: Der Mond verlangsamt die Erdrotation, weil die von seinem Umlauf erzeugten Gezeiten, Ebbe und Flut, Energie verbrauchen, und wirkt dabei vornehmlich auf die Außenhaut unseres Planeten. Der Kern will aber schneller weiterdrehen. So branden die von ihm stärker mitgeschleppten, weil tiefer liegenden subozeanischen Krustenmassen nach Osten auf die weiter herausragenden und daher mehr gezeitengebremsten Kontinente.

Manchmal wird die Meinung vertreten, die moderne Globaltektonik habe Wegeners Theorie letztlich nur bestätigt. So einfach ist das aber nicht. Wegener hatte von den subkrustalen Strömungsverhältnissen verständlicherweise noch keine Ahnung. Seine fahrenden Kontinentalschollen waren viel dünner, als es den heutigen Vorstellungen entspricht. Nach ihm sollten sich eigentlich nur die Sialmassen der Kontinente aktiv gegen das Sima stemmen. Die neue Globaltektonik aber sieht das Gleitlager nicht in 20 bis 30 km Tiefe, sondern in der Asthenosphäre, zwischen 80 und 150 km unter der Oberfläche. Sial und Sima fahren also gemeinsam.

Natürlich baute Wegeners Theorie stark auf der Vor- und Zuarbeit anderer Geologen auf. 1883 hatte der österreichische Geologe *Eduard Suess* (1831–1914) den Begriff Gondwanaland geprägt. Grundlage dieser bald allen Geologen bekannt werdenden Bezeichnung für einen einheitlichen Südkontinent der Erde, der einstmals bestanden hat, waren aufschlußreiche Gesteins- und Fossilfunde aus dem Paläozoikum südlich der Gangesebene im Siedlungsgebiet des alten indischen Volksstamms der Gond. Die entwicklungsgeschichtlichen Aussagen dieser

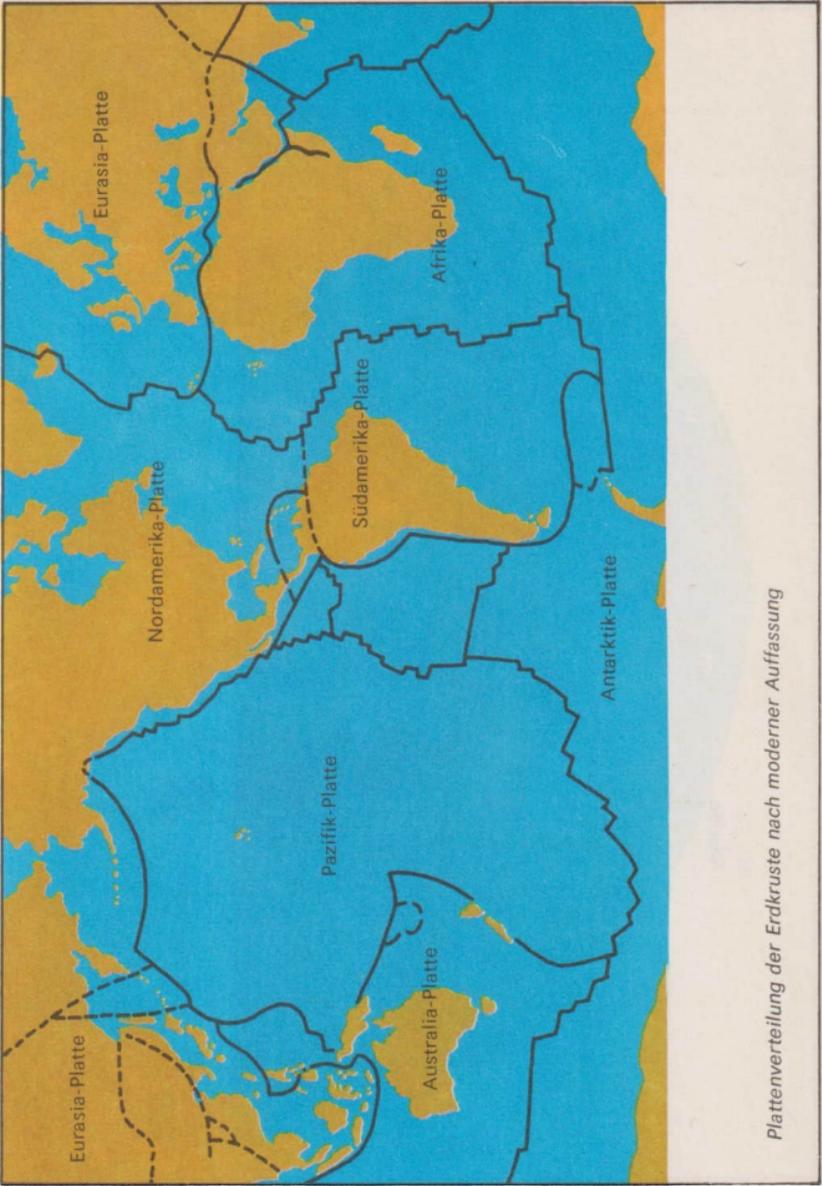
Fundstätte ließen eine nahe Verwandtschaft mit erstaunlich ähnlichen, vornehmlich permokarbonen Schichtkomplexen Südafrikas, Australiens und Südamerikas erkennen. Später konnte dann noch die Antarktis in diese Faunen- und Florengemeinschaft mit einbezogen werden. Vom Gleichklang der Entwicklung zeugen nicht nur die auf allen fünf Teilkontinenten zu findenden Spuren einer großen permokarbonen Eiszeit, sondern auch die gemeinsame landbewohnende Wirbeltierfauna jener Erdperiode zwang zu der Annahme, daß ehemals eine engere Verbindung zwischen diesen Landkomplexen bestanden hat.

Die Anhänger der verschiedenen Theorien zur Entwicklung der Erdkruste wurden jeweils auf ihre Weise mit diesem Befund fertig. Für Wegener war der nachweislich seit dem Mesozoikum erfolgende Zerfall Gondwanas ein Beleg für seine kontinentale Driftkonzeption, und er nannte den Ausgangszustand Pangea = Großerde, was sich auf den Zusammenhang mehr oder weniger aller Landmassen im frühen Paläozoikum oder in noch älteren Erdperioden beziehen sollte.

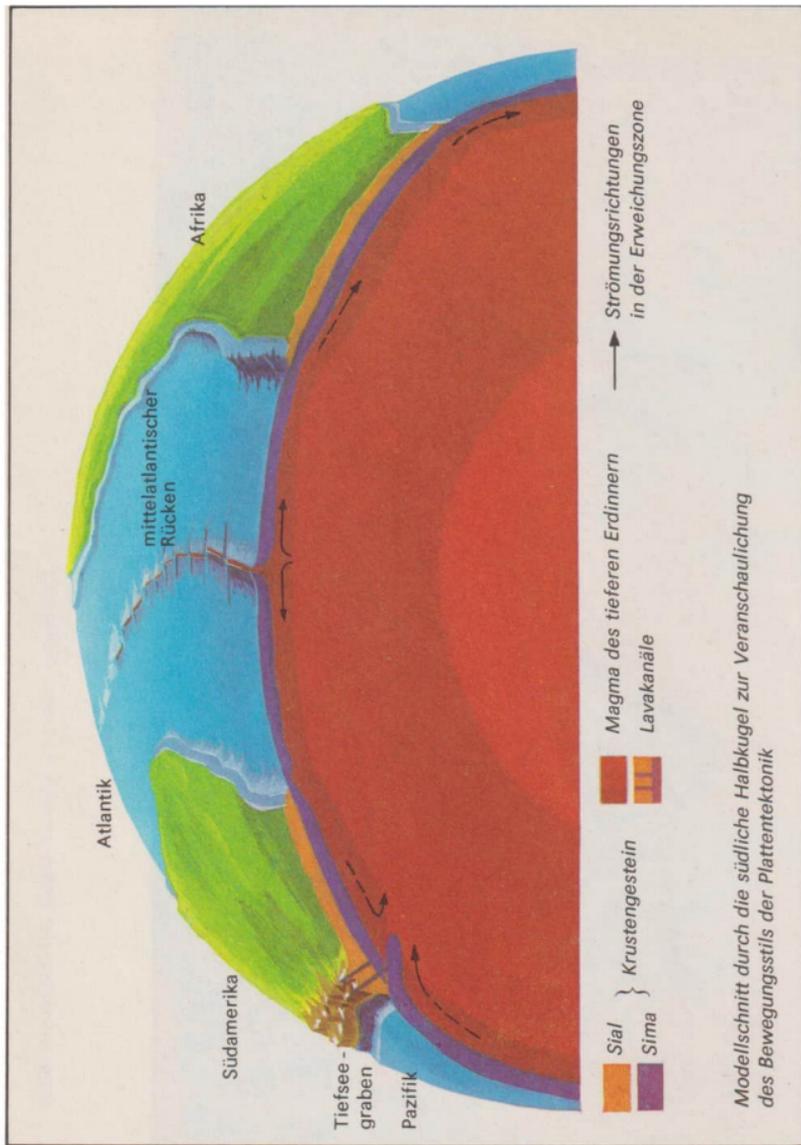
Aber auch seine Gegner waren um eine Deutung keineswegs verlegen. Der Begriff des Brückenkontinents wurde eingeführt. Man brauchte die Kontinente ja gar nicht zu verschieben, um den Landwirbeltieren Austauschwege zu verschaffen. Landbrücken – heute versunken – genügten. Am bekanntesten unter ihnen wurde wohl das sagenumwobene Atlantis. Es hat, das läßt sich jetzt mit Bestimmtheit sagen, niemals im Sinn eines Brückenkontinents bestanden; denn alle heutigen Inseln im Atlantik sind junge vulkanische Bildungen und keine kontinentalen Reste.

Kontinentalverschiebung aus neuer Sicht

Schon die hier gegebene, keineswegs vollständige Übersicht über geotektonische Hypothesen zeigt, wie viele Unklarheiten über den Fahrplan der Globaltektonik in der theoretischen Geologie bis Anfang der sechziger Jahre vorhanden waren. Bis heute bestehen gegensätzliche Auffassungen wie Kontraktions- und Expansionstheorie nebeneinander, und der Meinungsstreit, welche Bewegungskomponente mehr krustenverändernde Wirkung ausübe, die vertikale oder die horizontale, wird sicher noch einige Jahre andauern, obwohl inzwischen revolutionierende neue geophysikalische Tatsachen eigentlich bereits vieles zugunsten der Verschiebungstheorien entschieden haben.



Plattenverteilung der Erdkruste nach moderner Auffassung



Aber zahlreiche Probleme blieben ungelöst, und durch Erkenntnisfortschritte werden ja bekanntlich immer wieder neue aufgeworfen. Aus der oft nur zu berechtigter Kritik ergaben sich bisher recht wertvolle Anregungen, die halfen, wenigstens einen Teil der Probleme des neuen Krustenfahrplans, dessen Kurzbezeichnung Plattentektonik lautet, einer Lösung näher zu bringen. Plattentektonik, das ist das an die Struktur eines Schildkrötenpanzers erinnernde Schollenmosaik der irdischen Lithosphäre mit manchmal überkontinentgroßen Platten. Der Begriff Plattentektonik wird aber nicht nur statisch verstanden, sondern auch dynamisch. Doch gerade hier scheiden sich die Geister. Über die Art der Bewegung ist man sich zwar im Prinzip einig, aber es gibt sozusagen noch Stilfragen, und die haben es in sich! Doch zunächst wollen wir uns mit den Grundlagen der Plattentektonik beschäftigen.

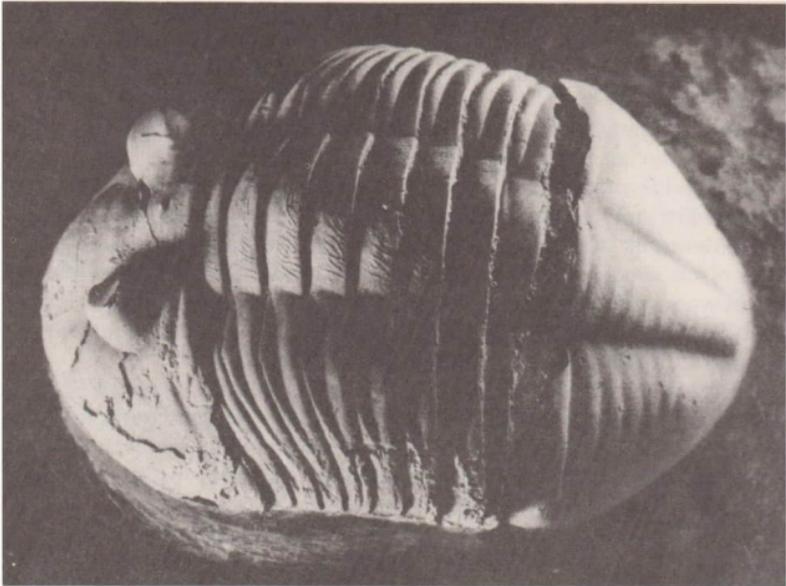
Plattentektonik, zum erstenmal 1970 formuliert, ist nicht das Produkt der genialen Stunde eines einzelnen, sondern die zwingend logische Folge einer von vielen verarbeiteten, bis dahin nie gekannten Flut von Daten aus den unsichtbaren Bereichen unseres Planeten. Dem ging jene Forschungsperiode von etwas über einem Jahrzehnt voraus, der wir eigentlich den alles entscheidenden Wissenszuwachs zu verdanken haben.

Zunächst wurde damals die schon 1959 von dem Geophysiker *Beno Gutenberg* vermutete Zone verlangsamter Ausbreitung der Erdbebenwellen als Ausdruck einer Erweichungszone im oberen Erdmantel zwischen 80 und 150 km Tiefe entdeckt. Das Schmiermittel, das Kontinentalverschiebungen überhaupt erst erklärlich machte, war gefunden; eine Zone, in der Gesteinskriechen relativ oberflächennah erfolgen konnte, existierte also tatsächlich.

Der Anfang der sechziger Jahre brachte vielleicht die allerwichtigste Voraussetzung für die Entwicklung einer erfolgreichen Submarinegeologie. Zu dem schon vorhandenen Wissen um die unruhige Lage der magnetischen Pole im Lauf der Erdgeschichte kam noch eine viel revolutionierendere Erkenntnis: die zeitweilige totale Umkehr oder Inversion des erdmagnetischen Felds, also mit vertauschter Lage vom magnetischen Nord- und Südpol.

Inzwischen weiß man, daß sich allein in den letzten 4,5 Millionen Jahren mindestens 26 (!) Umpolungen vollzogen haben. Die Dauer der Perioden schwankt allerdings erheblich – zwischen 10000 und 700000 Jahren werden gegenwärtig angegeben.

Um zu verstehen, wie sich so etwas überhaupt erfassen und messen läßt, stelle man sich vor, daß in die meisten sandigen Sedimente winzige



Asaphus, ein etwa 450 Millionen Jahre alter und nur wenige Zentimeter langer Trilobit, ist als Versteinerung in Mitteleuropa auf Blöcken zu finden, die der Gletscherstrom der Eiszeit aus Skandinavien herantransportierte.

Magnetitkriställchen aus zersetztem magmatischem Gestein eingeschwemmt werden. Entsprechend den zur Zeit der Einbettung herrschenden jeweiligen erdmagnetischen Verhältnissen ergibt das eine wenn auch meist nur schwache feldparallele Ausrichtung der sich wie winzige Magnetnadeln verhaltenden Mineralkörner. Global und über Zeiträume von mehreren hundert Millionen Jahren betrachtet, erwiesen sich nun etwa 50 Prozent aller untersuchten Gesteinsproben als dem gegenwärtigen erdmagnetischen Feld entgegengesetzt magnetisiert, und zwar eindeutig weltweit immer in gleichaltrigem Gestein auch gleichsinnig ausgerichtet. So finden wir, um ein Beispiel zu nennen, daß vor 300 000 bis 500 000 Jahren entstandene Sedimente dem gegenwärtigen Feld entsprechend, also normal, magnetisiert sind, ganz gleich, ob wir dabei Eiszeitsedimente Europas und Nordamerikas betrachten oder ob es sich um gleichaltrige Absätze tropischer Flüsse Afrikas handelt. Werden diese Schichten allerdings von 1 bis 1,5 Mil-



*In den rund 100 Millionen Jahre alten Kreideschichten des nördlichen Harzvorlands fanden Geologen als Leitfossil den Ammoniten *Platiceras*.*

lionen Jahre alten Sedimenten unterlagert, so zeigen sich die älteren Gesteine grundsätzlich invers magnetisiert, das heißt mit vertauschten Rollen von Nord- und Südpol.

Solche Kenntnisse vom Paläomagnetismus im Gestein bieten gleich eine ganze Reihe neuer Einsatzmöglichkeiten für die geologische Erforschung der Erde. Zum Beispiel läßt sich für die Stratigraphie (Lehre von der Aueinanderfolge der Gesteinsschichten) der letzten 600 Millionen Jahre Erdgeschichte eine wesentliche Ergänzung zur bisher vorherrschenden Leitfossilmethode erwarten. Damit eine versteinerte Lebensspur als Leitfossil Anerkennung finden kann, verlangt der Stratigraph von ihr, daß sie mehreren Anforderungen entspricht. Die Form soll massenhaft vorkommen, weltweit in möglichst verschiedenartigen Gesteinen auftreten und obendrein – zumindest im geologischen Sinn – kurzlebig sein, was allerdings immer noch Zeitspannen von etwa 2 bis 5 Millionen Jahren bedeuten kann. Diese Bedingung zu

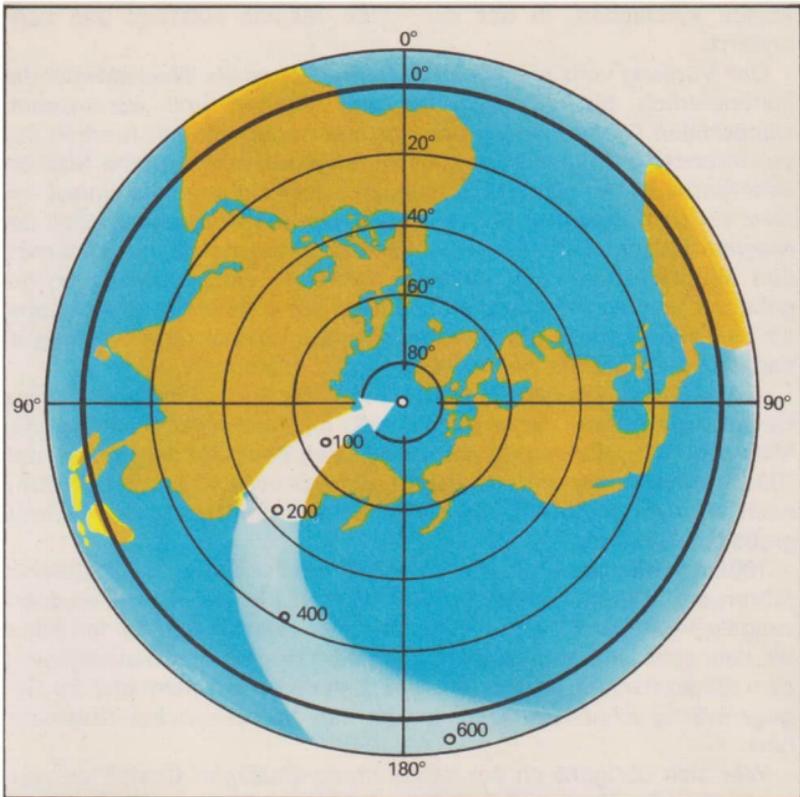
erfüllen gelingt nur ganz wenigen Gruppen des Tier- und Pflanzenreichs – am ehesten der marinen wirbellosen Fauna. Aber viele Schichtgesteine haben gar keine Leitfossilien. Oft erweisen sich sogar kilometerdicke Gesteinspakete als nahezu fossilleer, entweder weil sie in lebensfeindlichen Räumen abgelagert oder weil die Organismen noch vor der schützenden Sedimenteinbettung am Meeresgrund zerstört wurden, was zu über 99 Prozent der Fall ist.

Hier bieten sich nun durch Vergleich mit paläomagnetischen Profilen neuartige Datierungsmöglichkeiten an. Für die DDR zeichnet sich zum Beispiel ein zukünftiger Einsatz dieser Methode in den fossilarmen Ablagerungen des Permokarbons und der Trias ab. Aber auch zur Altersbestimmung der noch viel jüngeren Eiszeitsedimente könnte sie dienen.

Nicht weniger wichtig ist die Verwendung des Paläomagnetismus der Gesteine zum Nachweis erdgeschichtlicher Polwanderungen und der Kontinentalverschiebung selbst. Für alle Kontinente wurden bereits auf dieser Methode fußende Fahrpläne der Vergangenheit aufgestellt, die oft bis weit in das Paläozoikum zurückreichen. Vergleicht man die Zugbahnen einzelner Kontinente miteinander, dann läßt sich für benachbarte Großschollen erstaunlich häufig erkennen, daß ihre Bewegungsspuren auf dem Globus mit zunehmendem Älterwerden der Daten voneinander abweichen. Neben der „echten“ Polverlagerung spiegelt sich hierin die relative Eigenbewegung der Kontinente deutlich wider.

Verschiebungsbeträge von 10 bis 20° oder von 1 000 bis 2 000 km sind in Zeiträumen um 100 Millionen Jahre durchaus üblich; nicht selten vollziehen sich noch schnellere Bewegungen. Zum Beispiel wurde nach dieser Methode das Paläogradnetz der DDR für die verschiedensten Formationen der geologischen Entwicklungsgeschichte rekonstruiert. Dabei ergeben sich allein für die aufeinanderfolgenden Formationen von Perm und Trias Breitenänderungen um etwa 20° bei einer insgesamt früher viel äquatornäheren Lage unseres Territoriums. Mit anderen Worten, die beginnende Nordwanderung unseres Gebiets, die bis zur Gegenwart auch bestimmender Fahrplan für fast ganz Europa war, zeichnet sich durch die schrittweise Verlagerung aus tropischen über die nördlichen subtropischen bis in die heutigen gemäßigten Breiten ab.

1961 wurden erstmalig magnetische Anomalien auf submarinen Schwellen beschrieben. Schon 1963 erkannte man ihre Entstehung durch Spalteneruptionen. Als Paradebeispiel wird seit Jahren hierzu



*Mutmaßliche Verlagerung des Nordpols der Erde während der letzten 600 Millionen Jahre
Zahlen 100 bis 600 = ungefähre Position vor Millionen Jahren*

besonders gern ein gründlich magnetisch vermessenes, etwa 100 000 km² großes Teilstück des nordatlantischen, mittelozeanischen Rückens vor der Küste Islands vorgeführt. Diese als Reykjanes-Rücken bezeichnete Längsschwelle des Atlantiks weist die typischen Konturen aller derartigen innerozeanischen Schwellen auf. Danach senkt sich im Mittelabschnitt solcher Schwellenprofile meist ein manchmal bis 20 km breiter und 1 bis 2 km tiefer Zentralgraben ein. Dieser Graben enthält zahlreiche, sich wiederholt öffnende Spalten. Er wird daher als Riß-

wunde verstanden, in der das heiße Magma aufsteigt und dann erstarrt.

Der Vorgang vollzieht sich über Jahrmillionen als Wechselspiel der kontinuierlich bis etappenweise aufreißenden und auseinanderwandernden Grabenflanken und der mehr oder weniger raschen und pulsierenden Auffüllung durch nachdrängende magmatische Massen. Unterdessen kehrt sich das erdmagnetische Feld mehr als einmal um. Kurz vor dem Erstarren der Lava aber regelt sich jeweils ein Teil der Magnetitkörnchen, die zu den Fröhkristallisaten, den zuerst erstarrenden Mineralkörnern der Schmelze, gehören, entsprechend den gegebenen geomagnetischen Feldbedingungen in die Nord-Süd-Richtung ein und fixiert somit die normale oder die inverse Lage der magnetischen Pole während dieser Phase.

Auf dem Reykjanes-Rücken ließ sich aus der Summe der gemessenen Umpolungsstreifen nachweisen, daß magmatische Gesteine des Meeresbodens, die heute symmetrisch zum Zentralgraben schon rund 200 km voneinander entfernt liegen, sich vor etwa 10 Millionen Jahren noch in enger Nachbarschaft befanden und den Boden des Zentralgrabens ausfüllten.

100 km seitliches Abwandern oder Öffnen der Spalte in 10 Millionen Jahren ergibt umgerechnet 1 cm im Jahr. Das ist nur eine „Personenzuggeschwindigkeit“ in der Plattentektonik, zwar typisch für den Atlantik, aber sehr langsam, verglichen mit den Öffnungsgeschwindigkeiten der südpazifischen Spalte, die das Zehnfache erreicht und zu den gegenwärtig schnellsten Dehnungsherden der ozeanischen Kruste gehört.

Wer sich übrigens an der etwas unregelmäßigen Gestalt der magnetischen Streifen am Beispiel des Reykjanes-Rücken stört, muß sich vom Geologen sagen lassen, verwunderlich sei eher, daß die zentrale Spalte in solcher für Tektoniker erstaunlichen Lagetreue immer wieder aufgerissen ist und daß nicht zahlreiche Nebenbrüche sowie seitlich ausfließende Lava das Bild noch viel mehr verwischt haben.

Schon sehr bald nach dem Bekanntwerden der ersten Streifenanomalien war man zu der entscheidenden Erkenntnis gekommen, daß sich nicht nur an einigen wenigen Punkten der Ozeane eine solche Krustendehnung vollzog, sondern daß ein weltweites Netz von Reißnähten existiert. Nach einer modernen Reliefvermessung der Ozeanböden mittels neuer Echolotverfahren ließ sich bereits gegen Ende der fünfziger Jahre nachweisen, daß jener Typ einer zentralozeanischen Schwelle, wie ihn zuerst — allerdings nur in groben Zügen — das

deutsche Forschungsschiff „Meteor“ zwischen 1925 und 1927 für den Atlantik erfaßt hatte, in den anderen Ozeanen ebenfalls auftrat, wenn auch dort oft nicht in so ausgeprägter Mittellage wie im Atlantik.

Heute ist dieses ozeanische Schwellennetz der Erde auf mehr als 80 000 km Länge bekannt und in zahlreichen submarinen Reliefkarten veranschaulicht worden. Wie gerade aus solchen Darstellungen deutlich hervorgeht, bildet das neue charakteristische Element aber nicht die Schwellemnatur dieser ozeanischen Gürtel, sondern das zentrale Spaltensystem auf seinem Scheitel, weshalb sich in der internationalen Fachsprache die Bezeichnung World rift system (engl. world = Welt, rift = Spalt), also Weltspalten- oder -rißsystem, eingebürgert hat.

Als letzte der wesentlichen wissenschaftlichen Vorleistungen zur neuen Theorie ozeanischer Krustenausdehnung sei hier die Entdeckung angeführt, daß die Gesteine der Ozeanböden fast ausschließlich jugendliches Alter besitzen. Eine gegenüber der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts verbesserte Bohrtechnik gestattet es heute, vom Schiff aus auch im Schnellverfahren einige Meter lange Bohrkerne aus dem Meeresboden zu ziehen und zu bergen. Was dabei zunächst herauskam, hatte man vor zwei Jahrzehnten nicht erwartet: Kein einziges Mal wurde im tieferen Ozean jenseits der Schelfe etwas Älteres als Jura erfaßt. Und selbst dieser Jura war nur noch in stark reduzierten Flächen und nicht mehr allzu küstenfern vorhanden. Reichlich die Hälfte des Meeresbodens nehmen tertiäre oder gar jüngere magmatische Gesteine und Sedimente ein.

Durch verschiedene Bohrprofilreihen ließ sich ebenfalls das von der Theorie geforderte Älterwerden der Ablagerungen mit wachsendem Abstand vom zentralen Graben der submarinen Schwellen belegen. Doch es gibt auch Ausnahmen. Beispielsweise kommen 80 Millionen Jahre alte Gesteine im Mittelatlantik noch in so großer Nähe vom zentralen Spaltensystem vor, wie es eigentlich hier nur für viel jüngere, etwa 20 Millionen Jahre alte Gesteine der Fall sein dürfte.

Eine gewisse Erklärung dafür wurde bereits gefunden. Zu den Kennzeichen des subozeanischen Spaltensystems gehört nämlich seine häufige Zergliederung durch Horizontal- oder Seitenverschiebungen, die wir in allen Ozeanen antreffen. An diesen Bruchlinien ließen sich nicht selten Verschiebungsbeträge von mehr als 100 km, ja bis etwa 500 km beobachten.

Gebirge als Zeugen des Zusammenstoßes von Krustenplatten

Sollen Figur und Größe der Erde von den plattentektonischen Bewegungen einigermaßen unberührt bleiben, dann muß es für die von den Flanken des Spaltensystems abwandernden ozeanischen Massen irgendwo ein anderes Ufer geben, an dem die einseitige Bewegung durch Abtauchen ihr Ende finden kann. Diese Gegenfront der driftenden Platten wird als Verschluckungszone bezeichnet. Grundsätzlich taucht an den Plattengrenzen bei Zusammenstößen mindestens eine der beiden aktiv wieder ab, und zwar in der Regel diejenige, welche einen höheren Anteil schwerer Gesteine aufweist.

Drei Grundtypen lithosphärischer Verformung lassen sich danach in den Verschluckungszonen der Drift unterscheiden:

1. Zwei ozeanische Krusten prallen zusammen. Verwirklicht ist das am Südwestrand des Pazifiks. Diese Fronten kennzeichnet das Entstehen vulkanischer Inselgürtel.
2. Eine ozeanische Krustenplatte prallt mit einer kontinentalen zusammen. Dies ist der Fall an der Nordwest- und der gesamten Ostbegrenzung des Pazifiks. So gehören die Ostküste Asiens und die Westküste Nord- und Südamerikas hierzu. Es entstehen Gebirge vom Typ der amerikanischen Kordilleren oder vulkanische, sehr aktive Inselketten, wie zum Beispiel die Kurilen.
3. Zwei kontinentale Krusten prallen zusammen. Dieser Vorgang vollzieht sich zur Zeit an der Plattengrenze des indischen Subkontinents mit Asien. Es entstehen Hochgebirge und Hochländer.

Insgesamt ergibt sich daraus für die Lithosphäre der Erde ein System von etwa 10 Platten mit allerdings sehr unterschiedlichen Aktivitäten an ihren Rändern in der Gegenwart.

Die weiterentwickelten Forschungen zur Plattentektonik erlauben es seit einiger Zeit, den Bauplan der vulkanischen Inselketten, aber auch der großen Gebirge in neuem Licht und mit neuem Verständnis zu sehen. Wählen wir als Beispiel die Ostgrenze der Sowjetunion am Rand der Eurasienscholle zur pazifischen.

Deutlich läßt sich hier im Profilschnitt vom Amur über Sachalin und die Kurilen bis zum Ostpazifik das Ausdünnen des leichten, granitischen Sials vom Kontinent her erkennen. Nach dem Alter ihrer Vulkanite (Ergußgesteine) und nach ihrer Randlage zum Kontinent werden der japanische Inselbogen einschließlich Sachalin als alte, die meerwärts vorgelagerten Kurilen aber als junge Inselbögen bezeichnet.

Besondere Beachtung verdient die genau bestimmte Lage der Erd-

bebenherde unter aktiven Plattengrenzen. Systematisch verschieben sich hier zum Beispiel unter den Kurilen mit zunehmender Tiefe die Bebenherde nach Westen beziehungsweise Nordwesten. Wir müssen das wohl als ein schräges, nach Nordwesten gerichtetes Abtauchen der pazifischen Platte unter die Asiens verstehen, und es stimmt in den Grundzügen auch mit dem der südlicheren Plattengrenze überein.

Aber noch eine andere wichtige Erkenntnis konnten sowjetische Geophysiker aus der Lage der Kurilenbebenherde ableiten. Diese verteilen sich nicht etwa gleichmäßig auf den steil in die Tiefe führenden, rund 500 km mächtigen Lithosphärenverband unter ihnen, sondern treten flözartig in bestimmten Tiefen gehäuft auf. Mindestens 4 besonders bebenaktive Zonen von durchschnittlich 50 bis 100 km Dicke ließen sich erkennen. Man glaubt neuerdings, dies mit dem fortschreitenden Zerbrechen der abtauchenden pazifischen Platte in Verbindung bringen zu dürfen, die sich zur Tiefe hin in Teilstücke aufzulösen beginnt, wobei sich heißere und schon fließfähige Mantelmagmen, aus denen keine Beben mehr erfolgen können, dazwischen schieben.

Vergleichen wir diesen interessanten Profilschnitt mit weiteren entlang der südlicheren Küstenbereiche des östlichen Pazifischen Ozeans, so wird deutlich, in welchen Dimensionen sich das Kurilenbeispiel verallgemeinern läßt. Zunächst einmal müssen wir feststellen, daß die auf die Erdoberfläche übertragenen Bebenherde nicht etwa ausschließlich unter den vulkanischen Inseln liegen. Vielmehr sind sie, wie die Bebenherdkarten der Randgebiete des Pazifischen Ozeans es allenthalben ausweisen, schon ab etwa 200 bis 300 km östlicher Entfernung von den Inselbögen recht häufig, dort aber fast nur als Flachbeben unter 50 km Tiefe. Das Magma der Kurilenvulkane selbst soll hauptsächlich aus 50 bis 100 km Tiefe stammen, wo auch die ersten stärkeren Auflösungserscheinungen der abtauchenden pazifischen Platte angenommen werden. Doch zu Einzelheiten dieser Vorgänge sind nach wie vor noch viele Fragen offen.

Der rund 1 000 km lange Inselbogen der Kurilen weist heute über 20 aktive Vulkane auf. Zusammen mit seiner direkten Nordfortsetzung auf Kamtschatka sind es sogar über 50. Verglichen mit der Gesamterde dürfen wir dies als eine hohe Konzentration ansehen; denn die Wissenschaft kennt insgesamt nur etwa 500 in historischer Zeit tätig gewesene Vulkane. Die Dunkelziffer der unterhalb des Meeresspiegels aktiven Vulkane wurde dabei allerdings nicht mitgerechnet.

Die Grenze zu den Erlöschenen läßt sich schwer ziehen, weil es viele Übergangsformen gibt, die zeitweilig nur noch heiße Gase ausstoßen.

Zählen wir einmal alle Bergformen des 2000 km langen Kurilen-Kamtschatka-Bogens zusammen, deren vulkanischer Ursprung außer Zweifel steht, so kommen wir auf mindestens 225. Ein so hohes Überwiegen der erloschenen Formen ist in den großen Vulkangebieten der Erde durchaus nichts Ungewöhnliches.

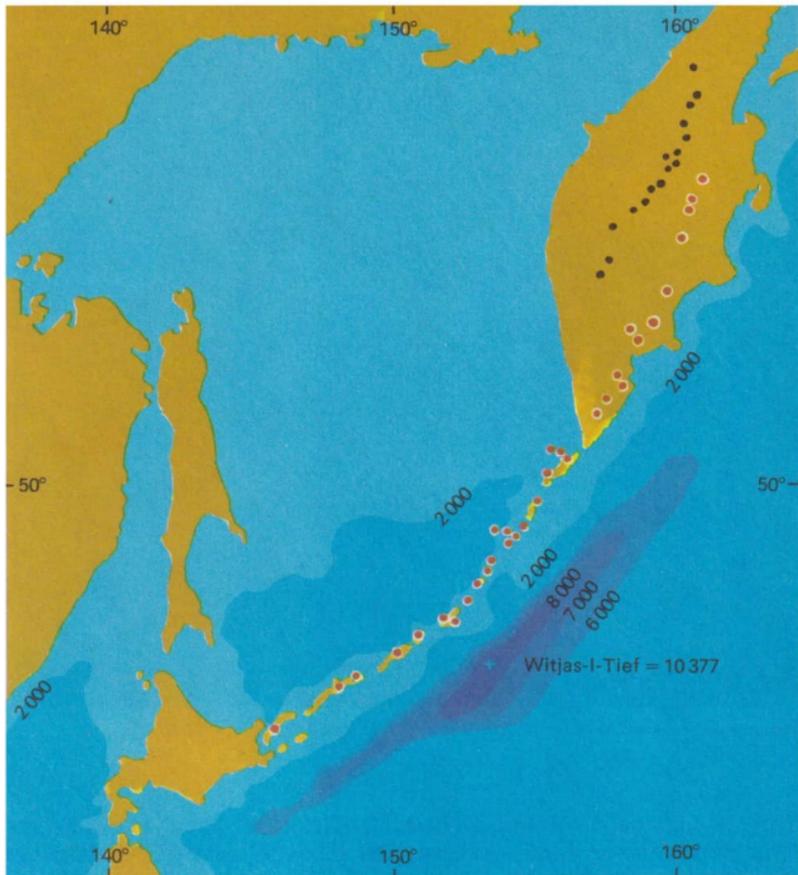
Wenn die magmatische Zufuhr aus der Tiefe über Jahrmillionen anhält, so daß viel vulkanisches Gestein nebst Sediment daraus entsteht, dann wachsen die Vulkaninseln im Lauf der Zeit zu längeren Gebirgsketten zusammen, und solche schon recht ansehnlichen Landmassen werden schließlich mehr und mehr, nicht selten über Landbrücken, dem Nachbarkontinent eingegliedert. Kamtschatka liefert ein gutes Anschauungsobjekt dafür. Verglichen mit den Kurilen, stellt diese größere Landmasse in gewissem Sinn nur ein fortgeschrittenes Stadium des Inselbogenvulkanismus dar. Die Halbinsel besteht nämlich eigentlich aus zwei Vulkanreihen, wovon die kontinentwärtige, also näher zum Ochotskischen Meer gelegene und Sredinnygebirge genannte, gegenüber der pazifischen um rund 200 km nach Norden versetzt beginnt und durch ein breites Längstal von ihr getrennt wird. Etwa 30 zum Teil sehr kräftige Vulkanmassive gehören dieser Nordostkette an, doch fast alle gelten als erloschen. Der Vulkanismus scheint hier seinen Höhepunkt schon überschritten zu haben.

Der Verdacht liegt nahe, daß es sich in diesem Fall um ein den Geologen anderenorts auch ohne Vulkanismus wohlbekanntes sogenanntes Anbauprinzip handelt, das junge Gebirge immer größer werden läßt.

Ein Schnitt durch die seit Jahrzehnten gut erforschten jungen Faltengebirge der Erde, wie die Alpen, die Kordilleren oder den Karpatenbogen, zeigt neben einer allgemeinen Verjüngung der Schichtfolgen von innen nach außen auch eine solche Altersfolge der Verfaltungs- oder Anfaltungsvorgänge. Ein Faltenkettengebirge wächst also mit zunehmendem Alter zusehends in die Breite. Dabei werden – wie es scheint, nicht ganz kontinuierlich, sondern eher etappenweise – immer neue Vorlandmassen dem Gebirge einverleibt.

Je nachdem, ob an den Kollisionsfronten, den zusammenstoßenden Plattengrenzen, der Lithosphäre kontinentale oder ozeanische Krustenelemente aufeinandertreffen, kommt es zu verschiedenen Abtauchvorgängen der ausweichenden Plattenränder, und das wirkt sich auch auf die dabei erzeugten Gebirgsformen oder Vulkanketten an der Erdoberfläche aus.

Gehen wir zunächst vom Typ des Zusammenpralls von Kontinenten



Meeresbodenrelief und Verbreitung der aktiven Vulkane im Kurilen-Kamtschatka-Vulkanbogen

- Tiefenbereiche des Meeresbodens
- aktive Vulkane
- bereits erloschene Vulkane des Sredinnygebirges auf Kamtschatka

aus. Er führt an seiner Stirnfront zur Entstehung des höchsten Gebirges der Erde. Zwingend, wie wir jetzt wissen, säumt die Kette der Achtausender den Himalaja, schließt sich nach Nordnordosten Tibet als die



Indiens Lage heute (oben) und vor etwa 50 Millionen Jahren (unten)

höchste und geschlossenste Hochlandfläche der Erde an. Die Plattentektonik vermag das zu erklären. Das schnelle Indien hat nach neuen Berechnungen in den letzten 100 Millionen Jahren, von Süden kommend, etwa 5000 km Weg zurückgelegt; das sind 5 cm im Jahr, eine Geschwindigkeit übrigens, die der Subkontinent noch heute besitzen soll. Beim Unterfahren der Eurasienscholle im Norden aber konnte die Platte Indiens nicht die uns nun schon von den Kurilen her bekannte und von anderen Plattenrändern geläufige starke Abbiegung in die Tiefe zustande bringen; dafür war sie viel zu leicht. Die Unterfahrung wurde

Verfaltete Gesteinsschichten der südlichen Anden, eines jungen Gebirges am Ostrand der pazifischen Platte



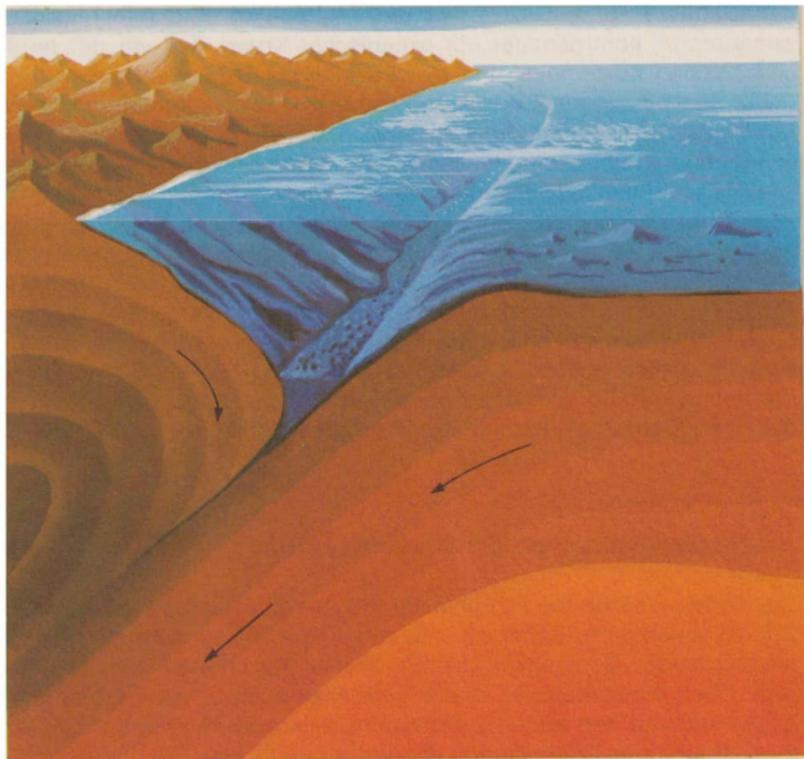
zwar fortgesetzt, aber die reichlich vorhandenen kontinentalen sialischen Massen drängten hinter der Kollisionsfront wieder nach oben und verliehen dem zentralasiatischen Block doppelte Auftriebskraft. Eine angehobene Scholle, das Hochland von Tibet, mußte entstehen. Die Hubleistung dieser Unterfahrung läßt sich noch weiter nach Norden bis über die Mongolei hinaus verfolgen, und an den Rändern dieser lithosphärischen Verdopplung zeigen sich die Zerrbewegungen eines kolossalen Unterschubs durch zahllose von Erdbebenherden begleitete Tiefenbrüche und Horizontalverschiebungen an.

Entlang der Südgrenze der Sowjetunion von Samarkand, Taschkent, Alma-Ata bis hin zum Baikäl reicht diese durch ihre Bodenunruhe auch in der jüngsten Vergangenheit zur Genüge gekennzeichnete innerkontinentale gestörte Zone. Gleichwertiges an Bewegungsintensität findet sich in unseren Tagen, wie wir schon gesehen haben, eigentlich nur noch vor der pazifischen Küste Nordamerikas.

Im Zusammenhang mit diesen Gesetzmäßigkeiten der plattentektonischen Unterfahrung Zentralasiens erscheint nunmehr auch die Lage des Baikalsees den Geologen verständlicher. Der See füllt einen etwa 800 km langen Grabenbruch, der sich beim Zerreißen der innerkontinentalen Kruste vor der Zungenspitze der untergetauchten indischen Schubmasse ausgebildet hat.

Stellt das Beispiel Indien – Asien, also eine Kontinent – Kontinentkollision ohne steiles Abtauchen der Platten und in dieser Intensität, im Weltmaßstab heute praktisch etwas Einmaliges dar, so kann der gegenteilige Fall mit starkem und schnellem Abbiegen ozeanischer Lithosphäreinheiten öfter registriert werden. Dazu zählen die Kollisionsfronten je zweier ozeanischer Krusten, wie wir sie zum Beispiel von den Tonga-Inseln bis nach Neuseelandreichend aus dem Südpazifik kennen.

Ein ähnlich steiles und schnelles Abtauchen ozeanischer Lithosphärenmassen vollzieht sich gegenwärtig vor der chilenisch-peruanischen Küste, ferner vor den Sundainseln, am Ostrand der Philippinen und vor den Marianen, im letzten Fall auch flankiert von einem der tiefsten Ozeangraben, die man bisher vermessen hat. Über 11 km Meerestiefe wurden am Süden des Marianengrabens gefunden, und er zieht sich nach Norden noch an Japan und den Kurilen vorbei bis vor die Küste Kamtschatkas. Das sind 5 000 km! Tiefseerinnen dieser Art gehören zu den ständigen Begleitern der Kollisionsfronten ozeanischer Krusten. Ihr Auftreten ist gesetzmäßig mit dem Abtauchen der jeweiligen ozeanischen Platte verbunden. Wenn dieser Vorgang nämlich schnell erfolgt, dann vermögen die Gesetze, die das Schwimm-



Der Zusammenstoß zweier Platten und ihr Abtauchen erzeugen einen Tiefseegraben.

 Gestein der Krustenplatten

 Magma des Erdmantels

gleichgewicht wiederherstellen, nicht mehr voll zur Geltung zu kommen.

Je aktiver die Bewegung, desto tiefer kann der Ozeanboden mit verschleppt werden, und die auftretenden Geschwindigkeiten scheinen hier am Westrand des Pazifiks nicht allzu stark voneinander abzuweichen. Daher nehmen sich die maximalen Meerestiefen in den verschiedenen Tiefseerinnen vor den schnellen Steilabbiegern im allgemeinen nicht sehr viel. Zum Beispiel wurden 10882 m im Tongagra-

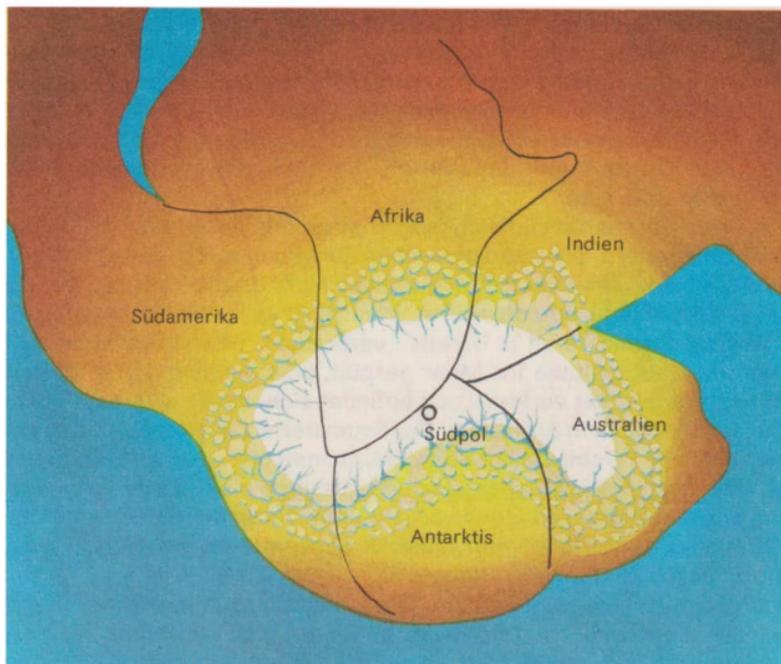
ben gemessen und 10475 m vor den Philippinen, und selbst der Zusammenprall kontinentaler mit ozeanischer Kruste ließ vor der nordchilenischen Küste noch eine Tiefseerinne bis 8025 m entstehen.

Mit den bisherigen Beispielen lernten wir sozusagen die extremen Kollisionstypen kennen. Die Kollisionsfronten vom „Rest der Welt“ weisen demgegenüber keine wesentlichen neuen Merkmale auf, sondern sind als sehr ähnliche Beispiele oder als Zwischenformen zum bisher Erläuterten zu betrachten. Dort, wo der Abtauchvorgang nur schleppend verläuft oder wo er erst vor noch nicht allzu langer Zeit begonnen hat, fehlen charakteristischerweise die Bebenherde größerer Tiefenlage. Auch das Kurilenbeispiel mit seiner flözartigen Verteilung der Bebenherde wiederholt sich unter den chilenisch-argentinischen Anden. Hier ist örtlich ebenso, wie es sich durch das Fehlen der mittleren Tiefbeben im Andengürtel zwischen 25 und 30° Süd zeigt, eine Auflösung der sinkenden Lithosphärenplatte in größere Teilstücke zu belegen.

Krustenbewegung vor 200 Millionen Jahren

Der plattentektonische Fahrplan der Kruste war vor allem für die letzten 200 Millionen Jahre Erdgeschichte relativ gut zu rekonstruieren – mit nachlassender Genauigkeit zu den älteren Abschnitten hin, versteht sich. Doch versuchen wir, diese Rückschau noch zu verlängern, dann ergibt sich mit den ersten Schritten ins Paläozoikum – in die Zeit vor der Öffnung des Atlantiks und des Indischen Ozeans – auf einmal ein größerer Sprung zur Ungenauigkeit. Woran liegt das? Vielleicht sind wir hier an den Ausgangspunkt einer Stiländerung der Krustenbewegung gekommen?

Zieht man Bilanz über den Charakter des Bewegungsstils der Kruste in den letzten 200 Millionen Jahren, so ist als vorherrschende Auswirkung für die Kontinente das Überwiegen von auseinandergehenden Bewegungen zu verzeichnen. Gondwanaland zerfiel in fünf Teilkontinente, und zusätzlich wanderte noch die große nordamerikanische Landmasse einschließlich Grönlands von Eurasien ab. Kein Wunder also, daß das Zurückverfolgen dieser Bewegungsabläufe zu einem entgegengesetzten Verteilungsbild der Kontinente, also ihrer stärkeren Konzentration auf engerem Raum, führen muß. Wir sind unversehens wieder bei Wegeners Pangea angelangt, dieser einheitlichen, zusammenhängenden Landmasse. Und tatsächlich glaubten Anfang der sechziger



*Gondwanakontinent und sein Vereisungsgebiet
Weiß = ungefähre Eisausbreitung vor rund 200 Millionen Jahren*

Jahre einige Verfechter der damals noch sehr jungen Theorie zur Ausbreitung ozeanischer Krusten, mit ihr nur den wahren Schlüssel zum Zerfall Pangeas gefunden zu haben. Heute ist man mit einer solchen Auslegung jedoch vorsichtiger geworden.

Auf der einen Seite läßt sich die Existenz eines ehemaligen Superkontinents vom Typ Gondwanas nicht mehr leugnen. Andererseits aber zeichnet sich immer deutlicher ab, daß zur Zeit Gondwanas der Abstand dieses riesigen Südkontinents von den vermutlich doch weniger einheitlichen Landmassen der Nordhälfte unseres Planeten erheblich größer war als gegenwärtig. Dies verraten Meeressedimente, die uns gerade aus jenem Zwischengebiet im heutigen großen Gebirgsgürtel der Erde erhalten geblieben sind, der, von West nach Ost ziehend, die

Ketten des Atlas Nordafrikas und der Alpen mit den jungen Faltengebirgen Südostasiens verbindet. Geologen haben daraus die berühmte Tethys rekonstruiert, einen vor allem das Mesozoikum bestimmenden riesigen Meeresarm am Nordrand Gondwanas, der nach der Gemahlin des griechischen Gottes Okeanos benannt wurde und von dem heute nur noch Reste, wie das Mittelmeer und das Kaspische Meer, übriggeblieben sind.

Können aber nicht vielleicht sogar ganze ehemalige Kontinente den Kollisionsfronten plattentektonischer Bewegungsabläufe zum Opfer gefallen sein? Zeigt das Beispiel Indiens nicht deutlich genug, wie das geschieht? Mindestens die Hälfte, wenn nicht viel mehr der ehemaligen indischen Sialmasse ist ja bereits „verbraucht“: Entweder wurde sie über die Gebirgsflüsse ins Meer gespült, oder sie ging durch flächenhafte Unterfahrung verloren und befindet sich unter der Kruste Tibets und der Mongolei in Auflösung. Das Baumaterial der Himalajafont, also der randlichen Gebirgsmassive selbst, stammt nicht von Asien, sondern hat sich nach Sedimentcharakter und Fossilien als stark verschobener und verquetschter Teil Gondwanas identifizieren lassen. Es wäre also falsch, sich vorzustellen, der indische Subkontinent unterfahre so gut wie unbeschädigt die Eurasienplatte.

Global gesehen, zeigt sich die Plattentektonik letztlich eher sialfeindlich als sialfreundlich. Das heißt, es lassen sich viel mehr Prozesse nachweisen und beobachten, in deren Verlauf kontinentale Flächen reduziert werden oder verlorengehen, als umgekehrt. Dort, wo sich das Sial angestaut hat, in den Gebirgszonen der Erde, sorgt zudem die beschleunigte Abtragsrate für baldigste Wiederauflösung dieser Konzentrationen. Was spricht also dagegen, anzunehmen, daß im Paläozoikum, und noch deutlicher in älteren Erdperioden, der Flächenanteil der sialischen Kruste den gegenwärtigen weit übertraf? Eigentlich nichts! Zumindest hat eine derartige Fragestellung nach unserem heutigen Wissen durchaus ihre Berechtigung. Läge aber auch nur ein Körnchen Wahrheit darin, wäre ein solcher Ablauf der Erdgeschichte für den vermutlichen Urzustand der Kruste folgeschwer. Wir stehen hier wieder vor grundsätzlichen Problemen der kosmischen Geologie.

Die Auffassung vom Sialverlust bei plattentektonischen Bewegungen, abgeleitet aus dem Krustenfahrplan der letzten 200 Millionen Jahre, führt nämlich zu der Frage: Wäre eine nur aus Sial oder, vorsichtiger formuliert, zunächst nur aus einer Schicht aufgebaute Urkruste der Erde vielleicht der wahre Ausgangszustand der Globaltektonik?

Für die beiden logisch anschließenden Fragen nach der Herkunft

dieser Urkruste sowie nach der Art des Starts der Plattentektonik gibt es bereits Teilantworten beziehungsweise Denkansätze.

Zu unseren leider nur hypothetischen Vorstellungen über das Anfangsstadium der Plattentektonik auf der Erde kann der Planet Mars ein anschauliches kosmisches Beispiel liefern. An seiner Oberfläche scheint vor Jahrmilliarden ein erster Startversuch zu plattentektonischer Krustenentwicklung infolge der Kleinheit des Planeten und damit zu geringer thermischer Reserven rasch steckengeblieben zu sein, aber gerade deshalb hat er sich, sozusagen eingefroren, für uns optisch sehr einprägsam und auswertbar erhalten. Diesem Beispiel werden wir seiner Bedeutung wegen einen selbständigen Abschnitt widmen.

Auch auf die Frage nach der Herkunft der sial- bis simaverwandten Substanzen liegen Antworten aus dem kosmisch-geologischen Bereich vor. Sie haben jedoch einen viel hypothetischeren Charakter als die Beispiele vom Mars zur anfänglichen Plattentektonik. Den meisten dieser kosmischen Konzeptionen zur Begründung der relativ großen Häufigkeit leichter Elemente in den oberflächennahen Schichten der Erde ist gemeinsam, daß sie darin nicht – oder zumindest nicht nur – eine Wirkung magmatischer Entmischung sehen, sondern eine primäre Anlage, welche die Erde „von Geburt an“ mitbekommen hat. Stark vereinfacht läßt sich sagen, daß die Verbindungen der leichten Elemente zur Zeit der Entstehung des Planetensystems am längsten in der Gasphase verblieben, ehe sie sich mit zunehmender Abkühlung durch Kondensation auf den Planetenoberflächen anzusiedeln vermochten.

Kontinentalverschiebungen morgen und übermorgen

Werfen wir zum Abschluß des Themas „neue Globaltektonik“ noch einen Blick auf den Krustenfahrplan von morgen. „Morgen“ heißt hier die nächsten 10 bis 50 Millionen Jahre. Nach Erfahrungswerten rechnen wir der Einfachheit halber mit Geschwindigkeiten der Platten zwischen 1 und 10 cm im Jahr. Bei einer mittelschnellen Verschiebung von etwa 5 cm jährlich ergibt das den Versatz einer beliebigen Scholle um 500 km, das heißt etwa eine DDR-Länge, in rund 10 Millionen Jahren. Und noch eine Vereinfachung erlauben wir uns: Wir tun so, als ließe sich die Verschiebungstendenz der letzten 50 Millionen Jahre unverändert in die gleiche Zeitspanne der Zukunft übertragen, obwohl wir Grund genug haben, auch Geschwindigkeitsänderungen anzunehmen. Aber

wo und wann sie eintreten werden, können wir heute doch noch nicht zuverlässig genug angeben.

Mit Europa die Vorhersage eröffnen heißt eigentlich fast mit dem Schwersten beginnen. Insgesamt sollte sich diese „Halbinsel Asiens“ innerhalb der nächsten 50 Millionen Jahre aller Voraussicht nach um durchschnittlich 10° nach Norden verlagern. Weil Afrika von Süden heranrückt, ist anzunehmen, daß im Süden Europas auch die einschneidendsten Veränderungen erfolgen. Spätestens am Ende unseres Prognosezeitraums sollte sich die Verschweißung Italiens mit den Faltenketten Jugoslawiens vollzogen haben. Der adriatische Meeresarm wird also allmählich ausgequetscht.

Dem Verschwinden der Adria steht die zu erwartende Erweiterung des jungen Einbruchbeckens der Ägäis gegenüber. Eine Fortsetzung des Grabenbruchs vom Roten Meer nach Norden müßte zur Folge haben, daß die Hauptentwicklungstendenz für den Vorderen Orient durch einen Vormarsch des Meers charakterisiert wird. Vielleicht zerfällt ein Teil Kleinasiens bald zu einer neuen Inselwelt.

Das Rote Meer und die ostafrikanischen Gräben bildeten im letzten Jahrzehnt eines der beliebtesten Studien- und Testobjekte für die Forschungen zur neuen Globaltektonik. Man sieht heute im Roten Meer einen sich öffnenden Riesenspalt der Kruste, der eventuell den Anfangszustand eines werdenden Ozeans widerspiegelt. So etwa könnte sich die Entstehung des Atlantiks vor rund 200 Millionen Jahren abgespielt haben.

Das jetzt teilweise bereits 300 bis 400 km breite Rote Meer hat sich schon seit dem frühen Tertiär, also vor über 50 Millionen Jahren, zu öffnen begonnen. Dies geschah aber nach neueren Forschungsergebnissen nicht gleichmäßig, sondern mit Unterbrechungen, wobei Bewegungspausen von einigen Millionen Jahren Dauer sogar wiederholteingetreten sein sollen. In den nächsten 50 Millionen Jahren könnte sich die Breite des Roten Meers durchaus verdoppeln.

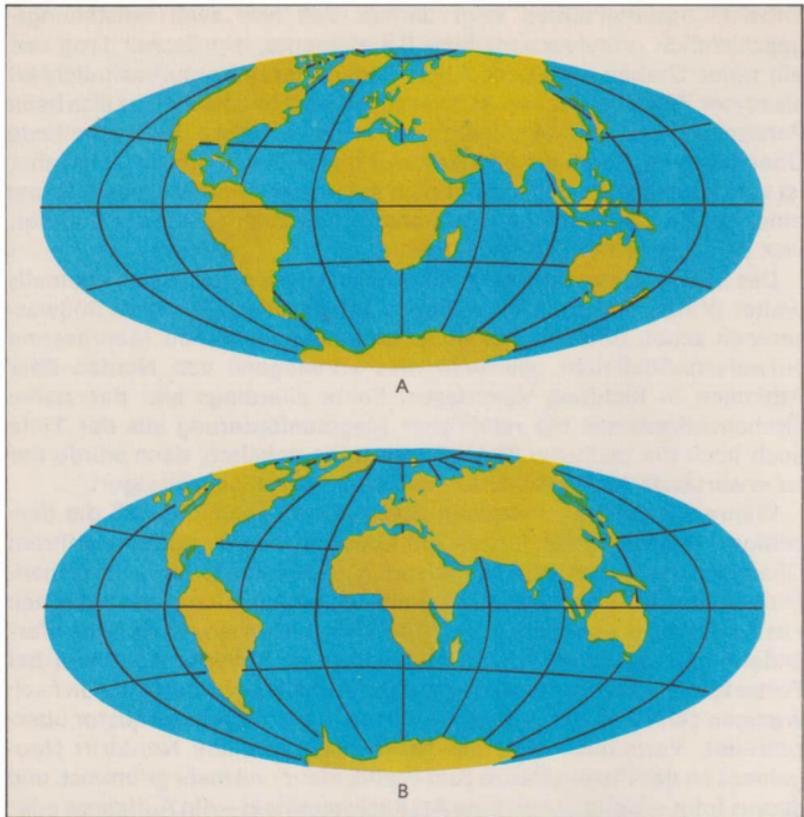
Öffnet sich hier tatsächlich ein junger ozeanischer Spalt unter seitlicher Abwanderung kontinentaler Massen, so würde vermutlich als Parallele zum Abtauchen Indiens unter die Platte Eurasiens auch der Nordosten der Arabischen Halbinsel mehr und mehr unter den Gebirgsketten des Iran verschwinden. Der Persische Golf müßte schon in den nächsten 10 Millionen Jahren austrocknen. Seine Fortsetzung zum Indischen Ozean im Golf von Oman würde aber wahrscheinlich die gegenteilige Entwicklungsrichtung einschlagen und sich in den kommenden Jahrmillionen verbreitern und vertiefen. Dieser auffällige

Entwicklungsunterschied folgt daraus, daß hier zwei entstehungsgeschichtlich grundverschiedene Bauelemente, ein flacher Trog und ein tiefer Graben, eng benachbart liegen, deren Konturenähnlichkeit als reiner Zufall anzusehen ist. Wie schon erwähnt, handelt es sich beim Persischen Golf um eine echte Vorsenke — daher die beginnende Überwältigung durch die Randketten des Iran. Der Golf von Oman aber ist vom Bauplan her ein Grabenbruch mit viel größerer Meerestiefe und einer deutlich aufgestemmtten Grabenflanke auch an seinem Südufer, was dem Persischen Golf völlig fehlt.

Das Spaltensystem der ostafrikanischen Gräben dürfte sich ebenfalls weiter öffnen und nach 10 Millionen Jahren oder mehr statt Süßwasserseen schon tiefer in das Kontinentinnere reichende Meeresarme aufweisen. Vielleicht geschieht dies vorwiegend von Norden über Äthiopien in Richtung Viktoriasee. Sollte allerdings hier der starke Grabenvulkanismus mit reichlicher Magmenförderung aus der Tiefe auch noch die nächsten 50 Millionen Jahre anhalten, dann würde der zu erwartende Meereseinbruch eventuell weit hinausgezögert.

Während man vom indischen Subkontinent annimmt, daß die derzeitigen Bewegungstendenzen mit Unterfahrung Zentralasiens ihrem Charakter nach wohl die kommenden 50 Millionen Jahre bestehenbleiben werden — natürlich bei weiterer Schrumpfung der indischen Festlandsfläche — ergeben sich für Südostasien grundsätzliche Veränderungen. Es ist zu erwarten, daß der australische Kontinent bei Fortsetzung seiner gegenwärtigen sehr schnellen Norddrift schon nach wenigen zehn Millionen Jahren mit seinem Nordteil den Äquator überschreitet. Vermutlich wird die heute noch parallele Norddrift Neuguineas an der Plattengrenze zum Pazifik mehr und mehr gebremst, und daraus folgt — vielleicht als eine Art Rückstauereffekt — ein Auffahren oder Anschweißen der australischen kontinentalen Massen auf diese Insel. Der Abstand zum Komplex Südostasiens sollte sich dabei grundsätzlich verringern, so daß in den nächsten 50 Jahrmillionen mit einer geschlossenen Landverbindung von der Malaiischen Halbinsel über den dann wohl auch breiteren Gebirgsstrang der heutigen Sundainseln des indonesischen Archipels zur australischen Landmasse zu rechnen ist.

Die Öffnung des Atlantischen Ozeans dürfte sich im gleichen Zeitraum fast kontinuierlich im gewohnten Tempo mit etwa 1 bis 5 cm jährlich fortsetzen. Wesentliche neue Kontaktflächen ozeanischer und kontinentaler Krusten sind hier nicht zu erwarten. Da aber gegen die Westdrift der amerikanischen Platte die ozeanischen Lithosphärenmassen aus dem pazifischen Raum mit Ostdrift anströmen, wird es zu einer



Zukünftige Veränderung der Erdkruste

A = heutiger Zustand

B = Verteilung der Kontinente in 10 bis 50 Millionen Jahren

Grundsatzfrage des Bewegungsstils der Plattentektonik, wie sich die Kollisionsfront unter den Kordilleren auf die Dauer verhält. Zwei Lösungen scheinen heute möglich.

Entweder vollzieht sich die Öffnung des Atlantiks bei unveränderter Lage der Kollisionsfront zur pazifischen Platte und bei Schrumpfung der Landfläche der beiden amerikanischen Kontinentalmassen, die gleichsam unter ihre eigenen Gebirge untertauchen oder eingefahren wer-

den. Oder die Bewegung der amerikanischen Platte nach Westen führt zu einer echten Expansion dieser lithosphärischen Einheit mit Überführung eines entsprechenden Anteils der östlichen pazifischen Platte. Wir wissen eben immer noch nicht, wie veränderlich die Plattengrenzen sind, und zur globalen Bilanz aller Plattenverschiebungsbeträge liegen bekanntlich ja sogar entgegengesetzte Resultate vor.

Gäbe es keine Verschlusszonen für die sich ständig erneuernden ozeanischen Platten, dann müßte sich die Erde aufblähen. Der Erdradius müßte sich, sollte der Flächenzuwachs durch aufsteigendes Magma im ozeanischen Spaltensystem allein durch Ausdehnung des gesamten Erdkörpers ausgeglichen werden, seit dem Perm um mindestens 20 Prozent erweitert haben. Die daraus abzuleitenden geophysikalischen Konsequenzen lassen sich aber mit der beobachteten geologischen Wirklichkeit nicht in ausreichende Übereinstimmung bringen. Die wichtigsten Folgen wären fast ständiges Zurückweichen der Meere aus den im Perm noch viel stärker überfluteten Kontinentaltafeln, Auswirkungen der veränderten, an der Oberfläche allmählich schwächer werdenden Massenanziehung auf die Lebensfähigkeit der Großformen im Tier- und Pflanzenreich und Veränderungen der Rotation im Sinn einer spürbaren Abbremsung zur Gegenwart. Alle derartigen Diskussionen erübrigen sich aber, wenn sich bestätigen sollte, daß der seit 1968 nach paläomagnetischen Methoden bestimmte Erdradius zur Zeit des Devons, also vor rund 350 bis 400 Millionen Jahren, nur um 1 bis 2 Prozent vom gegenwärtigen abwich.

Nach alledem bleibt zugunsten des modernen tektonischen Konzepts festzuhalten, daß es wenigstens die Bewegungsrichtung der Platten erklären kann. Auf diesem Gebiet sind kaum noch prinzipielle Umdeutungen zu erwarten.

Heute hat die Forschung in erster Linie die Aufgabe, die Lücken in der Genauigkeit zu schließen, die weltweit sowohl in der detaillierten Erfassung des submarinen Reliefs als auch in der Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeiten noch bestehen. Denn auf alle Fragen nach dem geotektonischen Geschehen an der Erdoberfläche in Zeitmaßstäben von Jahrmilliarden gibt die Plattentektonik mit ihrem gegenwärtigen Kenntnisstand keine voll befriedigende Antwort. Hier wird ihre Schwäche offenkundig, die in der noch zu geringen Aussagekraft über die absoluten Beträge der Plattenwanderung mit zunehmendem Altersabstand von der gegenwärtigen Situation liegt. Dieses Problem scheint aber, wie wir gleich sehen werden, durch kosmisch-geologische Beiträge eines Tags lösbar zu sein.

Die Marskruste reißt auf

Daß sich die Vulkanriesen des Mars von 15 bis über 25 km Höhe nicht regellos über den Planeten verteilen, sondern sich in bestimmten tektonischen Gebieten beträchtlich konzentrieren, haben wir schon an anderer Stelle hervorgehoben. Jetzt, da uns die zahlreichen noch offenen Fragen nach der Struktur der irdischen Lithosphäre geläufiger geworden sind, lohnt es sich, die marstektonischen Verhältnisse zum Vergleich heranzuziehen. Einer der in dieser Hinsicht ergiebigsten und interessantesten Abschnitte unseres Nachbarplaneten ist jener 1972 entdeckte Großvulkankomplex der sogenannten Tharsis-Region, der sich einschließlich der dazugehörigen tektonischen Elemente in der Flächenausdehnung durchaus mit irdischen Kontinenten messen kann.

Kaum hatte sich der große Staubsturm Anfang 1972 gelegt, da zeigten einige Bodenaufnahmen der „Mariner“-Sonde neben den überraschenden Riesenvulkanen Bruchstrukturen, wie man sie zuvor noch nie von einem fremden Himmelskörper zu Gesicht bekommen hatte. In Äquatornähe des Mars erfaßte eines der aufschlußreichsten ersten Bilder einen gewaltigen Graben von fast 500 km Länge. Er erwies sich als 3 bis 4 km tief, etwa 80 bis 120 km breit und eigentlich aus zwei sich sehr spitzwinklig schneidenden Grabenästen zusammengesetzt. Einige dieser Grabenäste oder kleineren Nebengraben lösten sich — zur großen Freude der Mondforscher — zu einem System von Kettenkratern auf. Dies schien deshalb ein so glücklicher Fund zu sein, weil Kettenkrater oder Kraterketten auf dem Mond sehr häufig auftreten, ohne daß ihre Entstehung befriedigend erklärt werden konnte; unter anderem ebendeshalb, weil bisher solche auf die Entwicklung hinweisenden Übergänge nirgends zu beobachten waren. Übrigens wissen wir heute, daß Kraterketten auf dem Merkur ebenfalls nicht selten vorkommen.

Neben dieser Parallele zum Mond ergaben sich aber auch neuartige und — wie sich bald herausstellen sollte — sehr enge Beziehungen zur Erde. Am stärksten fielen zunächst jene erstmalig auf denselben Bildern gesichteten, cañonartigen Seitentäler und Schluchten auf, die an der Südflanke des oben erwähnten Grabens die stattliche Länge von mehr als 100 km erreichen. Verdanken diese Seitentäler die Kilometertiefe ihrer Einschnitte in erster Linie dem Wasser oder dem Wind, und wieweit sind ihre Hauptrichtungen tektonisch vorgezeichnet? Man mußte warten, bis wenigstens die ersten provisorischen Marskarten, hergestellt aus einem Fotomosaik solcher Satellitenaufnahmen, zur



Ausschnitt des Großgrabens auf dem Mars

Verfügung standen. Als sie dann vorlagen, ergaben sich nochmals unerwartete Zusammenhänge.

Das bisher betrachtete Grabenelement erwies sich als Teilstück eines Großgrabens von mindestens 5 000 km Länge. Der Verdacht, daß seine Nähe zum Vulkankomplex nicht zufällig sei, erhielt bald auch noch durch andere Befunde Nahrung. Ein System von leistenförmigen Spalten, Brüchen und kleineren schmalen Gräben wurde entdeckt. Ihre Länge betrug oft mehrere hundert Kilometer, ja über tausend Kilometer wurden ermittelt – und das bei meist nur wenigen Kilometern Breite. Insgesamt erstreckt sich dieses System in beinahe regelmäßiger,

strahlenförmiger Anordnung rund um den Komplex der Riesenvulkane fast über ein Viertel der Marsoberfläche. Auch das große Grabenelement der Tharsis-Region hat in seinem Hauptabschnitt diese Orientierung.

Als man schließlich noch die inzwischen bekannt gewordenen Relieffhöhen des Mars in diese Struktur einsetzte, ergaben sich weitere Zusammenhänge. Der Vulkankomplex bildet nämlich einschließlich der Umgebung des West- und Mittelabschnitts vom Großen Grabensystem eine etwa 6000 km lange und 5 bis 7 km hohe ovale Kuppel, deren Längsachse ungefähr der Linie Olympus Mons – Großer Graben folgt.

Und wie ist die Entstehung einer so gewaltigen planetarischen „Beule“ zu erklären? In erster Linie wohl durch Magmenbewegungen in der Tiefe. Nach einem vereinfachten Schema sieht die für möglich gehaltene Entwicklung dieses Komplexes etwa so aus: Vor über 3 Milliarden Jahren erlebte die damals noch recht junge Marskruste eine Phase intensiver Magmenförderung infolge zunehmender Aufheizung des inneren Planetenkörpers. Mit der Zeit, als die Radioaktivität und damit die Aufheizung nachließ, schwächten sich diese Nachschübe mehr und mehr ab und konzentrierten sich dabei auf einige wenige Austrittsstellen, wodurch die Riesenvulkane entstanden.

Wir können danach das Mittelstück und die unregelmäßigen Grabenbögen vom Ostende des Großen Grabensystems – Valles Marineris, wie seine neue wissenschaftliche Bezeichnung lautet – als anfängliche Risse eines in Auflösung befindlichen Krustenverbands verstehen, dessen Schollen vom Magmenstrom unter der großen Beule oder Kuppel mitverschleppt wurden.

Aus alldem geht hervor, daß in der jüngeren Geschichte des Planeten Mars die magmatischen Strömungen unter der festen Oberfläche zwar ausreichten, die Kruste örtlich zu zerbrechen; sie vermochten aber diese Bewegungen nicht so weit in Gang zu halten, daß eine echte Kontinentaldrift daraus werden konnte. Die thermische Energiequelle des kleineren Bruders der Erde erwies sich als zu schnell erschöpft, um plattentektonische Bewegungen in gesamtplanetarischem Maßstab zu bewirken. Dennoch – das Startzeichen dazu schien eindeutig gegeben, und in dem hier besonders interessierenden Vergleich zur Erde legt dieser eingefrorene, plattentektonische Anfangszustand des Mars wegen des Fehlens echter Gebirgsstrukturen die Vermutung nahe, daß auch auf unserem Planeten die Entstehung der Faltengebirge erst in einem fortgeschrittenen Stadium anschließend an die frühen plattentektonischen Bewegungen begann.

Kosmische Einflüsse auf die Erde



Gäste aus dem Weltraum

Die Raumfahrt eröffnete den Geo- und Kosmosforschern bereits die Möglichkeit, sich die für eine genauere Analyse erwünschten Mondsubstanzen „vom Himmel“ zu holen. Und mit Sicherheit können wir damit rechnen, daß bald auch Gesteinsproben vom Mars oder von der Venus vollautomatisch zur Erde gelangen. Die Wissenschaftler, durch die enorme Aussagekraft der Analysendaten auf den Geschmack gekommen, werden sich aber mit ihnen nicht begnügen und Forderungen nach weiteren Gesteinsproben von noch ferneren Himmelskörpern anmelden. Solche Stimmen sind schon seit Jahren laut geworden; einige Kleinplaneten oder Planetoiden und die Jupitermonde stehen auf dem Programm.

Im Prinzip liegen diese Unternehmen heute bereits im Bereich des technisch Möglichen. Doch niemand darf die hohen Kosten übersehen, die ihre Durchführung verursachen würde, und es sollte auch nicht vergessen werden, daß in Gestalt der Meteorite kosmische Gesteinsproben schon seit langem und ohne Raumfahrt für direkte Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Diese Gäste aus nahen und fernen Räumen unseres Planetensystems haben uns in den letzten Jahrzehnten eine solche Fülle von Daten zur Entstehungsgeschichte der die Sonne umkreisenden Himmelskörper gewinnen lassen, daß die Auswertung der Ergebnisse uns einerseits manche Mission erspart und andererseits sicherlich Ziel und Aufgabenstellung einiger weiterer geplanter Forschungsunternehmungen der Raumfahrt mitbestimmen wird.

Es ist noch keine 200 Jahre her, daß man die meteoritischen Körper überhaupt als Gäste aus dem Weltraum erkannt hat. 1794 machte der in Wittenberg geborene Physiker Ernst Chladni (1756–1827) erstmalig auf den kosmischen Ursprung der meteoritischen Massen aufmerksam. Angeregt hatte ihn dazu der berühmte Meteorit von Krasnojarsk, den der Berliner Naturforscher Peter Simon Pallas (1741–1811) 1774 aus

Sibirien mitbrachte. Pallas war von der Kaiserin Katharina II. (1729–1796) zum Leiter einer Expedition der Petersburger Akademie der Wissenschaften bestimmt worden, die den Auftrag hatte, den zu erwartenden seltenen Fall eines Venusvorbeigangs vor der Sonnenscheibe zu studieren, und die sich gleichzeitig um die weitere Erforschung des östlichen Rußlands bemühen sollte. Diese damals recht abenteuerliche und beschwerliche Reise dauerte fast 6 Jahre und führte Pallas 1771 auch bei Krasnojarsk am Oberlauf des Jenissej vorbei. Ein tatarischer Soldat erzählte ihm, daß der Schmied eines benachbarten Dorfs schon vor über 20 Jahren auf einem Berg einen sonderbaren Eisenfelsen gefunden habe. Obwohl der eigentliche Wert dieses 687 kg schweren Brockens als Meteorit damals nicht zu erkennen war, erregte doch das fremdartige Aussehen des „Steins“ so sehr das Interesse der Expeditionsteilnehmer, daß sie sich zum mühseligen Transport des Kuriosums nach Petersburg entschlossen. Nach diesem „Pallaseisen“ wurde später eine ganze Gruppe der Meteorite als Pallasite bezeichnet.

Chladni hatte es zunächst nicht leicht, seine Theorie zu verteidigen, die wider Willen etwas an die gerade erst überwundenen religiösen Vorstellungen erinnerte, wonach die Laune der Götter die himmlischen Steine auf die Erde niedersausen ließ. Man war viel eher geneigt, anderen, damals moderner erscheinenden Auffassungen Glauben zu schenken, vor allem der Ansicht, diese durch die Luft geschleuderten Gesteinsbrocken stammten von fernen Vulkanausbrüchen.

Doch für Chladni arbeitete die Zeit, das heißt, die Daten zugunsten seiner Theorie mehrten sich. Den stärksten Eindruck muß wohl 1803 der Steinregen bei l'Aigle (Normandie) gemacht haben, in dessen Aufschlagbereich sich rund 3000 Steine verstreut fanden. Das Gesteinsmaterial wurde bald durch die Pariser Akademie untersucht.

Bis heute konnte die statistische Auswertung aller Meteorite annähernd 2000 Funde erfassen. Man unterscheidet drei Hauptgruppen: Stein- und Eisenmeteorite sowie eine Gruppe von Übergangsformen, die als Siderolithe oder Stein-Eisen-Meteorite bezeichnet werden. Der Pallasit gehört zum Beispiel hierher. Schlüsseln wir das Häufigkeitsverhältnis dieser Stein- und Eisenmeteorite einmal nach den genaueren Fundumständen auf, so wird ein interessanter Umkehrereffekt erkennbar. Während unter den bloßen Funden, bei denen also die Fallerscheinungen nicht mit überliefert sind, die Eisenmeteorite mehr als 50 Prozent des Gesamtanteils bilden, sinkt ihr Prozentsatz auf etwa 7 Prozent, wenn man nur die beobachteten Fälle statistisch auswertet. Eine Tabelle, die 1943 Meteorite nach ihren Fundumständen bis 1975 erfaßt,

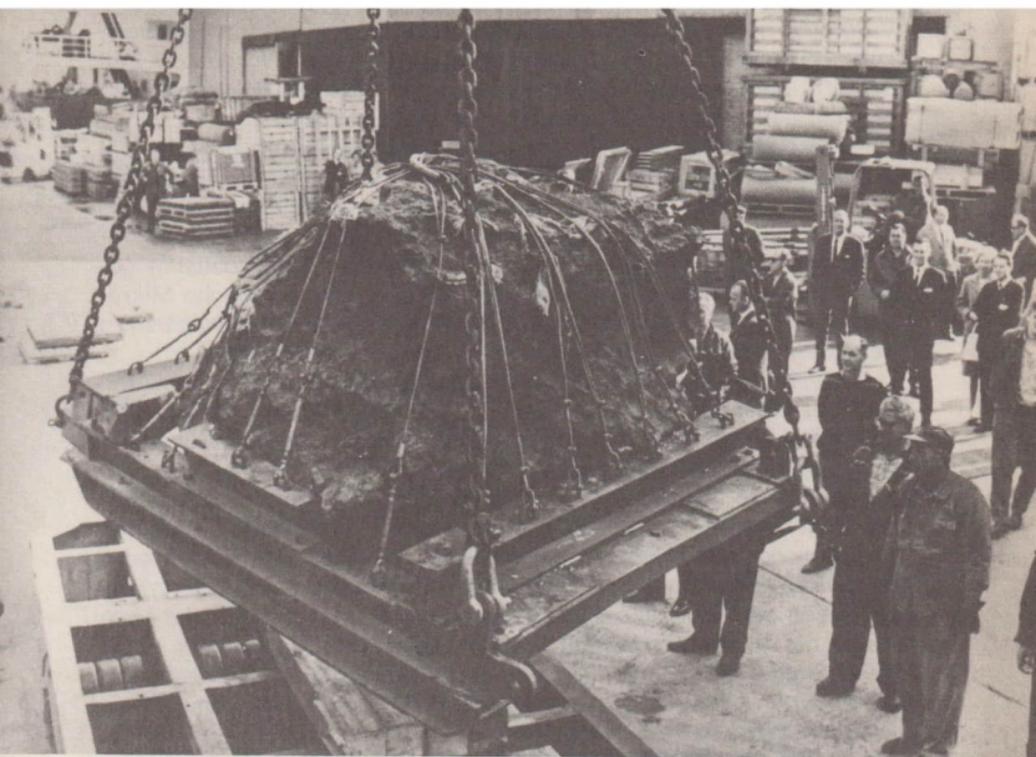
gibt über diese wahren und scheinbaren Häufigkeitsverhältnisse Auskunft.

Meteoritenart	Anzahl der Fälle	Prozent	Anzahl der Funde	Prozent	Gesamtzahl	Prozent
Eisenmeteorite	57	6,9	591	52,8	648	33,2
Stein-Eisen-Meteorite	12	1,5	61	5,5	73	3,8
Steinmeteorite	756	91,6	466	41,7	1 222	63
Summe	825	100	1 118	100	1 943	100

Der Anteil der Eisenmeteorite an der wahren kosmischen Häufigkeit ist demnach viel geringer, als das Addieren aller Funde uns zunächst vermuten lassen könnte. Nur die Statistik der Fälle scheint sich für eine genauere Aussage darüber zu eignen. Eisenbrocken fallen im Gelände eben viel mehr auf und können auch noch nach Jahren oder sogar Jahrhunderten gefunden werden, während sich Stein von Stein nicht so leicht unterscheiden läßt.

Von Anfang an hat die Meteoritenforscher die Frage nach dem Ursprung dieser kleinen Himmelskörper bewegt. Die ältere, schon im vorigen Jahrhundert aufgeworfene Fragestellung war mehr grundsätzlicher Art und lautete: Haben wir es hier mit den Trümmern eines einzigen Himmelskörpers zu tun, oder waren diese Meteorite nie allzuviel größer als kurz vor dem Eintauchen in die Atmosphäre? Heute ist man sich darüber einig, daß die meisten Meteorite von größeren Ursprungskörpern stammen, die vermutlich zu den Planetoiden gehören. Daher geht die Forschung jetzt vor allem solchen speziellen Problemen nach wie etwa der thermischen Entwicklungsgeschichte dieser sogenannten Mutterkörper, ihrem ehemaligen Durchmesser und ihrem Aufenthaltsraum im Sonnensystem, oder, was nicht weniger brennend interessiert, der Frage nach dem Grund dafür, daß sie reich oder arm an bestimmten Elementen sind.

Auf zwei völlig verschiedenen Wegen läßt sich wichtiges Datenmaterial zur Lösung dieser Probleme zusammentragen: einmal durch das genaue Studium meteoritischer Substanzen, die bisher zur Erde gelangten; und zum andern durch Fernerkundung der Planetoiden als Quelle der meisten Meteorite.



Auf dem Weg ins Museum: Ein etwa 18 t schwerer, 1963 in Grönland entdeckter Eisenmeteorit wird in Kopenhagen entladen.

Eigentlich, so möchte man meinen, ergibt sich schon aus der Häufigkeit der 3 Haupttypen der auf der Erde gefundenen Meteorite die Antwort auf die Frage nach ihrer Entstehung. 6,9 Prozent Eisen- und 91,6 Prozent Steinmeteorite – spricht das nicht für einen Ausgangskörper mit kleinem Eisenkern und kräftiger Silikathülle als dicker äußerer Schale? Sind diese Meteorite nicht einprägsame Musterbeispiele für die Zusammensetzung des eigenen Erdinnern, das wir wohl nie zu sehen bekommen werden? Hier erhalten wir seine Substanz vorgeführt. Indem man die verschiedenen Meteoritentypen einem Profilschnitt durch einen größeren Himmelskörper vom Zentrum bis zum Außenrand

zuordnet, kann man nahezu lückenlos demonstrieren, wie der oft zum Vergleich herangezogene Hochofenschmelzprozeß in den Himmelskörpern funktioniert hat. So jedenfalls wurde es bis vor kurzer Zeit gelehrt. Doch dieses überzeugend wirkende Schema hält vielen neueren und neuesten Detailkenntnissen nicht mehr stand.

Insbesondere haben sich Meteoritenforscher darum bemüht, die Aussagen über die einstige Abkühlungsgeschwindigkeit der untersuchten meteoritischen Bruchstücke zu präzisieren — kann man doch aus ihrem langsameren oder schnelleren Verlauf auf einen größeren oder kleineren Ursprungskörper schließen. Sowjetische Spezialisten gelangten hier, indem sie erstmalig die röntgenspektrografische Mikroanalyse zur Bestimmung von Nickelgehalten in feinsten Mineralbändern der Eisenmeteorite einsetzten, zu interessanten Ergebnissen.

Das Prinzip läßt sich etwa so erklären: Alle Eisenmeteorite enthalten einen bestimmten Anteil Nickel, meist um 4 bis 15 Prozent. Dieser tritt aber nicht als selbständiges, körniges Mineral auf, sondern als Legierung mit dem Eisen gemeinsam, und das wiederum nicht gleichmäßig verteilt, sondern zu Bändern oder Schichtgittern im Eisen angereichert. Man nennt die breiteren Zonen, die zugleich nickelärmer sind, Balkeneisen oder Kamazit und die nickelreicheren Streifen Taenit oder Bandeisen. Wenn man Schliffflächen der Meteorite mit Salpetersäure behandelt, läßt sich dieses Mineralgefüge sichtbar machen, weil beim Ätzen die nickelärmeren Partien stärker angegriffen werden. Nach ihrem Entdecker, dem österreichischen Technologen *Aloys von Widmannstätten* (1754—1849), bezeichnet man diese Ätzstrukturen auch als Widmannstättensche Figuren.

Je höher der Nickelgehalt der Taenitbänder ist, desto langsamer erfolgte die Abkühlung im Kosmos und desto schmaler wurden sie angelegt. Nach dieser Regel lassen sich nun Abkühlungsgeschwindigkeiten für kosmische Körper berechnen, die in der Größenordnung von 0,01 bis 10 K je Jahrillion liegen. Dies mag manchem zunächst ungeheuer langsam erscheinen, aber immerhin handelt es sich um Planetoiden mit Durchmessern von „nur“ einigen zehn bis zu mehreren hundert Kilometern.

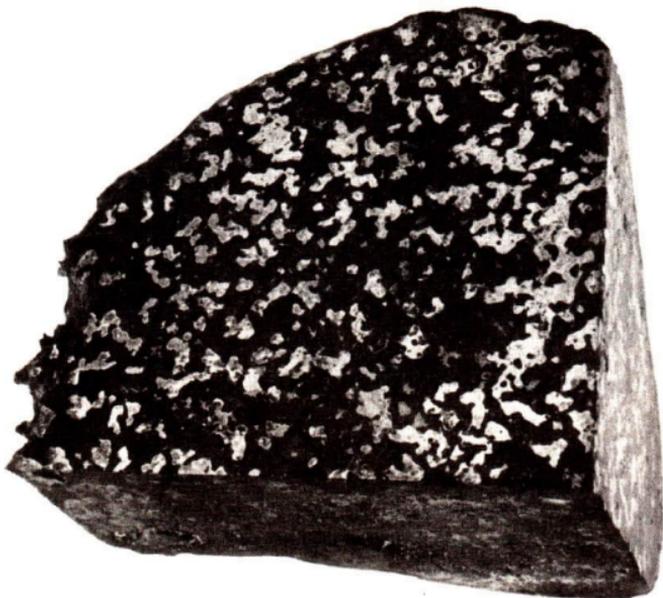
Von den rund 600 Eisenmeteoritenfunden konnte nur ein Teil für diese Art der Abkühlungsanalyse verwendet werden. Eine Gruppe — man kennt 36 Fundpunkte — fällt ganz aus. Sie heißen Ataxite (griech. a... = nicht, un...), weil sie strukturlos sind, obwohl ihre Nickelgehalte für die Kamazit-Taenit-Ausbildung genügend hoch veranschlagt werden. Wie erklärt sich das Fehlen der für uns so wichtigen



Knapp 20 cm langer Eisenmeteorit mit typischen Widmannstättenschen Figuren, die den Kristallaufbau erkennen lassen

Strukturen? Hierzu ist es interessant, zu wissen, daß wir zwar mit irdischen Mitteln die Widmannstättenschen Figuren sichtbar zu machen vermögen. Sie lassen sich auch durch Erhitzen über 1200K zum Verschwinden bringen; doch das geschieht dann für immer; denn wir können sie unter Laborbedingungen niemals wieder erzeugen. Ihre Entstehung, die, wie heute bekannt ist, zwischen 750 und 1000 K erfolgt, braucht in erster Linie Zeit, viel Zeit sogar. Sie muß sich ganz langsam vollziehen, sonst ließen sich diese Strukturen ja nicht als kosmische Uhr verwenden. Ataxite könnten demnach Meteorite sein, deren Substanzen im Weltall wie unter irdischen Laborbedingungen rasch ihre Temperatur änderten und dermaßen schnell erstarrten, daß das sonst so charakteristische Nickel-Eisen-Gefüge gar nicht erst zu entstehen vermochte. Vielleicht belegen uns gerade diese Ataxite Jahrmilliarden zurückliegende kosmische Zusammenstöße, nach denen die zertrümmerten und verspritzten Substanzen anormal rasch abkühlten.

Unter anderem haben die bis jetzt untersuchten Eisenmeteorite mit Widmannstättenschen Ätzfiguren, die von den Mineralogen übrigens wegen ihrer wahren Kristallstruktur auch als Oktaedrite bezeichnet werden, in mehreren Fällen ergeben, daß sogar noch raschere Abkühlungsgeschwindigkeiten auftreten, als einem Mutterkörper von etwa 10 km Durchmesser entspräche. In solchen kleinen Planetoiden ist aber wegen des viel zu schwachen eigenen Gravitationsfeldes eine Wirksamkeit der Schweresonderung der Gesteine, wie sie beim Seigern im Hochofen erfolgt, undenkbar. Eine Trennung der Substanzen des

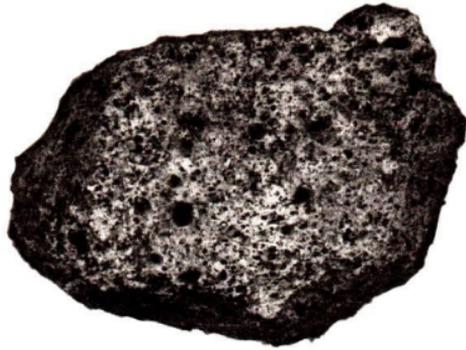


Die etwa 10cm² große Anschlifffläche des pallasitverwandten Stein-Eisen-Meteorits von Steinbach (Sachsen) zeigt helle Einschlüsse von Nickeleisen in dunkler Silikatmasse.

Planetoiden in einen schweren Eisenkern und eine leichtere äußere Gesteinsschale läßt sich also daraus nicht ableiten, und wir müssen folglich annehmen, daß diese Eisenoktaedrite gleich aus dem Urnebel auskondensiert wurden.

Das berühmte Pallaseisen macht dies noch auf andere Weise deutlich. Praktisch besteht es – wie überhaupt alle bisher gefundenen 40 Pallasite – aus einer Nickel-Eisen-Grundmasse, die 30 bis 55 Prozent der Gesamtmenge ausmacht, und aus zahlreichen bis zentimetergroßen Körnern von Olivin, einem Magnesium-Eisen-Silikat, das auch in irdischen Gesteinen wie Basalt recht häufig vorkommt. Es gilt als Fröh-ausscheidung der magmatischen Schmelze, weil seine Kristallisations-temperatur von über 1 500 K, verglichen mit der der übrigen Minerale des Magmas, sehr hoch liegt. Diese Olivinkörner der Pallasite schwimmen nun scheinbar regellos in der Nickel-Eisen-Masse, als hätte sie ihre viel geringere Dichte nie gezwungen, sich unter dem Einfluß der

Chondrit von Bjurböle (Finnland), ein 7 cm langer Steinmeteorit, in dem die Chondren als dunkle Einschlüsse gut erkennbar sind.



Schwerkraft in einer Richtung zu sammeln. Ihre Erstarrung erfolgte demnach mit Sicherheit in einem Himmelskörper, der so klein war, daß seine Gravitation keinen nennenswerten Einfluß auf die Dichtesondierung seiner Schmelzen ausüben konnte. Wir haben das Erstarrungsgefüge einer Emulsion vor uns, bestehend aus zwei nicht miteinander mischbaren Flüssigkeiten, die sich auf der Erde sehr rasch in getrennten Schichten absetzen würden.

Ermöglichen die Eisenmeteorite Auskünfte über die Größe der Ursprungskörper, so helfen die Steinmeteorite in erster Linie, den Vorgang der Aggregation (lat. aggregare = beigesellen) der Massen, also deren Zusammenballung von der Tröpfchengröße bis zur Dimension von Kleinplaneten, verständlich zu machen. Zwei große Gruppen werden unterschieden: Chondrite und Achondrite. Chondrit heißt soviel wie Gestein mit Chondren, und das sind Kügelchen vom Format der Regentropfen, nur daß sie nicht aus Wasser, sondern aus Silikaten vom Typ der Olivine oder Augite bestehen, Minerale, die wir auf der Erde ebenfalls reichlich in den meisten basaltverwandten Magmatiten antreffen. Die restliche Meteoritensubstanz, die man als Grundmasse bezeichnen könnte, enthält hauptsächlich die gleichen Minerale sowie in den meisten Fällen noch darin eingebettet kleinere Fetzen von Nickel-eisen.

Die Achondrite bieten im allgemeinen ein ähnliches Bild, nur fehlen ihnen die kennzeichnenden Kügelchen. Olivin und Augit sind also auch in den Achondriten die häufigsten Mineralbestandteile. Nickeleisen fehlt hingegen fast völlig, dafür kommen Feldspäte hinzu. Diese Mineralkombination läßt einige Achondrite irdischem Basaltgestein täuschend ähnlich werden.

Nach allen bisherigen mineralogisch-petrographischen (griech. petros = Fels; Petrographie = Gesteinskunde) Befunden waren die Ausgangsbedingungen für beide Gruppen von Steinmeteoriten nicht allzu verschieden. Ein Teil der Achondrite läßt sogar vermuten, daß sie als Chondrite entstanden und nur infolge von Aufschmelzungsprozessen, denen sie im Innern besonders großer Planeten ausgegesetzt waren, ihren chondritischen Charakter verloren haben. Wie kam es aber nun zur Bildung der Chondren?

Ähnlich wie bei den Widmannstättenschen Figuren ließ sich auch dieses Merkmal kosmischer Gesteine unter irdischen Bedingungen noch niemals in einem natürlichen Gesteinsverband beobachten oder künstlich erzeugen. Zwei Entstehungswege werden gegenwärtig diskutiert.

Der eine ergibt sich aus der Vorstellung, daß die frühen Kondensate des Sonnensystems, also das, was sich aus dem Urnebel zuerst zu flüssigen oder festen Substanzen verdichtete, wie eine Art Feuerregen auf die unzähligen Kleinkörper und Protoplaneten niedergingen, die statt der heutigen Planeten den Raum dieses Systems im Anfangsstadium füllten. Die Kondensation erfolgte im Fall der Chondren wohl zunächst über die flüssige Phase, ehe die Erstarrung einsetzte, und die Einbettung oder „Landung“ auf bereits einige meter- bis kilometergroß gewachsenen Massen mußte relativ „sanft“ vor sich gehen, sollten die Tröpfchen oder Kügelchen eine Erhaltungschance haben. Diese Erklärung wäre vielen Planetologen besonders willkommen; denn damit würden die Chondren zu ganz frühen Formen der Kondensation der Materie im Planetensystem zählen, das heißt, sie gehörten damit in eine Phase, für die auch jeder kleinere gestaltliche Zeuge höchsten Wert besitzt, weil die Formung der sonst für die Entstehung des Systems so aussagekräftigen Oberflächen der größeren Himmelskörper, selbst der von Mondgröße, noch nicht abgeschlossen war.

Ein zweiter, nicht ganz abwegiger Deutungsversuch sieht in den Chondren lediglich die nach vorangegangenen Meteoriteneinschlägen oder zu hartem Zusammenprall der kosmischen Kleinkörper wieder in den Raum versprühten Flüssigkeitstropfen. Nicht nur äußerlich wären sie demnach den zahllosen Glaskügelchen im Gesteinsstaub des Mondes, die auf diese Weise entstanden, sehr ähnlich.

Nach noch anderen, älteren Auffassungen hielt man die Chondren sogar für zerstäubtes Material eines im Keim vorhandenen „Miniplanetenvulkanismus“. Wenn wir die Vielfalt der strukturellen Erscheinungen in den chondrenführenden Meteoriten berücksichtigen, müs-

sen wir einräumen, daß vielleicht tatsächlich ganz verschiedene Vorgänge an der Erzeugung der Kügelchen beteiligt waren.

Unabhängig von diesen noch offenen Fragen gilt aber als sicher, daß die Chondren an der Oberfläche des jeweiligen Himmelskörpers abgelagert wurden. Als man beispielsweise 1971 diese Kügelchen zum erstenmal auch in einem Eisenmeteoriten entdeckte, war das ein eindeutiger Befund gegen die ältere Lehrmeinung, wonach solche Meteoritensubstanz ausschließlich aus dem tieferen Innern von Kleinplaneten stammen sollte.

Lebensspuren aus dem Weltraum?

In den letzten Jahren hat eine Sondergruppe der Meteorite von sich reden gemacht: die kohligen Chondrite, benannt nach dem Kohlenstoff, den sie enthalten.

Kohlige Chondrite sind uns nur durch Fälle bekannt geworden — 20 an der Zahl — und das erst seit 1806, als der Fall bei Alais (Südfrankreich) den Reigen eröffnete. Man kann sie entweder sofort finden oder nie mehr; denn ihre Substanz, die grau bis schwärzlich aussieht, fast wie Brikettgrus, zerbröckelt sehr leicht, ist also anfällig gegen Verwitterung. Der Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 1 und 3 Prozent. Das mag absolut betrachtet wenig sein, relativ gesehen ist es sehr viel, vor allem verglichen mit der kosmischen Häufigkeit der Elemente, gegenüber der die Anteile eine Anreicherung um mehr als das Tausendfache bedeuten.

Ansonsten herrschen in den kohligen Chondriten wasserhaltige Silikate vom Typ der Tonerdemineralen vor. Das Besondere ist, daß diese Minerale allesamt nur bei für Meteorite ungewöhnlich niedrigen Temperaturen — unter 1000 K — entstehen können. Vielleicht lagen die Bildungsbedingungen teilweise sogar bei 600 bis 800 K oder noch tiefer.

Sehen wir von den leichtflüchtigen Bestandteilen einmal ab, so weist die übrige Palette der Elemente des periodischen Systems in kohligen Chondriten gegenüber der Ausgangshäufigkeit im Urnebel die geringsten Veränderungen unter den meteoritischen Substanzen auf, das heißt, ihre Zusammensetzung kommt dem Urzustand der Elementverteilung im Kosmos am nächsten.

Bereits 1834 stellte der schwedische Chemiker *Jöns Jakob von Ber-*

zelius (1779–1848) nach seinen Untersuchungen des Alais-Meteoriten und dem Herauspräparieren der darin enthaltenen organischen Substanzen die Frage nach der außerirdischen Herkunft solcher „Lebensspuren“. Seitdem hat dieses Thema immer wieder die Gemüter bewegt. Die letzte große Welle wurde ausgelöst, als 1961 zwei amerikanische Wissenschaftler behaupteten, in kohligen Chondriten „organisierte Elemente“, wie sie es vorsichtigerweise nannten, gefunden zu haben. Dabei ließen sie durchblicken, daß die entdeckten Formen an primitive Algenstrukturen, also schon recht hoch organisiertes Leben, erinnerten. 1963 wurden in einer angesehenen Fachzeitschrift unter der Überschrift „Die Mikrofossilien des Orgueil-Meteorits“ die markantesten Beispiele dieser Formen, oder was man dafür hielt, sogar abgebildet.

Der Orgueil-Meteorit war in Frankreich bereits fast 100 Jahre zuvor (1864) niedergegangen und die gesamte gefundene Substanz von 10 kg sehr rasch auf verschiedene Sammlungen der Welt aufgeteilt worden. Die Fundumstände wie auch die Aufbewahrungsbedingungen haben in diesem Fall wegen der Gefahr der Verwechslung echter meteoritischer Bestandteile mit nachträglichen Verunreinigungen größte Bedeutung. Zu schwerwiegend wären schließlich die Folgen für alle Forschungen zur Entstehung des Lebens, wenn sich die gefundenen Formen tatsächlich als Zeugen außerirdischen Lebens erwiesen. Die Bearbeiter beteuern die peinliche Sauberkeit ihrer Präparationsbedingungen im Labor. Das schließt aber noch lange nicht früher eingetretene, etwa von der Fundstelle stammende Verunreinigungen mit Sicherheit aus.

Die abgebildeten Formen zeigen Bänder und mehr kugelige Gebilde, alle erheblich kleiner als 1 mm. Zum Teil soll sogar eine doppelte Wandung die Mikroformen umgeben.

Bei aller Aufgeschlossenheit, die wir heute den Fragen nach außerirdischem Leben entgegenbringen müssen, scheint hier aber doch einige Skepsis am Platz. Die Definition für organische Stoffe schließt nicht ihre anorganische Entstehung aus. Das gilt auch für die Grundbausteine der Aminosäuren, die man in kohligen Chondriten sicher nachgewiesen hat.

Am wichtigsten für die Vorläuferstadien eines höher organisierten Lebens sind die ermittelten organischen Stickstoffverbindungen, wie das Pyrimidin, das wir als Spaltprodukt der Nukleinsäuren kennen. Ferner wurden Purine und Porphyrine gefunden. Es sind folglich Stoffe vorhanden, die als Grundbausteine des organischen Lebens gelten können beziehungsweise deren wichtigste biologische Eigenschaft ihre Fotosensibilität oder Lichtempfindlichkeit darstellt. Die Voraussetzun-

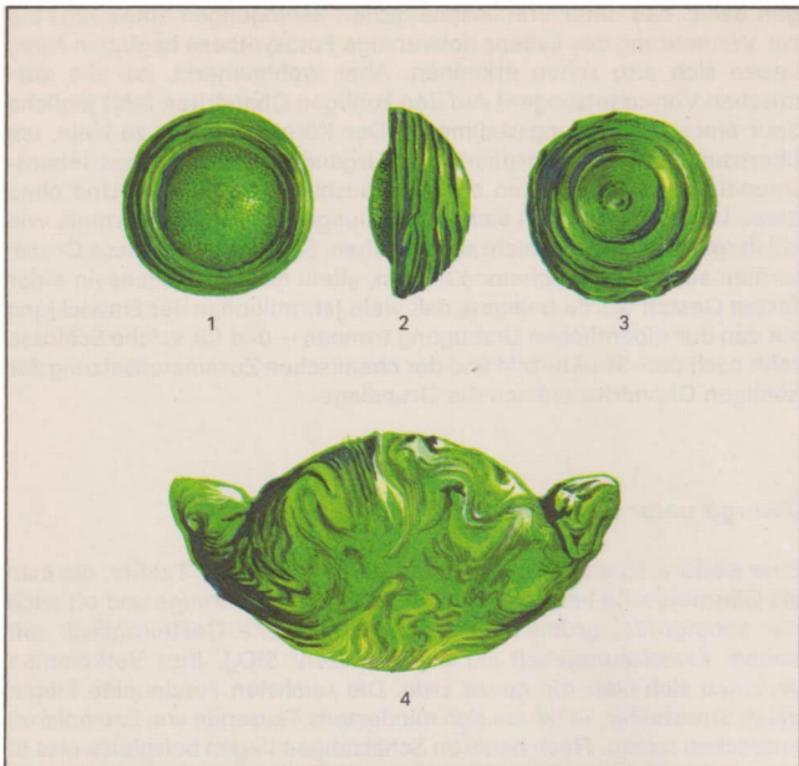
gen dafür, daß unter uratmosphärischen Bedingungen eines Tags die zur Vermehrung des Lebens notwendige Fotosynthese beginnen kann, lassen sich also schon erkennen. Aber wohlgemerkt, nur die chemischen Voraussetzungen! Auf den kohligen Chondriten fehlt jegliche Spur eines Umlagerungssediments. Der Körper war viel zu klein, um überhaupt eine Uratmosphäre oder irgendein andersartiges lebensfreundliches Milieu halten oder gar ausbilden zu können. Und ohne diese Umwelt vermögen sich Entwicklungen zu solchen Formen, wie sie dargestellt wurden, nicht zu vollziehen. So primitiv uns diese Grundformen auch noch erscheinen mögen, allein das Vorhandensein einer festen Gestalt würde belegen, daß viele Jahrmillionen der Entwicklung sie von der eigentlichen Urzeugung trennen – und für solche Schlüsse fehlt nach dem Strukturbild und der chemischen Zusammensetzung der kohligen Chondrite einfach die Grundlage.

Zwerge unter den Meteoriten

Eine weitere Sondergruppe der Meteorite bilden die Tektite, die man als Glasmeteorite bezeichnen kann. Es sind knopfförmige und oft auch nur knopfgroße, grünliche bis dunkelbräunliche Gesteinsgläser mit hohem Kieselsäuregehalt (70 bis 80 Prozent SiO_2). Ihre Vorkommen verteilen sich über die ganze Erde. Die reichsten Fundpunkte bilden dabei Streufelder, in denen sich mindestens Tausende von Exemplaren entdecken lassen. Nach neueren Schätzungen liegen beispielsweise in einem der bisher größten Fundgebiete, dem südostasiatisch-australischen Streufeld, wenigstens hundert Millionen Tonnen oder viele hundert Milliarden Stück.

Es ist wirklich erstaunlich, mit was für verschiedenen kosmischen Ereignissen das Millionenheer der „Weltraumknöpfe“ in ursächlichen Zusammenhang gebracht wird. Selbst die wissenschaftlich einigermaßen ernst zu nehmenden Entstehungskonzeptionen ergeben eine reiche Sammlung.

Ältere Auffassungen besagen: Tektite sind in Wirklichkeit gar keine Meteorite, sondern Auswürflinge sehr energiereicher irdischer Vulkanausbrüche, deren Wurfparabeln sogar über die Grenze der Erdatmosphäre hinausführten. Eine Variante hierzu bildet die Deutung der Tektite als Mondgestein, wobei man in ihnen Produkte des lunaren Vulkanismus sah, während nach moderner Darstellung auch der Meteo-



Typischer Tektit mit Merkmalen der Verformung beim Flug durch die Atmosphäre

1 = hintere Seite beim Flug; 2 = Profilansicht; 3 = Ober- oder Stirnseite beim Flug; 4 = Querschnitt mit Fließgefüge im Gesteinsglas

riteneinschlag auf dem Mond als Ursache der Versprengung seines Gesteins bis zur Erdoberfläche angegeben wird.

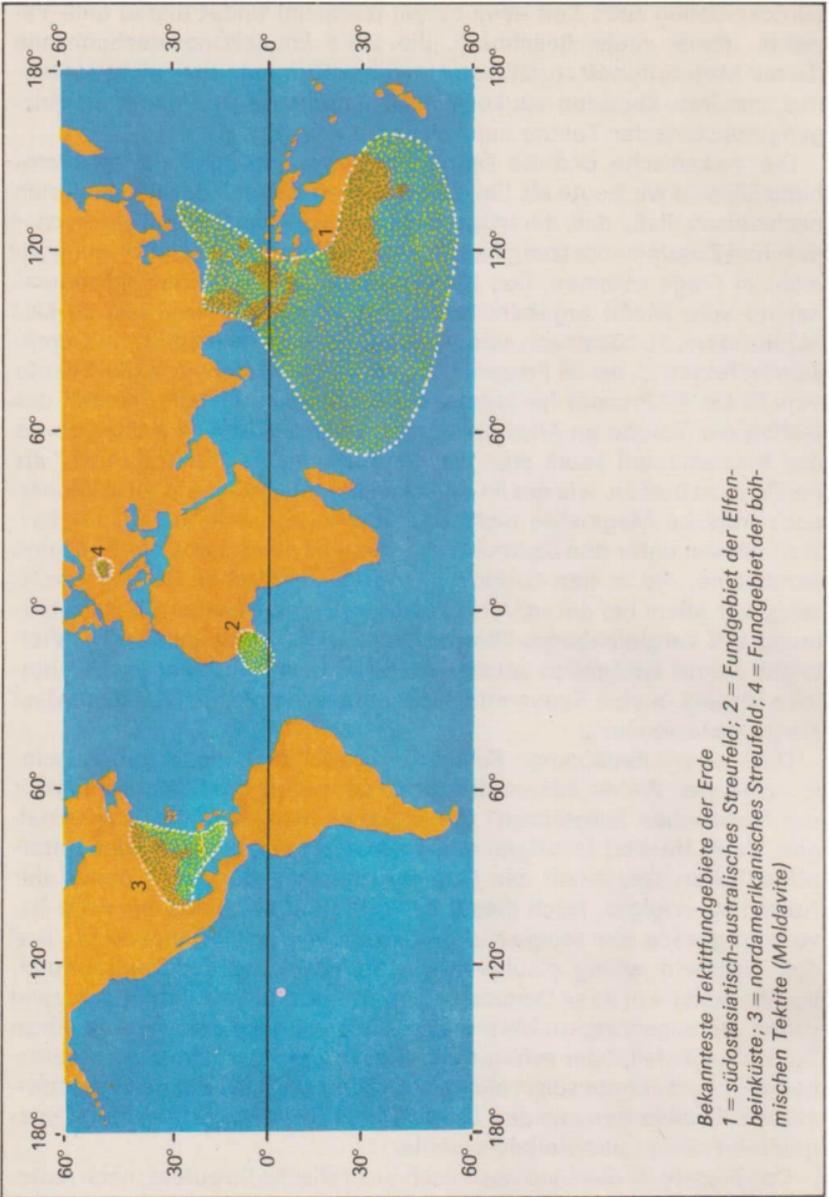
Eine große Anhängerschar hat die Deutung, wonach die Tektite aus aufgeschmolzenen irdischen Substanzen bestehen, die beim Einschlag von Riesenmeteoriten aus dem Krater geschleudert wurden. Dabei soll die Materie vom Explosionsherdbis über die Stratosphäre gejagt worden und die darin enthaltenen Brocken und Tröpfchen dann, kaum im Flug erstarrt, unter erneuter teilweiser Aufschmelzung zur Erdoberfläche

zurückgefallen sein. Seit etwa einem Jahrzehnt findet hierzu eine Variante immer mehr Beachtung, die viele Entstehungsmechanismen dieser Meteoriteneinsturztheorie aufgegriffen hat, aber nicht Meteorite, sondern Kometen als kosmische Geschosse und damit als Ausgangssubstanz der Tektite annimmt.

Die vulkanische und die Mondgesteinsversion zur Tektitenentstehung können wir heute als überholt ansehen, einfach deshalb, weil sich nachweisen ließ, daß derartige Ursprungssubstanzen von ihrer chemischen Zusammensetzung her für eine entsprechende Umformung gar nicht in Frage kommen. Das hat insbesondere die Gesteinsprobenentnahme vom Mond ergeben; denn dort ist das Material viel zu kiesel säurearm, zu basaltisch, wie es in der Fachsprache heißt. Im Durchschnitt fehlen 25 bis 30 Prozent SiO_2 , um an die Mittelwerte der Tektite von 70 bis 80 Prozent heranzukommen. Und zum andern reichen der Gehalt der Tektite an Alkali elementen wie Natrium und Kalium sowie der Kalziumanteil kaum aus, um die vorhandene Tonerde (Al_2O_3) als Feldspat zu binden, wie das im irdischen Magma geschieht. Also können auch irdische Magmatite nicht das Ausgangsgestein bilden, sondern statt dessen unter den Sedimenten höchstens die Gruppe der Tone und Sandsteine, die in den Grundzügen ihrer chemischen Zusammensetzung, vor allem bei deren Variationsbreite, eine gewisse Übereinstimmung mit vergleichbaren Werten der Tektite erkennen lassen. Vielleicht wurde tatsächlich solches Material beim Einschlag eines Himmelskörpers in eine Sedimentschicht aufgeschmolzen und mit aus dem Krater geschleudert.

Doch eine offenkundige Schwäche besitzt auch die Meteoriteneinsturztheorie. Woher kommt die oft zu beobachtende Gleichförmigkeit der tektitischen Substanzen? Zwar gibt es hier ebenfalls Schwankungen, doch sie sind im allgemeinen geringer, als man nach den unterschiedlichen Gesteinen der Gebiete erwarten dürfte, in denen der Aufschlag erfolgte. Nach dieser Theorie sieht es so aus, als wäre bevorzugt gerade der tonig-sandige Gesteinstyp getroffen worden, und das erscheint wenig glaubwürdig. Die Weltkarte der Tektitenfundpunkte weist 4 in ihrer Dimension herausragende Streufelder aus, zwei davon mit zugehörigem Meteoritenkrater. Ist das Fehlen der anderen Krater nur Zufall, oder erfolgte der Einschlag in benachbarten Meeresgebieten und konnte somit nicht überliefert werden? Einige charakteristische Einzelheiten aus den bisher am intensivsten erforschten Fundgebieten helfen uns vielleicht weiter:

Das jüngste ist das südostasiatisch-australische Streufeld; nach radio-



Bekannteste Tektitfundgebiete der Erde
 1 = südostasiatisch-australisches Streufeld; 2 = Fundgebiet der Eifenbeinküste; 3 = nordamerikanisches Streufeld; 4 = Fundgebiet der böhmischen Tektite (Moldavite)

aktiven Altersbestimmungsmethoden entstand es vor höchstens 700 000 Jahren. Wohl in erster Linie wegen seiner Jugendlichkeit bildet es nach Fläche, Anzahl und Gesamtmasse der Tektite das größte Vorkommen überhaupt. Zusätzlich fanden sich in verschiedenen Bohrkernen vom Boden des Indischen Ozeans viele Mikrotektite (kleiner als 1 mm). Bisher ist kein Krater bekannt. Allerdings wurde auf Tasmanien ein kleinerer Krater von 1 km Durchmesser entdeckt, dessen Alter mit der 700 000-Jahre-Datierung der Tektite übereinstimmen soll. Für den von einem Meteoritentreffer verursachten Hauptkrater wäre er jedoch zu klein und vielleicht auch etwas zu abseits gelegen.

Ähnliches wie in Australien geschah vor ungefähr 1,1 Millionen Jahren in Afrika. Der 10 km breite Ashanti-Krater mit dem großen Bosumtwisee im Innern befindet sich in der Nähe einer Wasserscheide etwa 200 km nordwestlich von Accra, der Hauptstadt Ghanas. Nach physikalischen Datierungen besteht sehr gute Übereinstimmung mit gleichaltrigen Tektitvorkommen der Elfenbeinküste und mit Mikrotektiten aus Bohrkernen vor der Küste Liberias. Auffällig ist, daß die Tektite bisher nur westlich vom Krater gefunden wurden.

Vor etwa 14,6 Millionen Jahren erfolgte der Einschlag des Himmelskörpers, der den 25-km-Krater des heutigen Nördlinger Ries nahe dem Übergang von der Schwäbischen zur Fränkischen Alb schuf. Nach intensiven geophysikalischen und geologisch-petrographischen Forschungen einschließlich Bohrungen bestehen grundsätzlich am Astroblemcharakter des Kessels keine Zweifel mehr. Noch vor wenigen Jahrzehnten hielt man diese „Sternwunde“ (wie Astroblem wörtlich zu übersetzen wäre) mit ziemlicher Bestimmtheit für das Zeugnis einer gewaltigen Vulkanexplosion der Tertiärzeit. Trotzdem sind bis zur Gegenwart viele Fragen, vor allem nach dem Projektil, also dem einschlagenden Körper, offengeblieben. Im Auswurf fehlen Anzeichen meteoritischer Substanzen; statt dessen ergaben sich nach Datierungen eindeutige Beziehungen zu den schon seit vielen Jahrzehnten gesammelten böhmischen Tektiten mit Hauptfundgebieten vor allem zwischen České Budějovice und Brno. Sie sind auch unter dem Spezialnamen Moldavite bei vielen Sammlern und in der Literatur bekannt. Inzwischen hat man zum Hauptkrater des Ries noch eine ganze Reihe von Nebenkratern gefunden. Ihr größter, das Steinheimer Becken, besitzt etwa 3 km Durchmesser und liegt ähnlich wie das afrikanische Beispiel zusammen mit den übrigen Vorkommen einschließlich der Tektitenstrefelder der ČSSR in einem sehr langgestreckten, annähernd von West nach Ost verlaufenden Verbreitungsgebiet.

Grundsätzlich glauben wir heute über den Mechanismus der vom Einschlag hervorgerufenen Erscheinungen besser Bescheid zu wissen als über den physikalischen und chemischen Charakter des zur Erde gelangten Himmelskörpers selbst. Daß wir die Tektite als Produkte einer kosmischen Kollision anzusehen haben, scheint einigermaßen sicher; aber was es war, das da mit der Erde zusammenstieß, ob Meteorit oder Komet, wird wohl noch für längere Zeit unentschieden bleiben.

Außenseiter des Sonnensystems

Die Behauptung, die Kometentheorie könnte manches Tektitenproblem besser lösen als die Meteoritenaufschlagstheorie, läßt sich nur voll verstehen, wenn wir uns über einige besondere Eigenschaften dieser mehr und mehr ins Blickfeld der Planetologie und der kosmischen Geologie geratenden unbeständigen Himmelskörper im klaren sind. Erst dann vermögen wir zu begreifen, warum erwogen wird, noch innerhalb des nächsten Jahrzehnts sogar Raumsonden zur genauen Erforschung von Kometen oder Schweifsternen zu starten.

Als größten Vorzug haben die Kometen den Geo- und Kosmoswissenschaftlern ihre Herkunft aus sehr sonnenfernen Räumen zu bieten. Wie keiner anderen Gruppe des Planetensystems erlaubt ihnen ihre oft lang ausgezogene, elliptische Bahn, ganz unterschiedlich stark bestrahlte Räume zu durchqueren. So verkörpern sie eine Art natürlichen Zubringerdienst für kosmische Substanzen auch aus fernsten Bereichen des Sonnensystems, die uns trotz aller Fortschritte der Raumfahrt sonst mindestens noch jahrzehntelang verschlossen blieben.

Die Entfernungen sind freilich kaum vorstellbar. Die obere Grenze der Leistungsfähigkeit der Raumfahrt liegt zur Zeit etwa bei einer Aufgabe, die eine Gesteinsprobeentnahme mit Rücktransport von unseren Nachbarplaneten vorsieht. Dabei sind Entfernungen von 100 Millionen km oder etwas mehr zu überwinden, also ungefähr von der Größenordnung des mittleren Sonne-Erde-Abstands, genannt eine astronomische Einheit oder 1 AE = 150 Millionen km. Die Heimat der meisten Kometen aber soll in Distanzen zwischen 40 000 und 150 000 AE

Gasschweif des Kometen Bennett, im April 1970 vom Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg bei Jena aufgenommen



von der Sonne zu suchen sein, in Abständen um 1 bis 2 Lichtjahre demnach. Das würde bedeuten, daß ihr Verbreitungsgebiet tatsächlich bis an die äußersten Grenzen des Felds der Gravitationsvormacht unserer Sonne reicht.

Selbst wenn wir schon ein Hundertstel dieses Abstands als Bildungsraum einiger Kometen ansähen, wären wir längst in Bereichen, wo ständig, das heißt auch in der Frühphase des Sonnensystems, so niedrige Temperaturen geherrscht haben dürften, daß die uns als in Sonnennähe leichtflüchtig bekannten Elemente und Moleküle mit Ausnahme des Wasserstoffs allein im festen Zustand vorkommen konnten. Die vom intensiven Sonnenwind des werdenden Zentralgestirns aus dem Entstehungsbereich der erdähnlichen Himmelskörper vertriebenen Gase, darunter Ammoniak und Methan, fingen etwa ab 5 AE unter den dort herrschenden viel kälteren Bedingungen wieder an zu kondensieren und wurden so erst recht zum wesentlichen Bestandteil der noch ferneren Kometen. Nur untergeordnet, sozusagen als Verunreinigung, dürfen wir in ihnen mit Vorkommen an silikatischem Staub, Eisen-Nickel-Verbindungen oder anderen Elementen rechnen. Sind es 4 oder 5 oder noch mehr Prozent? Und besteht der „Rest“ hauptsächlich aus Eis, vermischt mit Kohlendioxidschnee sowie gefrorenem Ammoniak und Methan? Das sind die Fragen, die uns bei der heutigen Kometenforschung vor allem bewegen, weil sie Bausteine zur Darstellung der Entwicklungsgeschichte des Planetensystems liefern könnten.

Vielleicht müssen wir nur lernen, die Kometensprache richtig zu entziffern! Gibt es nicht schon jetzt genug „Durchfaller“ aus diesem riesigen fernen Eiskeller des Sonnensystems, die durch Störungen, welcher Art auch immer, zum Verlassen ihrer „Parkbahn“ da draußen gezwungen wurden und nun ein vergleichsweise kurzes Leben zwischen den störenden Schwerefeldern der Planeten des engeren Sonnensystems führen? Kommen sie dabei der Sonne zu nahe, insbesondere näher als Jupiter, dann fangen sie an, ihre Hülle an leicht verdampfbaren Substanzen aufzugeben. Dabei vermag die elektromagnetische wie auch die solare Teilchenstrahlung den Staub und die ionisierten Gase als Kometenschweif sogar entgegengesetzt zur Richtung der Gravitation wieder in den fernen Raum zu treiben.

So werden all jene Schweifsterne, welche durch Zufall Bahnablenkungen erhalten haben, die sie auf elliptischen Bahnen für einige Zeit zu periodischen Kometen machen, von einem sonnennahen Vorbeigang zum andern immer gasärmer, bis sie kaum oder gar nicht mehr zu einer Schweifentwicklung fähig sind.

Da Kometen, deren sonnennächster Punkt noch innerhalb der Erdbahn liegt, mit unserem Planeten zusammenstoßen können, sollte man annehmen, daß sich dieses Ereignis im Lauf der Erdgeschichte schon mehrfach zutrug. Hier ergibt sich die Frage, ob überhaupt jeder Zusammenstoß mit einem Kometenkopf zur Kraterentstehung führen muß. Sind die Kometensubstanzen nicht sehr wahrscheinlich zum Teil so locker gepackt und die Köpfe demnach vielleicht so porös, daß bei großer Erdannäherung ein Zerfall noch vor dem Aufschlag einsetzt?

Die wahren Durchmesser des eigentlichen Kometenkerns lassen sich, weil meist von entweichenden Gasmassen verdeckt, die das Sonnenlicht verschwommen reflektieren, nur schwer bestimmen. Den vermuteten 100 Milliarden Einzelobjekten nahe den Außengrenzen des Sonnensystems stehen etwas über 500 Exemplare mit berechneten Bahnen in der Größenordnung von Planetenentfernungen zum Zentralgestirn gegenüber. Lediglich knapp 40 davon laufen so kurzperiodisch und sonnennah um, daß ein Zusammenstoß mit der Erde, wenn auch nur theoretisch, schon in den nächsten Millionen Jahren erfolgen könnte. Kometenkerne von annähernd 1 000 km Durchmesser, wie sie als obere Grenze bis vor kurzem noch genannt wurden, dürfte es in Wirklichkeit kaum geben. 1 bis 10 km hält man heute für realistischer. Die besser zu beobachtenden, kurzperiodischen Kometen gehören sogar eher noch an die untere Grenze dieser Schätzung.

Eine aus der Anzahl der gegenwärtig die Erdbahn kreuzenden Kometen abgeleitete Trefferzahl soll bei durchschnittlich einer Kometenkollision mit der Erde in etwa 10 Millionen Jahren liegen. Es ist aber sehr gewagt, derartigen Zusammenstößen eine solche nachhaltige Wirkung zuzuschreiben wie der amerikanische Nobelpreisträger *Harold Clayton Urey*, der in einer 1973 veröffentlichten Hypothese Kometenkollisionen mit unserem Planeten zu „Epochemachern der Erdgeschichte“ erhebt.

Urey geht dabei von durchschnittlichen Kometenkernmassen von 10^{18} g aus, also etwa 1 km^3 Substanz bei der Dichte des Wassers. Ein Treffer solcher Masse läßt bei einem Aufschlag mit etwa 45 km/s kosmischer Geschwindigkeit 10^{24} J (joule) an Energie frei werden. Das sind 29 Prozent der jährlich von der Erde empfangenen Sonnenenergie, und sie würden nach Urey ausreichen, um weltweit eine Temperaturerhöhung von 190 K zu bewirken. Aber hier ist bei der Einschätzung realer Auswirkungen wohl größte Vorsicht am Platz; denn eine derartige, gleich alles Landleben gefährdende mittlere Temperaturerhöhung über der Erdoberfläche findet so ja niemals statt. Der größte Teil der Energie

– praktisch über 90 Prozent – würde vermutlich beim Aufschlag zum Verdampfen und Schmelzen des Kratermaterials sowie zu dessen Umlagerung und zur Verformung des Untergrunds verbraucht. Die Katastrophe hätte also mehr lokalen als weltweiten Charakter.

Dennoch, die Möglichkeiten kosmischer Einflüsse auf den Lauf der Erdgeschichte sind, wie wir heute wissen, erheblich größer, als sich noch vor wenigen Jahren oder Jahrzehnten ahnen ließ, und auch die Kometengefahr gilt es im Auge zu behalten. Die Zahl der immer wieder neu aus fernen Räumern in größere Sonnennähe vorstoßenden Kometen muß wegen ihrer Kurzlebigkeit sehr groß sein. Dies wird durch mehr als ein beobachtetes Beispiel des Zerfalls ihrer Kerne schon in der Bahn bewiesen. Der berühmte Bielasche Komet, der sich 1846 vor den Augen der Astronomen in zwei Teile zerlegte, die von Tag zu Tag weiter auseinandertrieben und selbst noch zerfielen, war wohl nur das auffälligste unter ihnen. Heute existiert als Rest der fast völligen Auflösung dieser Teilstücke allein eine Art elliptischer Staubring auf der Bahnspur des ehemaligen Kometen, der, wenn die Erde ihn passiert, prächtige Meteorschauer mit über 100 Leuchtspuren in der Minute auszulösen vermag.

Zeigt das nicht auf das deutlichste, wie „mürbe“ Kometensubstanz sein kann? Außerdem wurde niemals im Zusammenhang mit einem Durchgang der Erde durch einen Kometenschweif oder in Verbindung mit Meteorschauern eine Zunahme von Meteoritenfällen beobachtet. Die Teilchengröße muß also sehr gering sein. Kometen enthalten Gesteinsstaub, der in der Hochatmosphäre zwischen 80 und 110 km Höhe unter Sternschnuppeneffekten völlig verglüht. Die Gesteinsbrocken der Meteorite dürfen dagegen die Ausgangsgröße eines Kubikmeters kaum unterschreiten, soll wenigstens ein winziger Rest von ihnen unverbrannt den Erdboden erreichen.

Explodierte ein Komet über Sibirien?

Unser verbessertes Wissen über die Kometen gestattet es nun auch, die Ereignisse, die mit dem Tunguska-„Meteorit“ in Verbindung gebracht werden, viel widerspruchsfreier zu erklären. Es gibt schon lange zahlreiche eindrucksvolle Schilderungen dieser bisher einmaligen Erscheinung. Erstaunlicherweise hat sich aber bis heute in der Öffentlichkeit nur ungenügend herumgesprochen, daß Fachleute, wie die führen-



Jewgeni Krinow beim Studium von Meteoriten

den sowjetischen Meteoritenforscher *Jewgeni Krinow* und *Wassili Fessenkow* (1889–1972), seit mehr als einem Jahrzehnt einen Kometentref-fer als die wahrscheinlichste Lösung des Rätsels ansehen.

In der sowjetischen Zeitschrift „Priroda“ wurde 1969 der sehr interessante Versuch unternommen, alles, was man bis dahin als Erklärung für das Tunguska-Ereignis herangezogen hatte, statistisch auszuwerten. Die Zusammenstellung erfaßte damals 77 verschiedene Konzeptionen, die sich zu etwa 7 größeren Hypothesegruppen aufschlüsseln ließen. Mit 28 Variationen führten, fast möchte man sagen, erwartungsgemäß, die Meteoritenhypothesen das Feld der auch wissenschaftlich ernst zu nehmenden Theorien an. Auf 11 Varianten kamen die Kometenhypothesen. Sie gibt es seit 1930. Das sibirische Rätsel wurde ja erst zum großen Problem, als nicht einmal gut ausgerüstete Expeditionen der zwanziger Jahre an der vermeintlichen Einschlagsstelle des vermuteten Riesenmeteorits einen Krater fanden.

Alle weiteren Hypothesen sind eigentlich nicht mehr so recht ernst zu nehmen. Einige von ihnen zeigen uns jedoch wie ein Zeitspiegel,

welche Probleme gerade Tagesgespräch unter Wissenschaftlern und wohl auch Pseudowissenschaftlern geworden waren. So fanden sich schon bis 1969 14 kosmonautische Erklärungsversuche, in denen die mißglückte Notlandung eines außerirdischen Raumschiffs eine erhebliche Rolle spielte. Und die neuen Erkenntnisse über Antimaterie blieben natürlich auch nicht ganz ohne Einfluß auf die Diskussion um das Tunguska-Ereignis. In der „Priroda“ wurden 8 solcher Hypothesen genannt.

Was wirklich geschah, läßt sich am besten den Augenzeugenberichten entnehmen.

Der 30. Juni des Jahres 1908 hatte über weiten Teilen Südsibiriens als strahlender Hochsommertag begonnen. Doch wenige Minuten nach 7 Uhr sahen einige Fahrgäste der Transsibirischen Eisenbahn zwischen Krasnojarsk am Jenissej und Irkutsk nahe dem Baikalsee mit Entsetzen plötzlich am wolkenfreien Himmel in östlicher Richtung „eine zweite Sonne“, wie sie es beschrieben, horizontnah von Süd nach Nord vorbeiziehen. Der Feuerball ließ eine gigantische Rauchsäule hinter sich, die viele hundert Kilometer Länge hatte. Einige Minuten nach dem Untertauchen der Feuerkugel am Horizont waren heftige Explosionen zu vernehmen. Wie sich später herausstellte, hatte man sie bis in Entfernungen von mehr als 1000 km hören können. Der Sachschaden blieb glücklicherweise infolge der damals noch außerordentlich dünnen Besiedlung dieses Raums sehr gering, obwohl die Explosion Energien von 10^{15} bis 10^{17} J freisetzte, was der Sprengkraft einer mittleren Wasserstoffbombe entspricht. Menschenleben waren offensichtlich nicht zu beklagen. Die Druckwelle allerdings, die sich vom Explosionsherd durch die Atmosphäre ringförmig ausbreitete, wies in der rund 60 km südöstlich gelegenen Faktorei Wanawara an der Steinigen Tunguska, der nächsten Siedlung überhaupt, noch solche Stärke auf, daß im Freien befindliche Bewohner von ihr zur Seite geschleudert wurden.

Zu den vielen erst nachträglich erkannten Zusammenhängen und physikalischen Begleiterscheinungen gehört auch der Nachweis, daß die atmosphärische Druckwelle die ganze Erde umlaufen hat. Dieser gelang 1957 durch die gemeinsam von *Johann Wempe*, dem damaligen Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam, und Wassili Fessenkow durchgeführten Auswertungen der alten Barogramme (griech. baros = Schwere, Druck) des Potsdamer Geophysikalischen Instituts, von denen man genau die laufend aufgezeichneten Luftdruckschwankungen ablesen kann. Wenn auch nur noch mit ganz schwachem Ausschlag, so war doch deutlich genug zu erkennen, daß

die den kürzesten Weg nehmende direkte Welle den Potsdamer Barographen etwa 4,5 Stunden nach dem Ereignis überlaufen hatte, während die von Westen kommende Gegenwelle für die Strecke fast um den ganzen Erdball knapp 26 Stunden länger brauchte.

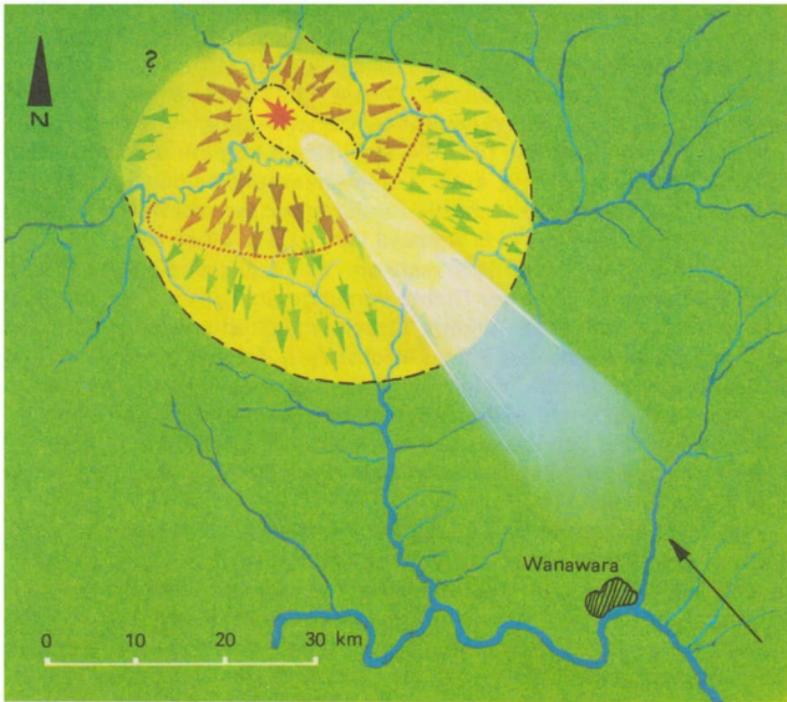
1927 rüstete die Akademie der Wissenschaften der UdSSR eine erste kurze Expedition ins Explosionszentrum aus, die den vermuteten Meteoritenkrater vermessen sollte. Nach der Rückkehr berichtete aber ihr Leiter, *Leonid Kulik* (1883–1942), daß nur ein Teilerfolg zu verzeichnen war. Die sanft hügelige Taigalandschaft ließ im Zentrum des verwüsteten Gebiets, wo nach den seismischen Aufzeichnungen des Irkutsker Meteorologischen Instituts auch das Zentrum der Explosion sein sollte, nur ein paar unbedeutende sumpfige Löcher erkennen, die kaum einige zehn Meter Durchmesser hatten. Diese „Ersatzkrater“ erwiesen sich später als normale Strukturformen der Dauerfrostbodenlandschaft, die in jenen Breiten sehr häufig vorkommen.

Während der nächsten Jahre wurden weitere Expeditionen entsandt, die länger im Untersuchungsgebiet blieben und auch bessere Ausrüstungen besaßen. Aber alle Bohrungen und Schürfarbeiten führten nicht zum Erfolg im Sinn der Meteoritenaufschlagstheorie. Man hatte sich verständlicherweise anfangs nichts anderes vorstellen können und wenigstens einige Splitter des vermeintlichen explodierten Meteorits nachweisen wollen. Als das auch während zweier weiterer Expeditionen bis 1930 nicht gelang, wurden die Wissenschaftler immer nachdenklicher. Die Explosion hatte stattgefunden, daran gab es keinen Zweifel. Sodosagen als Ersatz für die fehlenden Krater waren nämlich ihre sonstigen Begleiterscheinungen trotz der inzwischen vergangenen Zeit noch sehr gut erhalten geblieben.

In der Kernzone des Gebiets der Zerstörungen von etwa 5 bis 10 km Durchmesser hatten alle frei stehenden Bäume ihre Äste verloren. Noch 20 Jahre nach der Katastrophe herrschte der Typ des abgestorbenen „Telegrafentangenwalds“ vor. Eindeutig waren die Baumkronen verbrannt oder versengt. Daran schloß sich, etwas vom Mittelpunkt abweichend, ein fast kreisförmiges Gebiet von beinahe 40 km Durchmesser an, in dem die meisten Stämme strahlenförmig nach außen umgelegt waren. Man konnte also den Eindruck gewinnen, daß im Zentrum der Zerstörungen die Druckwelle mehr senkrecht von oben gewirkt hatte, während mit zunehmender Entfernung vom Explosionszentrum der seitliche Stoß immer wirksamer wurde.

Die Wissenschaftler *Fred Lawrence Whipple* aus den USA (1930) und *Igor Astapowitsch* aus der UdSSR (1933) gehörten damals zu den ersten,





Vereinfachte Situationsskizze vom Ort der vermuteten Kometenexplosion in Sibirien

-  Explosionszentrum
-  Grenze des Waldbrands
-  Anflugrichtung des kosmischen Körpers
-  Gürtel des „Telegrafentangenwalds“
-  Gürtel der nach außen umgelegten Bäume

die an einen Zusammenstoß mit dem Kern eines kleinen Kometen glaubten. Beide bezogen für diese Erklärung auch einige bis dahin weniger beachtete optische Erscheinungen der Atmosphäre ein. So war

Noch heute, rund 70 Jahre nach der kosmischen Katastrophe, trägt die Taiga ihre Spuren.

die Nacht nach der Explosion infolge feinverteilten Staubs in der Hochatmosphäre außerordentlich hell. Im Kaukasus zum Beispiel soll die Helligkeit ausgereicht haben, um selbst gegen Mitternacht noch im Freien Zeitung lesen zu können. Dieser Effekt schwächte sich dann allmählich ab, war aber erst nach zwei Monaten ganz verschwunden.

Wassili Fessenkow hat 1969 die inzwischen von den meisten Fachkollegen geteilte Theorie einer Kometenkernexplosion übersichtlich dargestellt. Demzufolge sieht die moderne wissenschaftliche Version des Ablaufs der Tunguska-Ereignisse von 1908 etwa so aus:

Am Morgen des 30. Juni 1908 raste ein Komet, dessen Kopf annähernd 1 km Durchmesser bei einer Dichte von ungefähr 0,1 im Vergleich zum Wasser hatte, mit etwa 40 km/s Geschwindigkeit im spitzen Winkel auf die Erdoberfläche zu. Beim Durchstoßen der dichteren Schichten der Atmosphäre setzte infolge der Reibungshitze und verstärkt durch die vor der Kometenstirn aufgestauten Luftmassen in ungefähr 120 km Höhe die Zerstörung des Kometen ein, erkennbar an dem gewaltigen Rauch- und Feuerschweif, den das kosmische Geschoß hinter sich ließ.

Fessenkow nahm an, daß die Explosion in etwa 10 km Höhe erfolgte. Nach seiner Auffassung ist die atmosphärische Trübung, die das Nachtleuchten bewirkte, auf über 1 Million t zerstäubter Kometenmaterie zurückzuführen. Diese wurde nicht nur vom Kopf freigesetzt, sondern stammte auch von einem damals kaum erkennbaren Schweif, dessen Staubmassen zusätzlich in 350 bis 600 km hohen Schichten der Atmosphäre ein starkes Nachtleuchten verursachten.

Die Universität Tomsk führt seit 20 Jahren Expeditionen in das Katastrophengebiet durch. Dabei brachte gerade in jüngster Zeit die Untersuchung des kosmischen Staubs in Boden- und Torfproben wesentliche neue Ergebnisse. Hiernach schließen der hohe Natrium- und Siliziumanteil wie auch die Häufigkeit der Elemente der seltenen Erden die Herkunft vom Mond ebenso aus wie die Zugehörigkeit zur bisher bekannten Meteoritensubstanz.

Die kosmisch-geologischen Konsequenzen eines tatsächlichen, noch dazu so gegenwartsnahen Kometentreffers auf der Erde können wir bis jetzt nur ahnen. Eine ganze Reihe neuer Fragen drängt sich auf: Sind Kometentreffer vielleicht doch viel häufiger, als wir bisher aus der Statistik schlußfolgerten? Geowissenschaftler reagieren immer skeptisch, wenn gerade sie Zeugen eines Jahrmillionenereignisses geworden sein sollen. Bedenken wir aber auch, daß dieser Tunguska-Komet vor seinem Sturz auf die Erde unbekannt war, also gar nicht zur

Schar derer zählte, welche die Trefferstatistik erfaßte. Es kann folglich viel mehr von ihnen geben, als man bislang annahm. Und außerdem werden die geologisch gesehen schwachen Oberflächenveränderungen, die solche Zusammenstöße bewirken, schon nach Jahrhunderten getilgt sein. Derartige Kollisionen können sich demnach in vorgeschichtlicher Zeit auch ereignet haben, ohne uns irgendwelche geologischen Zeugnisse zu hinterlassen. Dies schließt nicht aus, daß erhebliche atmosphärische Störungen auftraten, denen bei größeren Ereignissen wegen des Staubs in der Erdatmosphäre sogar eine Zeitlang gewisse Klimaveränderungen folgten.

Meteoritenkrater werden erforscht

Haben wir uns soeben mit kosmischen Zusammenstößen beschäftigt, die trotz heftiger Explosionen und anderer eindrucksvoller Begleiterscheinungen in der Atmosphäre gar keine tiefen Wunden in der Erdoberfläche hinterlassen müssen, so interessiert uns nun der gegenteilige Fall, der Einschlagskrater eines kosmischen Geschosses, ohne daß wir vom Vorgang selbst Zeugnisse besitzen. Die Meteoritenkrater der Erde sind nämlich meist sehr alt, oft bereits vor Millionen Jahren entstanden. Aber an ihnen läßt sich dennoch viel von den Erscheinungen studieren, welche die Satelliten von heute und die Raumfahrer von morgen auf anderen Himmelskörpern schon weit zahlreicher angetroffen haben beziehungsweise noch antreffen werden. Kein Wunder also, daß sich die Forschung, besonders seit es die Raumfahrt gibt, mit ihnen sehr gründlich befaßt.

Die Zuwachsrate an neuentdeckten irdischen Meteoritenkratern war folglich in den vergangenen beiden Jahrzehnten enorm hoch. 1934 konnte der bekannte Jenaer Mineraloge *Fritz Heide* (1891–1973) erst 10 solcher Krater als bekannten Bestand der Erde beschreiben. Bis dahin hatte lange Zeit nur ein einziger von ihnen als gesicherter Einschlag eines Meteorits auf der Erde gegolten: der auf der wüstenartigen Hochfläche Nordamerikas beim Cañon Diablo im Staat Arizona gefundene Krater mit etwas über 1 km Durchmesser und einem Alter von rund 6 000 Jahren.

Heute zählen wir selbst nach pessimistischen Schätzungen 15 sicher, 50 wahrscheinlich und 40 möglicherweise durch Meteoriteneinschlag entstandene Einzelkrater oder Kraterkomplexe. Es gibt aber auch

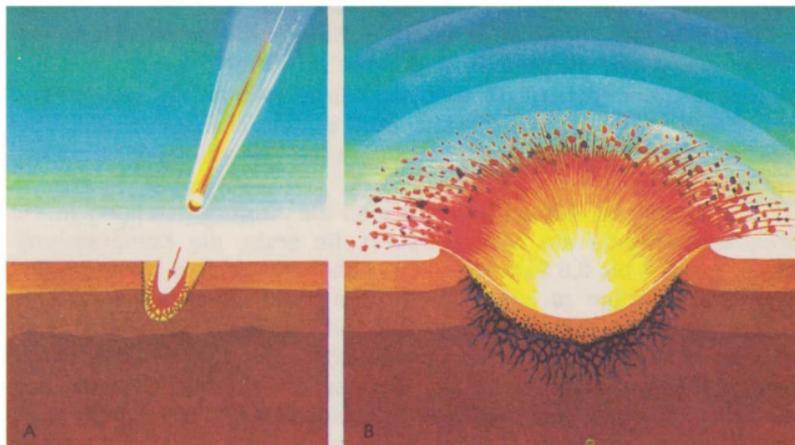
Kraterkataloge, die alles verzeichnen, was irgendwie in den Verdacht geriet, von einem kosmischen Geschoß herzurühren. Mehr als 200 Vorkommen werden darin zur Diskussion gestellt, wovon man gewiß einiges wieder streichen muß. Es dürfte aber genauso sicher sein, daß sich bisher noch unerkannte Strukturen in Zukunft hinzugesellen.

Schon seit einiger Zeit gehört die Sowjetunion zu den Ländern, aus denen recht oft Entdeckungen dieser Art an die Öffentlichkeit gelangen, und nicht selten befinden sich stark erodierte Ringstrukturen darunter, die 10 bis über 100 km Durchmesser aufweisen. Viele der größeren Meteoritenkrater haben die gleiche oder eine sehr ähnliche Deutungsgeschichte: Zunächst hielt man sie für ein Ergebnis des Wirkens erdinnerer, also vulkanischer Kräfte, bis sich oft erst nach einer jahrelangen Phase des Meinungsstreits die Beweiskraft der Belege für den Einschlag eines Himmelskörpers durchzusetzen begann.

Ein Beispiel, für dessen Erörterung eine Menge Tinte verbraucht worden ist, stellt der schon erwähnte Explosionskessel des Ries dar, den man noch bis etwa 1960 fast ausschließlich als tertiären vulkanischen Ausbruch ansah.

Die entscheidende Wende brachte hier der ungefähr zu diesem Zeitpunkt geglückte Nachweis einer besonderen Modifikation des Quarzminerals in den Gesteinstrümmern des Ries, Coesit genannt. Dieses Mineral kann nur unter so extremen Druck- und Temperaturbedingungen entstehen, wie sie bei vulkanischen Explosionen nie vorkommen. Coesit wurde daher zum Testmineral für Meteoritenkrater aller Kontinente. 1961 erkannte man in Moskauer Labors eine noch viel dichtere Packung der Sauerstoffatome um das Silizium, die nach einem ihrer Entdecker (*Stichowa*) den Namen Stichowit erhielt. Hatte der amerikanische Chemiker *Loring Coes* 1952 die nach ihm benannte Form des Quarzes bei Temperaturen von 800 bis 1100 K und 35000 atm synthetisieren können, so gelang dies den sowjetischen Forschern *Stichowa* und *Popowa* mit ihrer neuen Quarzphase bei 160000 atm und Temperaturen von 1500 bis 1700 K. Heute ist bekannt, daß der Coesit mit einer Dichte von 2,93 zwischen 20000 und 40000 atm den „lockerer“ gepackten Quarz der Dichte 2,65 ablöst und daß die noch erheblich gesteigerte Verdichtung zum Wert 4,3 für den Stichowit sich erst bei 110000 bis 130000 atm vollzieht.

Das Schema eines senkrechten Schnitts durch einen Meteoritenkrater zeigt die vor allem bei Kraterdurchmessern von etwa 10 bis 100 km als typisch erkannte Zoneneinteilung. Vom Explosionsherd aus folgt entsprechend den Gesetzen der Energieabstrahlung auf einen innersten



Phasenschema zur Meteoritenkraterentstehung

A = Der kosmische Körper dringt in den Boden eines Schichtgesteins.

B = Hauptphase des Massenauswurfs und der Entstehung des Kraterwalls

- | | | | |
|--|------------------------------------|---|---------------------------|
|  | Substanz des kosmischen Geschosses |  | Schichtgestein |
|  | sich auflösende Gesteinsmassen |  | zerrüttete Gesteinsmassen |
|  | sich ausbreitende Stoßwelle |  | Auswurfmaterial |

Verdampfungsgürtel eine schmalere Zone mit vorwiegender Verflüssigung der Materie, und daran schließt sich der breite Gürtel zerrümperten Gesteins an, dessen Zerrüttungsgrad nach außen bis zum Übergang ins unbeschädigte Gestein allmählich nachläßt.

Die Geschwindigkeit, mit der größere meteoritische Körper auf die Erde treffen, kann theoretisch zwischen 11 und fast 72 km/s schwanken. Am häufigsten schlagen solche kosmischen Körper aber mit 20 bis 50 km/s ein. Der Meteorit muß vor seinem Eintritt in die Atmosphäre mehr als 10t wiegen, sonst reicht der Energieverlust durch die atmosphärische Abbremsung nicht mehr für die Kraterbildung aus. Man rechnet für den Aufschlag etwa mit Mindestgeschwindigkeiten von 5 km/s an aufwärts, sollen kraterformende Prozesse ausgelöst werden. Um ein Beispiel zu nennen: Ein 10-t-Objekt verliert durch die atmosphärische Bremse etwa die Hälfte seiner kosmischen Geschwindigkeit. Nehmen wir einmal an, das Geschoß näherte sich mit einer Relativ-

geschwindigkeit von 40 km/s der Erde, dann müßte es die Oberfläche unseres Planeten immer noch mit rund 20 km/s „Fahrt“ berühren.

Was sich unter solchen Bedingungen im Kontaktbereich der aufeinandertreffenden Materie abspielt, wurde zwar schon weitgehend rechnerisch verfolgt und analysiert; doch es fällt schwer, den sich dabei praktisch vollziehenden Prozeß zu begreifen oder ihn sich vorzustellen.

Nach moderner Auffassung teilt man die Kraterentstehung in ein Dreiphasenschema ein. Davon dauert die erste, die Kompressionsphase, nur 0,4 bis 0,6 Sekunden – in Abhängigkeit vom Material, und zwar bleibt sie um so kürzer, je dichter es ist. In dieser minimalen Zeitspanne durchläuft eine Stoßwelle mit Überschallgeschwindigkeit den gesamten Meteorit und strahlt zunächst auch fast genauso schnell in das Nebengestein ab. Da sie sich viel rascher als der Schall ausbreitet, wird das atomare Gefüge der betroffenen Materie total zerstört. Kompakte meteoritische Gesteinskörper wie auch Metalle, die unter normalen Hochdruckbelastungen an der Erdoberfläche als inkompressibel (nicht zusammendrückbar) gelten, können beim Einschlag auf fast die Hälfte ihres Ursprungsvolumens verdichtet werden. Die freigesetzte Energie reicht aus, ein Vielfaches der Eigenmasse des Aufschlagkörpers zu verdampfen; denn am Aufschlagpunkt entstehen unter einem Druck bis zu Millionen Atmosphären Temperaturen von 10 000 bis 20 000 K. Und dennoch, die unregelmäßige Gestalt der Meteorite oder andere Sonderbedingungen, die wir noch nicht ganz durchschauen, scheinen der Theorie ein Schnippchen zu schlagen – überleben doch in vielen Fällen, wo es die Berechnung eigentlich verbietet, geringe Bruchteile der ursprünglichen meteoritischen Substanz den Aufschlag unverdampft.

Ein anschauliches Beispiel hierfür sind die zahlreichen Eisennickelbrocken im Streufeld des großen Arizonakraters, dessen Entstehungsprozeß als einer der ersten rechnerisch nachgezeichnet wurde.

Der das Gestein extrem verdichtenden Stoßwelle folgt eine Verdünnungswelle, die zur Auswurfphase führt, während der die herausgeschleuderten Massen die eigentliche Hohlform des Kraters entstehen lassen. Der Auswurf, auch Ejektion genannt, vollzieht sich unter chaotischer Mischung von Materie aller drei Aggregatzustände – fest, flüssig und gasförmig – und mit zunehmenden Anteilen des Nebengesteins. Diese Phase dauert je nach Größe des Kraters einige Minuten bis wenige Stunden. Währenddessen können zahlreiche Brocken die junge, sich erweiternde Austrittsöffnung mit solcher Wucht verlassen,

daß sie bis über die Stratosphäre hinausgeschossen werden, ehe sie wieder in den Krater oder dessen Nachbarschaft stürzen.

Sobald der Auswurf zurückgefallen und die Entgasung stark im Abklingen ist, beginnt auch schon die dritte Phase, der Alterungs- oder Zerfallsprozeß am Krater. Sie bedeutet fast immer eine zunehmende Einebnung, wobei zunächst das instabile Randlelief durch Hangrutschungen sehr schnell viel von seiner Steilheit verliert. Oft läuft später das Innere des Kraters voll Wasser, so daß sich eine für Geologen höchst aufschlußreiche Binnenseesedimentation einstellen kann. Nicht selten, wie auch beim Nördlinger Ries, haben die daraus geborgenen fossilen Muscheln, Schnecken oder anderen Organismenreste wichtige Rückschlüsse auf das wahre Alter des Kraters ermöglicht.

Betrachten wir die Häufigkeit und das Alter der Meteoritenkrater an der Erdoberfläche, dann fallen sofort drei Erscheinungen auf: Erstens finden wir solche Strukturen innerhalb der einzelnen Kontinente sehr ungleich verteilt. Zweitens sind die meisten der irdischen Krater, verglichen mit dem Gesamtalter der Erde, relativ jung, auch wenn sie vor Millionen Jahren entstanden; denn die Erdgeschichte zählt nach Milliarden Jahren. Drittens ergibt sich ein hoher Anteil von Großkratern mit Durchmessern über 10 km, die, obwohl schlecht erhalten, noch eindeutig eine Doppelringstruktur erkennen lassen.

Zu den eindrucksvollsten Beispielen hierfür gehört der Clearwater-Kraterkomplex auf Labrador nahe der Hudsonbai im Nordosten Kanadas. Luftbilder zeigen am besten die wesentlichen Merkmale dieses kosmischen Doppelschlags. Der westliche und größere der beiden Krater hat einen Außendurchmesser von rund 32 km und der östliche von etwa 20 km. Wie der Name (engl. clear water = klares Wasser) schon andeutet, sind sie beide von Seen erfüllt, deren Uferlinien im Zusammenhang mit der dazugehörigen Inselwelt den tektonischen Feinbau dieser kanadischen Gneislandschaft im Luftbild kontrastreich wiedergeben. Am auffälligsten hebt sich ein Inselring ab, der mit etwa 16 km Durchmesser den Hauptkrater nochmals untergliedert.

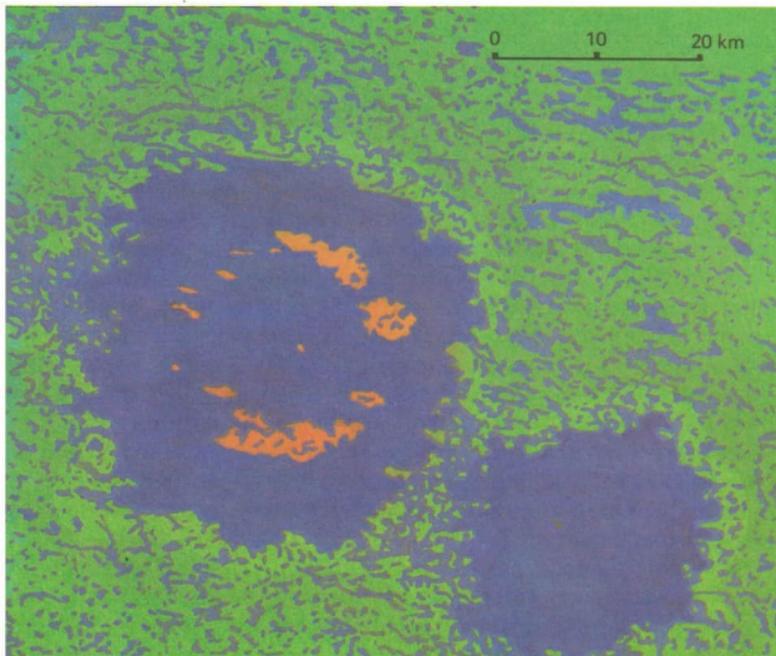
Genauere geologische Profile sowie in beiden Kratern eigens zur Erforschung der Struktur niedergebrachte Bohrungen bestätigten durch die dabei gefundenen, stark zertrümmerten Gneismassen den Einschlag zweier Himmelskörper.

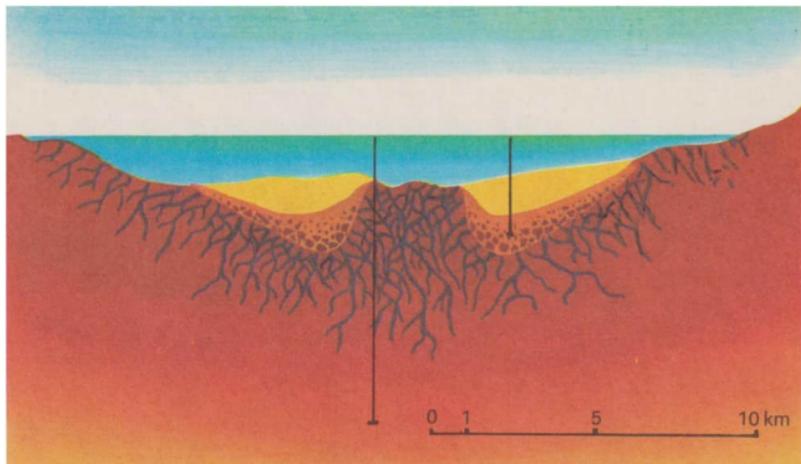
Die Profile zeigen ferner, daß in beiden Clearwater-Kratern noch eine zentrale Aufwölbung vorhanden ist, die aber die Seeoberfläche nicht erreicht, im Luftbild also noch nicht sichtbar wird. Solche Strukturen erinnern an die Zentralberge der Krater auf dem Mond oder auf Mars

und Merkur. Die Mehrfachringstrukturen fehlen auf diesen drei Himmelskörpern auch nicht. Im Gegenteil, besonders der Erdtrabant weist eine Vielzahl von Objekten auf, die gesetzmäßig mit wachsender Kratergröße etwa ab 100 km Durchmesser Übergangsformen von Kratern mit einfach gebauten Zentralbergen zu solchen erkennen lassen, bei denen sich daraus ein immer deutlicher werdender zweiter Ring entwickelt.

Zur Zeit diskutieren die Wissenschaftler noch folgende Möglichkeiten: Können die Zentralberge vulkanische Förderprodukte in Meteoritenkratern darstellen? Oder sind sie samt den Innenringsystemen allein schon aus der Dynamik der beim Einschlag auftretenden Prozesse abzuleiten, das heißt im übertragenen Sinn etwa jenen uns allen bekannten Momentbildern vergleichbar, welche den Einschlag eines

*Ringstrukturen des meteoritischen Doppelkraters vom Clearwater-Lake auf Labrador (Kanada) nach Luftaufnahme
Blau = Seen im alten Kristallin*





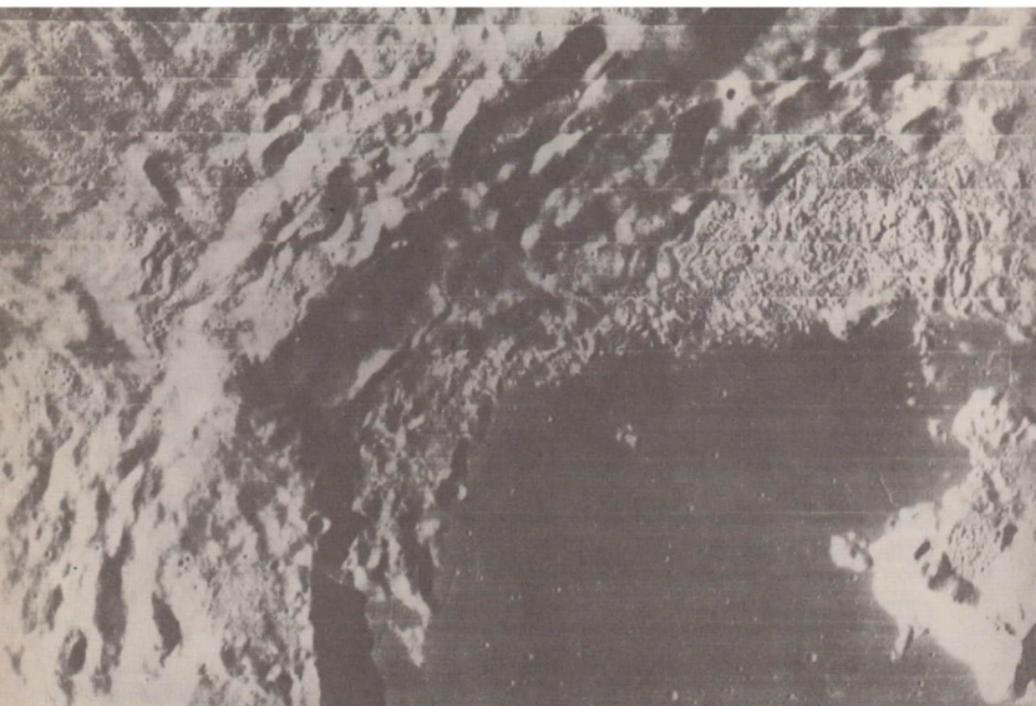
Profilschnitt durch den kleineren Labradorkrater

- kristallines Grundgebirge, zum Teil zerrütteter Gneis
- grobe Trümmersedimente
- jüngere Sedimente, rund 200 Millionen Jahre alt
- | | Bohrungen

kompakten Körpers in eine Flüssigkeit zeigen: Die auftretenden Rückstoßkräfte erzeugen für kurze Augenblicke im Einsturzzentrum einen Flüssigkeitsberg, bis daraus die nach außen wandernden Ringe entstehen.

Hier bieten die zahlreichen neu entdeckten irdischen Meteoritenkrater eine günstige Vergleichsmöglichkeit. Obwohl die Forschungen bei weitem noch nicht abgeschlossen sind, können wir schon jetzt festhalten, daß die Zentralberge der Einschlagskrater auf dem Mond und auf der Erde im allgemeinen nicht von vulkanischer Tätigkeit herrühren. Doch über das Zustandekommen der Ringsysteme gibt es nach wie vor gegensätzliche Meinungen. Vergessen wir nicht, die Entstehung eines Kraters von Kilometerdurchmesser hat sich noch nie vor unseren Augen abgespielt. Wir sehen also immer nur das Fertigprodukt, dessen Erzeugung nicht zuletzt von kosmischen Geschossen abhängt, die nach Dichte, Masse und Geschwindigkeit recht verschieden sein können.

Nach der allgemeinen Auffassung sollen sich Masse und Ge-



Krater Ziolkowski, aufgenommen von dem amerikanischen Mondsatelliten „Lunar Orbiter 3“, gehört zu den jüngsten Großkratern auf der Rückseite des Mondes. Die Basaltlava, die seinen Zentralberg rechts unten im Bild umfließt, dürfte aber dennoch über 3 Milliarden Jahre alt sein.

schwindigkeit weitestgehend vertreten können. Das heißt, ein kleiner kosmischer Körper mit hoher Geschwindigkeit müßte in der Lage sein, die gleiche Kratergröße zu erzeugen wie ein relativ langsamer, aber massereicherer. Doch inwieweit gilt das auch für die Form? Wie wirkt sich beispielsweise die zu erwartende unterschiedliche Eindringtiefe aus? Bringen wir außerdem die veränderliche Dichte der Himmelskörper ins Spiel, dann besteht kaum noch ein Zweifel, daß sich dies in der Kraterform stärker bemerkbar macht – aber wie? Auch Kometen müssen ja die Erde, den Mond und die übrigen Planeten mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten getroffen haben; aber wodurch kön-

nen wir ihre Spuren von denen der Meteorite unterscheiden? Bedenken wir zum Beispiel, daß die Skale der Dichteunterschiede, angefangen von der Substanz im Kometenkopf bis hin zum Nickeleisenmeteorit, vermutlich eine Spanne von 1 zu 100 umfaßt und daß bereits die kohligen Chondrite unter den Meteoriten sehr brüchige, zum Zerfall neigende Körper bilden. Dann vermögen wir uns leicht vorzustellen, daß sich derartige Lockermassen schon vor dem Aufschlag, beim Anflug im Schwerefeld der Erde oder anderer Himmelskörper aufzulösen beginnen, vor allem, wenn dieser Anflug mit relativ spitzem Winkel zur Oberfläche erfolgt. Manche Zwillingsskrater des Mondes und vielleicht auch der Clearwater-Komplex könnten so entstanden sein.

Möglicherweise läßt uns eines Tags die genauere Analyse der Mondkrater nicht mehr nur zahlenmäßig auf Himmelskörperhäufigkeiten in längst vergangenen Epochen unseres Sonnensystems schließen, sondern gibt uns zudem Auskünfte über deren Zusammensetzung. Wieviel das dazu beitragen würde, die Entstehung unseres Planetensystems zu enträtseln, können wir lediglich ahnen. Auf jeden Fall würde aber die heute allgemein bedauerte Einförmigkeit der „nur“ Kraterlandschaften zeigenden Himmelskörper von Planetoiden- bis Merkurgröße dann erheblich mehr Zeugnis kraft für die Erforschung unserer engeren kosmischen Welt erhalten.

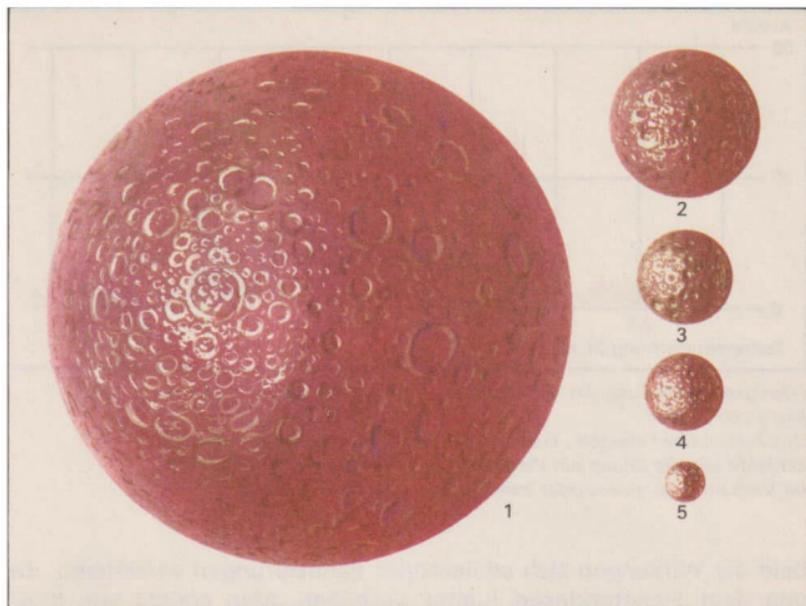
Es gibt bereits erste vorsichtige Versuche, durch statistische Auswertung der irdischen Meteoritenkrater in größeren Struktureinheiten Aussagen über die Häufigkeit von Zusammenstößen der Erde mit kosmischen Körpern zu erlangen. Wegen der Spärlichkeit des überlieferten Materials können dafür nur wenige geologische Komplexe herangezogen werden. Am ehesten scheint sich noch der Nordosten Kanadas zu eignen. Man glaubt, hier schon seit einigen Jahren die Großkrater über 20 km Durchmesser vollständig verzeichnet zu haben. Auf eine Fläche von etwa 1 Million km², die Labrador und seine nähere Umgebung umfaßt, kommen danach 4 solcher Astrobleme, die in einer Zeitspanne von rund einer halben Milliarde Jahren entstanden sein sollen. Bei aller noch vorhandenen Unsicherheit ließe sich daraus schon eine Größenordnung des kosmischen Bombardements ableiten, die sich ungefähr mit der der jüngeren Mondgeschichte deckt.

Gefährliche kosmische Geschosse

Aus der meßbaren Häufigkeit der Begegnungen der Erde mit den „kleinen“, kiloschweren Meteoriten hat man auf die Zahl der Zusammenstöße mit den großen, Millionen Tonnen wiegenden Objekten zu schließen versucht und ist für die gesamte Erdkugel auf einen Großmeteoritentreffer vom Format eines Kubikkilometers in rund einer Million Jahre gekommen. Es wurde auch schon frühzeitig vermutet, daß die Vorratskammer für diese Riesenblöcke der Planetoidengürtel mit seinen Zehntausenden von Zwergplaneten bilden könnte. Seit langem besteht daran kein Zweifel mehr. Heute interessieren die viel spezielleren Fragen nach Form und Inhalt dieser Kleinplaneten. Sind sie – oder wenigstens die größten Objekte – wohlgerundete, ursprüngliche Körper? Wie viele von ihnen sind Splitter, Planetentrümmer also, und wie kann man sie eventuell schon aus größerer Entfernung identifizieren? Dies und alles, was zum Beispiel aus der Substanz zur Entzifferung der Entstehungsgeschichte dieser Gruppe und des ganzen Planetensystems beizutragen vermag, steht zur Zeit an erster Stelle in den Forschungsprogrammen.

Über 2100 Kleinplaneten wurden in ihren Bahnelementen inzwischen so gut bestimmt, daß man ihnen ihre endgültige Katalognummer und auch einen Namen geben konnte. Diese sicher bestimmten Mitglieder des Planetoidengürtels bilden aber – bezogen auf die Gesamtzahl, nicht auf die Masse – nur eine kleine Minderheit. Über 4000 wurden wenigstens schon einmal beobachtet, ohne daß allerdings die Zeit für eine genaue Bahnbestimmung genügte. Auf der Grundlage des umfangreichen statistischen Materials schätzt man heute, daß der Planetoidengürtel mindestens 10000 Kleinplaneten enthält, deren Durchmesser 10 km überschreitet; und die Zahl der Körper über 1 km Durchmesser wird sogar bei 3 Millionen vermutet. Alle Planetoiden zusammen, deren Durchmesser 7 m übersteigt, sollen 10^{12} , also 1 Billion Objekte, ergeben. Dennoch wird ihre Gesamtmasse erheblich geringer als die der Erde eingeschätzt. Schon wegen der sonst meßbaren Auswirkungen auf die Erdbahn dürfte dieser Betrag eine halbe Erdmasse nicht überschreiten. Gegenwärtig veranschlagen die Wissenschaftler die Gesamtmasse auf wenig mehr als das Doppelte des größten dieser Zwerge, der zuerst entdeckten Ceres, die etwa 1000 km Durchmesser haben soll.

Schon im vorigen Jahrhundert, bald nachdem die ersten 100 Exemplare der statistischen Auswertung zur Verfügung standen, wurde klar, daß sich der Aufenthaltsraum der Kleinplaneten sehr weit erstreckt. Die



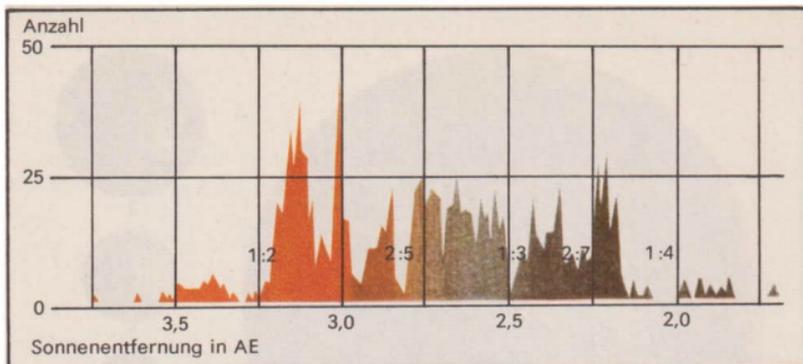
Durchmesser der großen, zuerst entdeckten Planetoiden im Vergleich zum Mond (in km)

1 = Mond (3476); 2 = Ceres (1003); 3 = Pallas (608); 4 = Vesta (538); 5 = Juno (247)

Anhänger der Hypothese, diese Himmelskörper seien Planetentrümmer, verwunderte es gar nicht, daß die Hauptmasse der Planetoiden über einen Entfernungsbereich von 2,1 bis 3,4 AE verstreut schien. Es paßte auch zu dieser Theorie, daß ihre Bahnen im Mittel erheblich exzentrischer verliefen, also elliptischer gestaltet waren, als die der normalen Planeten. Und die oft beträchtlichen Abweichungen von der mittleren Bahnebene der größeren Planeten – bis zu mehr als 30° wie etwa bei Pallas – konnte man ebenfalls auf Zusammenstöße zurückführen.

Die rund 2000 bekannten Kleinplanetenbahnen verteilen sich aber keineswegs regellos auf den Raum zwischen Jupiter und Mars. Vielmehr lassen sich in ihrer Verteilungsdichte eine ganze Reihe von Maxima und Minima unterscheiden, die einer speziellen Erklärung bedürfen.

Fünf besonders große Häufigkeitslücken im Hauptfeld wurden sehr



Häufigkeitsverteilung im Hauptschwarm der Planetoiden zwischen Mars und Jupiter

Die Zahlen über einigen „Lücken“ der Häufigkeit geben an, wie viele Umläufe um die Sonne ein Planetoid der entsprechenden Entfernung im Verhältnis zu einem oder zwei Jupiterumläufen ausführt.

bald als Wirkungen sich addierender Bahnstörungen verstanden, die von dem Planetenriesen Jupiter ausgehen. Man spricht von *Kommensurabilitätslücken* (lat. *kommensurabel* = zusammen meßbar), weil sie sich gerade dort befinden, wo sich das Verhältnis der Umlaufzeiten Jupiters und der Planetoiden in einfachen ganzen Zahlen ausdrücken läßt, also etwa 1 : 2 und 1 : 3 oder 2 : 5 sowie 3 : 7 und 3 : 10, um die intensivsten zu nennen. Die in den entsprechenden Räumen heute fehlenden Kleinplaneten wurden durch die Massenanziehung Jupiters zum Verlassen ihrer Bahnen gezwungen. Es wäre möglich, daß sie infolge von Bahnkreuzungen mit anderen Planetoiden zusammenstießen und daß die Trümmer solcher Zwergplaneten Meteoritenschwärme ergaben.

Auch in größerer Erdnähe hat man in jüngerer Zeit Planetoiden neu entdeckt. Es fing ganz harmlos an: Im Jahre 1873 wurde mit *Aetha* (Nr. 132) vorübergehend ein Kleinplanet beobachtet, der sich zeitweilig schneller als Mars um die Sonne bewegt. Dieser Brocken von vermutlich 40 km Durchmesser blieb ziemlich lange der einzige bekannte Planetoid, der die Marsbahn kreuzte.

Erst 25 Jahre später kam dem Berliner Astronomen *Gustav Witt* (1866–1946) mit *Eros* (Nr. 433) ein zweiter Kleinplanet dieser Gruppe zu Gesicht. Doch diesmal wirkten die Bahndaten alarmierender. Der

sonnennächste Punkt lag für den auf etwa 20km Durchmesser geschätzten Planetoiden bei nur 1,13 AE. Damit konnte er der Erde näher kommen als irgendein anderer bis dahin bekannter Himmelskörper mit Ausnahme des Mondes, nämlich auf etwa 20 Millionen km. Das ist die Hälfte des minimalen Venusabstands. Der erste nahe Vorbeigang des Eros an der Erde erregte bereits Aufsehen und brachte als wohl wichtigstes wissenschaftliches Ergebnis die Erkenntnis seiner erheblich von der Kugelform abweichenden Gestalt. Aus der fliegenden „Zigarre“ von $22\text{ km} \times 8\text{ km}$ ist heute nach dem zweiten nahen Vorbeigang von 1975, der eine verbesserte Bestimmung der Gestalt ermöglichte, die fliegende Platte mit den Maßen $7\text{ km} \times 19\text{ km} \times 30\text{ km}$ geworden. Damit könnte man ihn auch als noch uneingefangenen, selbständig kreisenden Bruder der Marsmonde bezeichnen; denn in Form und Dimension nehmen sich diese Körper nicht viel. Die inzwischen genauer vermessenen Marsmonde müssen ja ebenfalls durch Angabe mehrerer verschiedener langer Achsen charakterisiert werden. Für den schnellen Phobos, der den Mars in nur 7 Stunden umkreist, gelten die Maße $20\text{ km} \times 23\text{ km} \times 28\text{ km}$ und für den kleineren Deimos auf der ferneren 30-Stunden-Umlaufbahn $10\text{ km} \times 12\text{ km} \times 16\text{ km}$. Die Wissenschaftler rechnen heute damit, daß noch mindestens 5000 Körper dieser Größenordnung im Planetoidengürtel zwischen Jupiter und Mars ihre stille Bahn ziehen.

Nach der Entdeckung des Eros hat man in immer geringeren Zeitabständen solche die Marsbahn kreuzenden Planetoiden gefunden. Von ihnen verdient der am 12. März 1932 gesichtete Amor als Zwerg unter den bis dahin erkannten Kleinplaneten besondere Beachtung. Mit einem geschätzten Durchmesser von etwa 700 bis 800 m gehört er nicht nur zu den kleinsten aller bisher entdeckten Planetoidenkörper, er war auch mit lediglich 15 Millionen km minimalem Abstand wenigstens vorübergehend der erdnächste.

Doch nur rund einen Monat später, am 24. April 1932, bestätigte die Entdeckung des winzigen Apollo durch den Astronomen *Karl Reinmuth* (1892–1979) das, was man nach der Vielzahl weit vom Aufenthaltsbereich zwischen Mars und Jupiter abweichender Planetoidenbahnen längst erwartet hatte: Die Irläufer der Kleinplaneten machen auch vor der Erdbahn nicht halt und wagen sich noch weiter ins Innere des Sonnensystems vor. Der Planetoid Apollo mit 2km Durchmesser wurde so zum Symbol einer Gruppe von Kleinplaneten, die nach ihren gegenwärtigen Bahnelementen eines Tages mit der Erde zusammenstoßen können. Apollo verschwand allerdings 1932 so schnell wieder aus dem

Blickfeld irdischer Beobachter, daß sich seine Bahn nur provisorisch bestimmen ließ. Erst nach seiner Wiederentdeckung 1973 stellte man eindeutig fest, daß er bei einem Perihel – also dem sonnennächsten Punkt seiner Bahn – von lediglich 0,66 AE auch noch die Venusbahn überqueren könnte.

Bis 1976 war die Zahl der Planetoiden vom Typ Apollo bereits auf 20 angewachsen, darunter so berühmte Objekte wie der 1,3 km große, 1949 entdeckte Icarus (Nr. 1566), der sich der Erde sogar auf rund 7 Millionen km zu nähern vermag, oder der 1951 zum erstenmal gesichtete, ebenfalls recht unregelmäßig gestaltete Geographos (Nr. 1620) mit 2 bis 3 km Durchmesser sowie der 1948 entdeckte, mit 4 km noch relativ große Toro (Nr. 1685). Von ihm wissen wir, daß seine Bahn so stark vom Schwerefeld unseres Planeten und der Venus beeinflusst wird, daß sie sich schon im Zeitraum von Jahrtausenden wesentlich verändert.

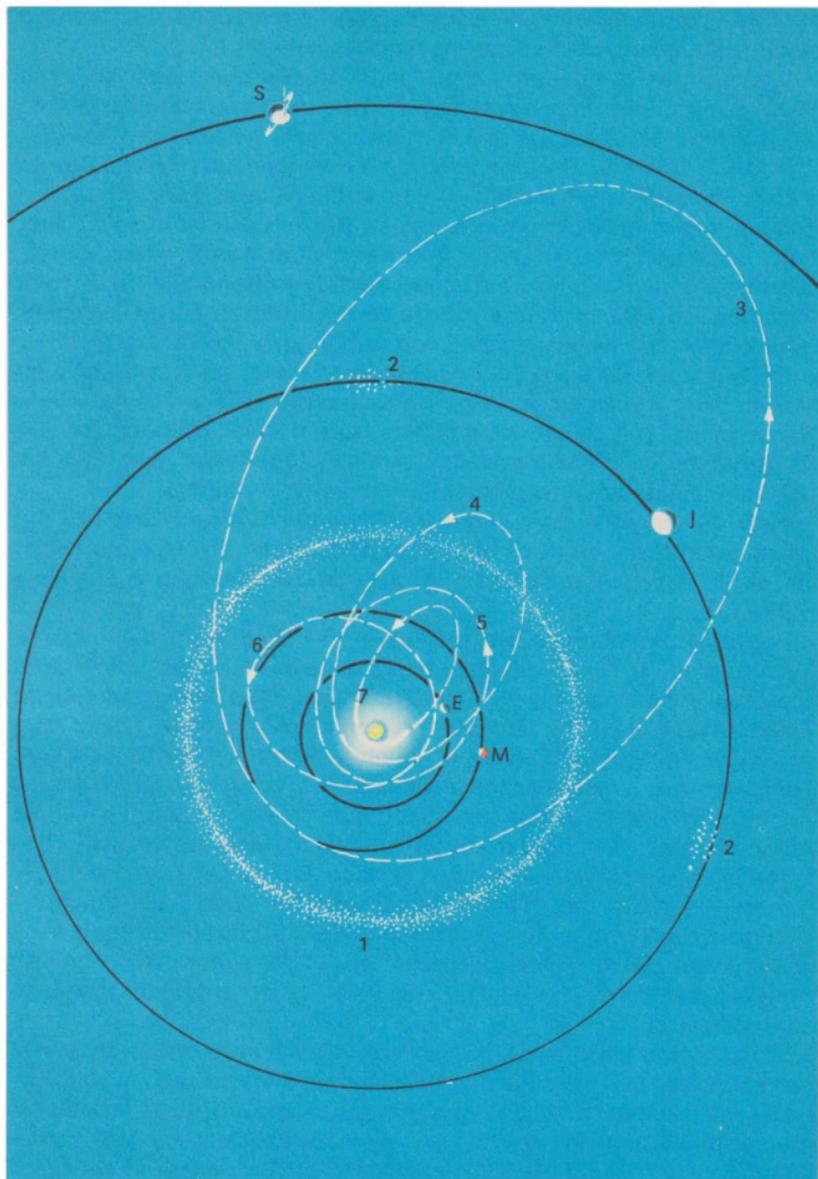
Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die bis heute aufgefundenen Mitglieder der Apollogruppe bei weitem noch nicht repräsentativ sein dürften für die tatsächlich vorhandene Anzahl. Nach Whipple wird die Zahl der die Erdbahn überschreitenden Kleinplaneten mit einem Durchmesser größer als 2 km allein schon auf etwa 100 veranschlagt, und die kleineren dazugerechnet, sollen es mehrere tausend sein. Nach dem Astronomen *Ernst Julius Öpik* hat ein Apollo-Planetoid eine mittlere Existenzzeit von rund 100 Millionen Jahren, ehe er mit der Erde zusammenstößt. Dabei könnte ein Körper von etwa 2 km Durchmesser und einer durchschnittlichen Einschlagsgeschwindigkeit von 20 bis 30 km/s einen Krater mit 40 bis 50 km Durchmesser hinterlassen; das ist mehr, als zum Beispiel die Entfernung der Stadtzentren von Halle und Leipzig beträgt.

Was Planetoiden und Meteorite verbindet

Den wichtigsten Fortschritt erzielte die Planetoidenforschung des letzten Jahrzehnts mit jenen Untersuchungsergebnissen, denen wir erheblich verbesserte Auskünfte über die Substanz dieser kleinen Himmelskörper verdanken. Es gibt heute bereits verschiedene Verfahren, aus den Spektren der Planetoiden Aussagen über deren Mi-

Planetoidengürtel und Bahnen einiger Außenseiter

E = Erde; M = Mars; J = Jupiter; S = Saturn; 1 = Planetoidengürtel; 2 = Trojaner; 3 = Hidalgo; 4 = Adonis; 5 = Apollo; 6 = Toro; 7 = Icarus



neralbestand zu gewinnen. Gegenwärtig liegen schon für mehrere hundert Kleinplaneten Substanzbestimmungen vor.

Die aus der bekannten Masse und dem Durchmesser von rund 1000 km für Ceres abgeleitete Dichte nahe dem Wert von 2,5 stimmt gut mit ihrer ermittelten Oberflächensubstanz, nämlich der kohligeren Chondrite, überein. Bei der helleren Vesta, dem mit 540 km Durchmesser drittgrößten Planetoiden, haben die Wissenschaftler dagegen Augitminerale im Spektrum erkannt, so daß mit achondritischer Substanz gerechnet werden muß. Juno weist unter den Großen das rötlichste Spektrum auf, was auf einen erhöhten Eisenanteil im Gestein schließen läßt. Dieser Körper dürfte den Stein-Eisen-Meteoriten sehr nahe stehen. Reine Eisenplanetoiden haben sich bisher nur in einer verschwindend geringen Zahl nachweisen lassen. An erster Stelle ist hier Nr. 16 = Psyche zu nennen. Dieser bereits 1852 entdeckte Kleinplanet gehört mit seinem rund 250 km Durchmesser eindeutig zu den 15 größten – schätzungsweise besitzen überhaupt nur 110 bis 120 Planetoiden einen Durchmesser von mehr als 100 km.

Auch der erdnahe Toro wurde als Chondrit definiert. Dies ließ die Frage auftauchen, ob es nicht Splitter ebendieses Kleinplaneten sind, die als Meteoritenbruchstücke in unseren Sammlungen aufbewahrt werden.

Heute ist die Wissenschaft endlich in der Lage, wenigstens in den Grundzügen ein Entwicklungsschema aufzustellen, das diese substanzialen Merkmale der Planetoiden erklärt. Weil temperaturgleiche Abkühlungsstadien des Urnebels in Sonnennähe jeweils später einsetzen als in fernerer Regionen, konnten die erst bei relativ niedrigen Temperaturen kondensierenden Silikate in größerer Entfernung vom Zentralgestirn auch früher und reichlicher in die Planetesimalen, die Anfangskörper oder ersten Kondensationsprodukte der späteren Planeten oder Planetoiden, eingebaut werden. Das macht es verständlich, warum innerhalb des Planetoidengürtels der Anteil der leichten, chondritischen Körper, die aus eben solchen Substanzen bestehen, nach außen zuzunehmen scheint; speziell ab 3,4 AE sollen nach neueren Angaben fast nur noch Kleinplaneten vom Typ der kohligeren Chondrite zu finden sein.

Metallreiche Planetoiden häufen sich danach im erdnäheren Gürtel der Kleinplaneten. Sie sind aber bezeichnenderweise auch noch in der Nähe der Kommensurabilitätslücken etwas angereichert. Der Eisenmeteoritenkörper der Psyche von etwa 250 km Durchmesser gehört ebenfalls dazu. Von diesem Kleinplaneten wird vermutet, er sei durch

häufige Zusammenstöße mit anderen Planetoiden schon weitestgehend seiner ehemaligen äußeren Schale beraubt, so daß wir es hier eventuell nur noch mit einem in elliptischer Umlaufbahn verbliebenen Planetoidenkern zu tun haben.

Wir können heute die Entwicklung der Planetoiden so verstehen, daß sie vor über 4,5 Milliarden Jahren ein ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum bei Körpern von etwa 40 bis 50 km Durchmesser hatten, und erst in der Folgezeit nahm dann die aus Zusammenstößen hervorgegangene Anzahl kleinerer Körper, die demnach als Bruchstücke größerer aufzufassen wären, mehr und mehr zu.

Dennoch dürfen wir keineswegs ausschließen, daß es unter den kleinen und kleinsten kompakten Massen noch Exemplare gibt, die auch ursprünglich kaum über die Zentimeter- oder Meterdimension hinausgelangten – vielleicht weil ihre Herausbildung zu spät begann und in ihrem Bahnbereich nicht mehr genügend kondensierbare Materie zur Verfügung stand.

Erdgeschichte aus kosmischer Sicht



Unter dem Begriff Erdgeschichte im Sinn der bisher üblichen Geologie versteht man in erster Linie eine genaue Beschreibung der geologischen Formationen vor allem seit dem Paläozoikum, also etwa während des Zeitraums der letzten 500 Millionen Jahre. Sedimentfolgen der Vergangenheit werden samt ihrem Fossilinhalt ausführlich dargestellt. Die großen Zusammenhänge der Entwicklung unseres Planeten dagegen stehen nicht im Vordergrund einer solchen Erdgeschichtsauffassung. Das rein Beschreibende gibt in den Lehrbüchern zur historischen Geologie noch immer den Ton an.

Heute dürfen wir wohl mit Recht sagen, daß den Gesetzmäßigkeiten und den überregionalen Zusammenhängen ein viel größerer Raum gewidmet werden kann. Dabei müssen wir jedoch berücksichtigen, daß der bisher eingeschlagene Weg zur Darstellung der Erdgeschichte eine notwendige Anpassung an den zeitgemäßen Wissensstand war. Um die großen Zusammenhänge der Geologie zu zeigen, fehlte es zunächst an Substanz.

Im Folgenden wollen wir nun versuchen, unter Einbeziehung der neuen kosmischen geologischen Tatsachen und Schlußfolgerungen ein anschauliches Bild besonders der frühen Erdgeschichte zu entwerfen, in dem diese mehr denn bisher als Teil der Entwicklung des ganzen Planetensystems verstanden wird.

Doch wo sollen wir beginnen? Erdgeschichte aus kosmischer Sicht fängt ja nicht erst mit der Herausbildung einer festen Kruste an. Ein bißchen Kosmogonie, wie man die Lehre von der Entstehung unseres Planetensystems nennt, wird daher unvermeidlich.

Sterne im Urnebelstadium

Planeten und Sonne sind annähernd gleichalt – etwa 4,7 Milliarden Jahre. Was sich in den Geburtsstunden des eigenen Sonnensystems an mannigfaltigen dynamischen Prozessen abgespielt haben mag, ohne

gestaltliche Zeugnisse zu hinterlassen, das kann uns vielleicht der Vergleich mit gegenwärtigen Ereignissen in dem weiten Feld Galaxis, dem Milchstraßensystem, verraten.

Junge Sterne, in deren Nähe auch Planetensysteme entstehen, lassen sich durchaus zahlreich und verschieden weit entwickelt in den Spiralarmen unseres mehr als 100 Milliarden Sterne umfassenden galaktischen Systems beobachten. Der relativ nahe, „nur“ 1500 Lichtjahre entfernte Orionnebel mit seinen von solchen jungen und zum Teil sehr heißen Sternen erleuchteten kosmischen Gas- und Staubmassen gehört zu den prächtigsten Beispielen. Auf 700 Sonnenmassen wird allein jener bekannte, einen Durchmesser von etwa 15 Lichtjahren besitzende erleuchtete Ausschnitt dieser Ballung kosmischer Materie geschätzt, der in Wirklichkeit lediglich den kleineren Teil einer riesigen Dunkelwolke im Sternbild des Orion bildet. Die heißen Sterne, die hier das ionisierte interstellare (lat. inter = zwischen; interstellar = zwischen den Sternen befindlich) Wasserstoffgas zum Leuchten angeregt haben, gehen mit ihrer Energie bei über 20000 K Oberflächentemperatur so verschwenderisch um, daß sie schon wegen des daraus ableitbaren Energieverlusts nicht länger als 1 bis 2 Millionen Jahre in solchem Zustand verweilen können. Noch wichtiger aber als die Existenz dieser Sterne dürfte für uns der Nachweis sein, daß hier im Zentrum des Orionnebels eine Sternassoziation, eine örtliche Anhäufung von einander physikalisch ähnlichen Sternen, vorhanden ist, die etwa 500 Mitglieder umfaßt — jene sehr hellen und heißen Sterne, aber auch zahlreiche nur sehr schwach und unruhig leuchtende.

Zu den letztgenannten gehört nun ein Typ, der den Namen T-Tauristerne (nach dem Stern T im Sternbild Stier, lat. taurus = Stier) trägt und dem man nachsagt, daß er sich gerade in jenem Zustand befindet, welchen unsere Sonne als ganz junges Zentralgestirn während der Kondensationsphase im Urnebelstadium des Planetensystems durchlaufen hat. T-Tauristerne oder Nebelveränderliche, wie sie auch genannt werden, weil ihr Auftreten in Verbindung mit den interstellaren Gas- und Staubwolken kein Zufall ist, zeichnen sich durch einen sehr unregelmäßigen Lichtwechsel aus. An einigen Objekten ließ sich sogar nachweisen, daß diese Pulsationen ohne Veränderungen an den Spektrallinien der zentralen Lichtquelle verlaufen, was belegt, daß sie nicht vom Stern selbst ausgehen, sondern als Folge einer Verdeckung zu deuten sind. Es soll sich um große, undurchsichtige Objekte handeln, die in Abständen der Größenordnung unserer Planetenbahnen ihr Zentralgestirn umkreisen. Man nimmt an, daß sich diese undurch-

sichtigen Staubwolken im Protoplanetenstadium befinden und sich während ihrer weiteren Entwicklung zu echten Planetenkörpern verdichten werden.

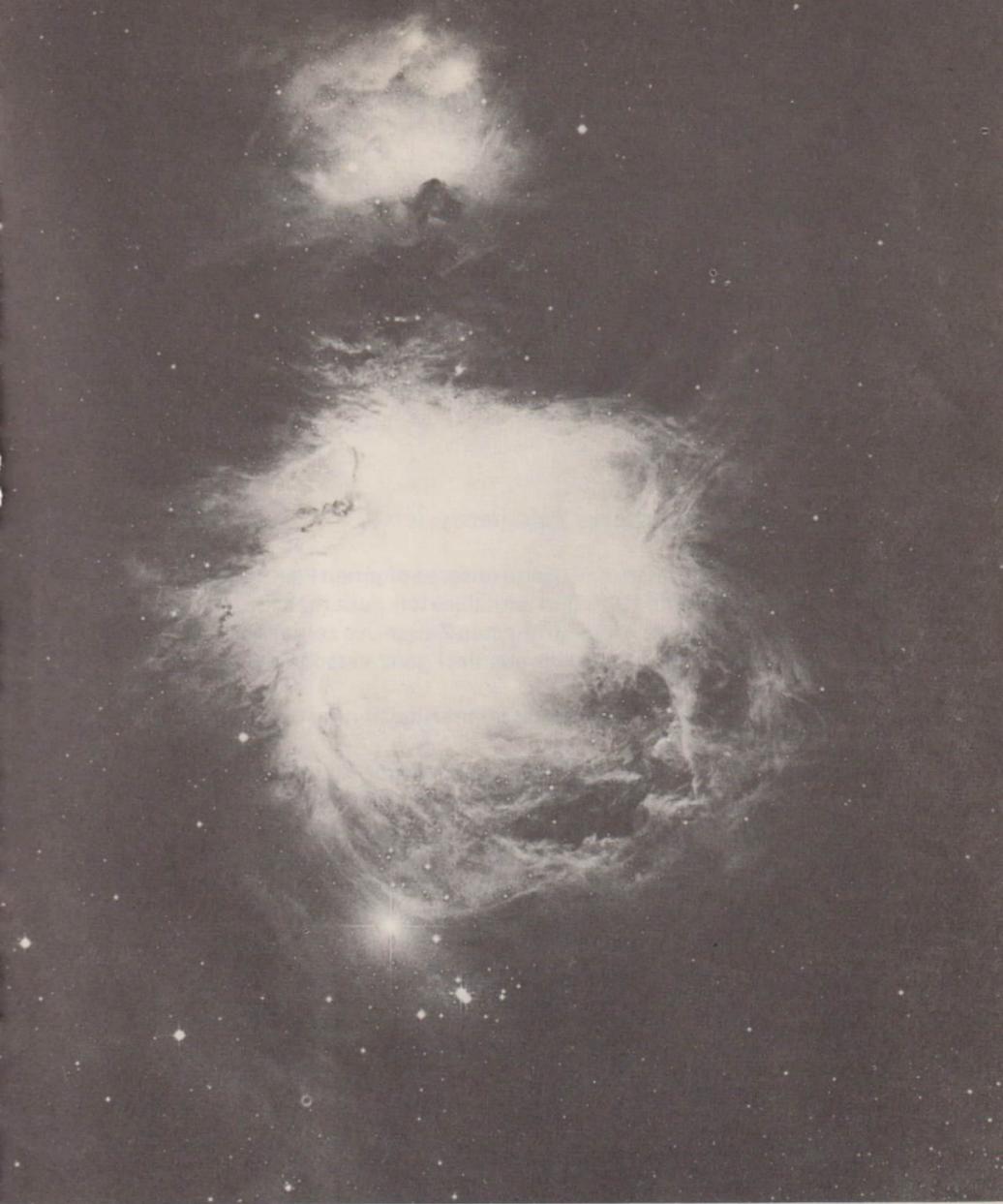
Auch die Expansion, das Auseinandertreiben der Sternassoziation im Orionnebel, läßt auf das jugendliche Alter ihrer Mitglieder schließen. Dabei kam man zu dem Ergebnis, daß dieser Komplex junger Sterne erst etwa 300 000 Jahre existieren kann.

Neue Sterne entstehen in den Armen unserer Milchstraße nicht einzeln, sondern gewöhnlich gleich haufenweise zu mehreren tausend Stück in den genannten Sternassoziationen, deren Funktion der sowjetische Astrophysiker *Viktor Ambarzumjan* als erster erkannte. Der Hauptunterschied zu anderen Sternhaufen liegt darin, daß in den Assoziationen ein ganz bestimmter Sterntyp – in unserem Beispiel vom Orionnebel der der T-Tauristerne – vorherrscht.

Es würde zu weit führen, auf all die vielen Einzelheiten einzugehen, die jüngere astronomische Forschungen zur Sternentstehung erbracht haben. Erwähnt sei aber, daß man heute annimmt, die Hälfte aller Feldsterne der Milchstraße, also solcher Sterne, die nicht zu spezielleren Haufen oder anderen Gruppierungen gehören, werde von Planeten umkreist. Der Prozentsatz kann auch noch höher sein, genauere Zahlen lassen sich vorerst kaum ermitteln. Hier geht es nur um die Feststellung, daß die moderne Astronomie im Gegensatz zur älteren Auffassung, wonach unser Planetensystem ein zufälliger Begleiter des Fixsterns Sonne wäre, die Entstehung der Planetensysteme als einen ganz normalen, ja, für bestimmte Spektralklassen unter den Sternen beinahe schon zwingenden Vorgang ansieht.

Aus Schlingerbewegungen in den Bahnen besonders naher Nachbarsonnen – am bekanntesten ist wohl Barnards Pfeilstern, benannt nach seinem Entdecker, dem amerikanischen Astronomen *Edward Emerson Barnard* (1857–1923) – glaubt man sogar schon Hinweise auf solche fernen Planetensysteme ableiten zu können. Was von der Erde aus wie eine wellenförmige Eigenbewegung des Fixsterns aussieht, soll in Wirklichkeit der Kreislauf des strahlenden Sterns und einer oder

*Orionnebel, mit dem 2-m-Universalspiegelteleskop des Observatoriums Tautenburg bei Jena aufgenommen
Die jungen Sterne lassen sich allerdings bei dieser langzeitbelichteten Aufnahme wegen der von den Nebelmassen ausgehenden Überstrahlung nicht mehr unterscheiden.*



mehrerer nichtleuchtender Komponenten um den gemeinsamen Schwerpunkt sein. Etwa 6 bis 10 solcher Fixsterne in Sonnennähe könnten danach dunkle Begleiter haben. Doch die Daten über Zahl und Größe dieser möglichen Planeten sind noch sehr vage. Wenn sich dabei andeutet, daß kleinere Sonnen als unsere eigene häufiger von über-jupitergroßen Planeten umkreist werden, so dürfte sich dies eher auf einen Auswahleffekt zurückführen lassen, der dadurch zustande kommt, daß größere Planetenmassen bei kleineren Sonnen größere und damit besser wahrnehmbare Bahnstörungen verursachen. Immerhin könnte es aber auch als erstes Anzeichen dafür gelten, daß masseärmere Fixsterne nicht unbedingt schwächer entwickelte Planetensysteme haben müssen.

Älteste Zeugen unseres Planetensystems

Während die allerersten Anfänge unseres eigenen Planetensystems nur durch vergleichende Studien an Objekten außerhalb seiner Grenzen belegt sind, erhalten wir die frühesten Zeugnisse seiner anschließenden Entwicklung durch Merkmale aus drei ganz verschiedenen Bereichen des neuen Systems selbst:

1. die Substanz und das Gefüge meteoritischer, insbesondere chondritischer Materie,
2. die Verteilung und die Gestalt kosmischer Kleinkörper,
3. die Oberflächenformen der erdähnlichen Himmelskörper.

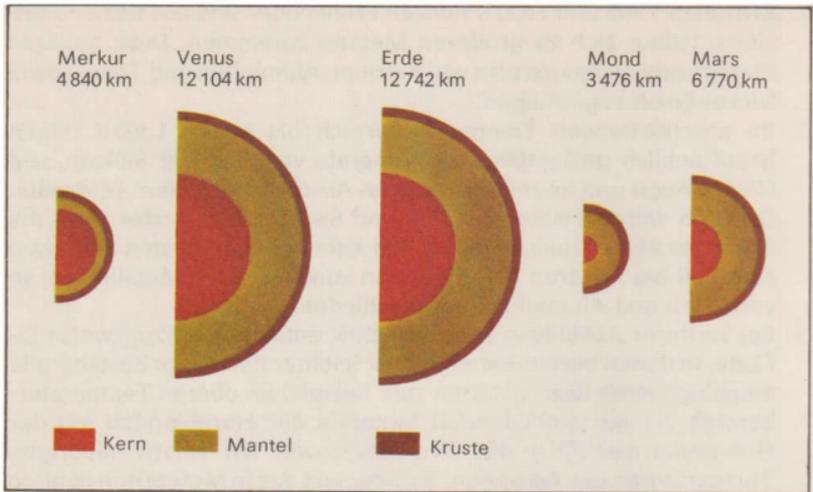
Mit Hilfe der modernen Meteoriten- und Kleinkörperforschungen ließen sich in erster Linie Grundzüge der geochemischen Entwicklung des Planetensystems mehr oder weniger genau erfassen. Man ist heute soweit, eine chemische Kondensationsfolge benennen zu können, die gut mit dem bisher vom Planetenaufbau bekannten Bild übereinstimmt. Folgender Entwicklungsweg zeichnet sich danach ab:

Gas und Staub der Urnebelmassen, welche die Ursonne hauptsächlich in ihrer Äquatorebene umgeben, werden mit wachsendem Abstand vom Zentralkörper immer weniger stark erhitzt. Gehen wir von den Startbedingungen aus, wie sie im Anfangsstadium der Kondensationsphase für wahrscheinlich gelten können, so müßten wir mehr als 2000 K in Sonnennähe und nur einige 10 K in Plutoentfernung von der Ursonne annehmen. Die wichtigsten Kondensationsgruppen lassen sich dann mit fallender Temperatur etwa wie folgt kennzeichnen:

1. Zwischen 1900 und 1600 K flocken Fröhkondensate aus beziehungsweise ballen sich zu größeren Massen zusammen. Dazu gehören Metalloxide, vorzugsweise von Kalzium, Aluminium und Titan, sowie Nickel-Eisen-Legierungen.
2. Im anschließenden Temperaturbereich bis gegen 1300 K folgen hauptsächlich gesteinsbildende Minerale vom Typ der Silikate, wie Olivin, Augit und im relativ kühleren Abschnitt vor allem Feldspäte. Dadurch werden außer Silizium und Sauerstoff in erster Linie die Elemente Magnesium, Natrium und Kalium neben Resten der schon zum Teil bei höheren Temperaturen kondensierten Metalloxide, so von Eisen und Aluminium, ausgeschieden.
3. Bei weiterer Abkühlung bis etwa 700 K entstehen vorzugsweise Silikate, in denen bereits Elemente der leichter flüchtigen Bestandteile eingebaut sind; dazu gehören zum Beispiel im oberen Temperaturbereich die gesteinsbildenden Minerale der Hornblenden mit der Hydroxylgruppe (OH) des Wassers sowie bei relativ niedrigen Temperaturen der Serpentin. Sulfide, wie das in Meteoriten häufige Mineral Troilit (FeS), scheiden sich ebenfalls erst bei Temperaturen unter 1300 K ab.
4. Die letzte Gruppe bilden die in der Kometenmaterie sowie in den großen Planeten und ihren Satelliten konzentrierten sogenannten leichtflüchtigen Substanzen: So kondensieren der Reihenfolge nach mit sinkender Temperatur Wasser, Kohlendioxid, Ammoniak und Methan.

Angewendet auf die tatsächlichen Bedingungen in unserem Sonnensystem, bedeutet dies, daß etwa in Merkurdistanz zu Beginn der langsamen Abkühlung des sonnennahen Urnebels für längere Zeit nur Metalloxide und die Nickel-Eisen-Legierungen kondensierten. Die hohe Dichte des Planeten Merkur mit 5,4 paßt gut zu dieser Auffassung, läßt sie doch einen Eisenkern von fast zwei Dritteln des Merkurdurchmessers vermuten. Im Innern der Venus nähme er etwa noch den halben Durchmesser des Planeten ein, und in der Erde wird nach diesem Kondensationsschema lediglich ein solcher von rund 1500 km für möglich gehalten. Etwa ab Planetoidendistanz sollten sich alle noch weiter außen kreisenden Planeten eventuell von Anfang an eisenkernfrei entwickelt haben, das heißt, der Urnebel war in dieser Entfernung von der Sonne selbst in der Frühphase der Kondensation nie so heiß, daß sich allein die Metalle der ersten Kondensationsgruppe ausscheiden konnten.

Als Mantelgesteine um diese Eisenkerne – oder bei niedrigerer



Unterschiedlicher Schalen Aufbau der erdähnlichen Himmelskörper

Starttemperatur frühestens ab Marsdistanz von der Sonne schon als erste Kernsubstanz — folgten dann silikatische Verbindungen entsprechend der zweiten Kondensationsgruppe unseres Schemas. Bei gewissen vereinfachenden Annahmen über den Verlauf des Wärmeflusses im Urnebel können wir davon ausgehen, daß zu der Zeit, als die Temperaturen im zentralkörpernahen Raum, also etwa im Merkurabstand von der Ursonne, noch etwa 1700 K betragen und sich somit gerade die ersten Hochtemperaturkondensate zu verdichten begannen, in Venusentfernung nur knapp 1300 K, im erdnahen Raum rund 900 K und in Marsdistanz lediglich 750 K herrschten. Dementsprechend müßte der Anteil an Silikaten und Sulfiden unter den anfänglichen Kondensaten der inneren Planeten, der die Sonne näher als Jupiter umkreisenden Himmelskörper, nach außen ständig zunehmen. Insbesondere sollte hier mit fortschreitender Abkühlung des planetarischen Urnebels der im Planeteninnern gebundene Wassergehalt erheblich anwachsen. Nimmt man zum Beispiel für die Erde eine Einbindung von „nur“ 0,05 Prozent Wasser in das Mantelgestein an, so müßten es für Mars bereits 3 Prozent sein. Wie genau jedoch solche Prozentsätze für die Profile der erdähnlichen Himmelskörper tatsächlich zutreffen, hängt

sehr von der wahren Dauer und dem Verlauf der Kondensationsphase ab – und da gibt es noch einige Unsicherheiten.

Vollzog sich die Abkühlung im planetarischen Urnebel schnell oder langsam? Währte die Kondensationsphase einige Jahrzehntausende oder einige Jahrmillionen? Darauf fehlt uns immer noch die Antwort. Von der Geschwindigkeit der Abkühlung hängt aber weitgehend ab, in welchem Maß – das heißt wie vollständig oder rein – die Kondensation in den jeweiligen Temperaturbereichen erfolgte.

Schließlich herrscht auch keine Einhelligkeit darüber, auf welche Weise sich die Materie des planetarischen Nebels im einzelnen von der der Protosonne trennte, obwohl das Prinzipielle des Vorgangs schon seit langem recht gut verstanden wird. Weil der nach Gesetzen des Zufalls von Anfang an mitgegebene Drehimpuls des Systems erhalten bleiben muß, erfordert die Kontraktion des Urnebels eine ständige Zunahme der Eigendrehung des Zentralkörpers. Diese kann bei zu groß werdender Fliehkraft zur Abgabe von Materie vor allem aus seiner Äquatorebene in den Aufenthaltsraum der späteren Planeten führen.

Wir kennen heute eine ganze Reihe weiterer Mechanismen, deren Wirksamkeit entscheidend dazu beitrug, unserem Planetensystem Gestalt zu verleihen. Wesentlich war hierfür die Erkenntnis über die bedeutende Rolle des solaren Winds als eines allseitig von der Sonne abwandernden Plasmas, eines heißen, ionisierten Gasstroms. Durch diesen Sonnenwind konnte es, wie wir schon am Beispiel der Kometen und Planetoiden gesehen haben, mit wachsender Sonnennähe in der Sphäre der Protoplaneten zu einer immer stärkeren Verarmung an leichten Elementen, insbesondere an Wasserstoff, kommen. Auch der Strahlungsdruck des Sonnenlichts wirkte in derselben Richtung, allerdings hauptsächlich auf den Staubanteil der planetarischen Wolke.

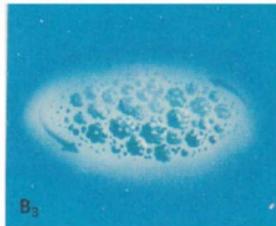
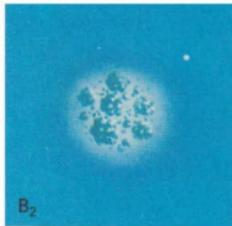
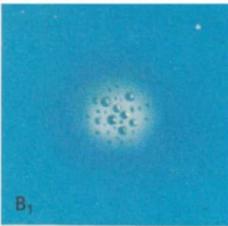
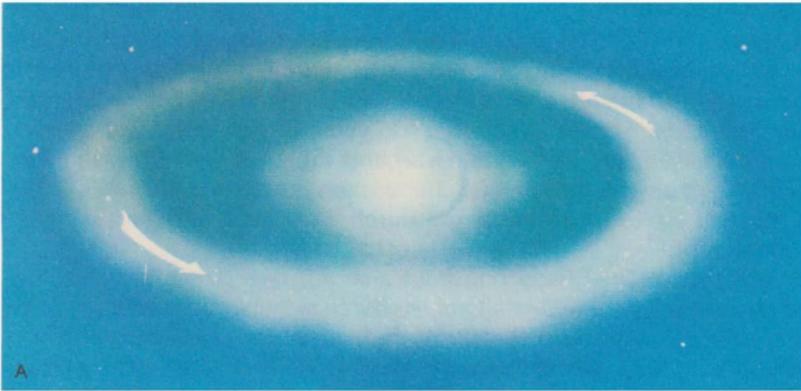
Der Protoplanet Erde muß also unter Berücksichtigung dieses nach außen gerichteten Teilchenstroms erheblich massereicher gewesen sein als der heutige Planet. Man vermutet, daß sein ehemaliges Format etwa den gegenwärtigen Massen von Uranus oder Neptun entsprach – dies vor allem deshalb, weil sich dann unser Planet Erde aus einer protoplanetarischen Materiewolke ableiten ließe, deren Zusammensetzung der durchschnittlichen kosmischen Elementenhäufigkeit zumindest sehr nahe käme.

Von kaum geringerer Bedeutung ist die neuerdings entdeckte Abbremsung der Sonnenrotation beziehungsweise Übertragung überschüssigen Drehmoments auf die planetarische Gaswolke. Danach können die elektrisch geladenen Teilchen im interplanetarischen Raum

ihre gegenüber der Sonnenrotation langsameren Umlaufbewegungen nicht unbeeinflusst fortsetzen, sondern werden durch die magnetischen Feldlinien unseres Zentralgestirns mitgeschleppt, also beschleunigt, was umgekehrt der Sonne Rotationsenergie entziehen muß.

Aus den Spuren, welche die Wirksamkeit beider Mechanismen im Planetensystem hinterlassen hat, geht mit einiger Wahrscheinlichkeit hervor, daß die Sonne zu der Zeit, als die einhüllende planetarische Wolke neben ersten Kondensationsprodukten noch reichlich Materie in feinsten Verteilung enthielt, bereits ein intensiver Strahler war. Wir können also annehmen, daß die anfangs allein durch Zusammenziehung mögliche Aufheizung des Zentralkörpers bereits in eine solche durch nuklearen (lat. nucleus = Kern) Energiegewinn übergegangen war, das heißt, kurz vor dieser Zeit müßten schon die Kernfusionsprozesse im Sonneninnern mit der Verbrennung von Wasserstoff zu Helium in Gang gekommen sein. Damit wird die Vermutung bekräftigt, daß unser Planetensystem nicht bloß seinen letzten Schliff unter dem Einfluß einer heißen Sonne erhalten hat, sondern daß sie bereits in einem sehr frühen Kondensationsstadium energetisch, das heißt durch ihre Strahlung, Regie im Gesamtsystem führte.

Nur in groben Zügen können wir bis jetzt den Vorgang verstehen, der aus winzigen, an kosmischen Staub erinnernden Kondensaten später Planetesimale von Zentimeter- bis Metergröße werden ließ und der dann sogar ein Wachstum bis in die heutige Großplanetendimension bewirkte. Die Problematik wird deutlicher, wenn wir bedenken, daß Zusammenstöße von solchen kleinen Massen oder Kleinkörpern unter gegenwärtigen Bedingungen im interplanetarischen Raum eher zur Zerstörung beider Komponenten als zu ihrer Vereinigung führen müßten. Hier gilt es zu beachten, daß der interplanetarische Raum in der anfänglichen Kondensationsphase ja nicht ganz gasfrei war und daß die frühen Kondensate wahrscheinlich eine Zeitlang selbst sehr locker gebaute, vielleicht traubenartige Gebilde von einigen Metern oder sogar bis zu wenigen Kilometern Durchmesser darstellten. Diese mögen dann ihrerseits wieder als Schwärme oder Pulks eine kurze Zeit lang während der Hauptkondensationsphase die Scheibenebene des planetarischen Nebels bevölkert haben. Begegnungen solcher loser Verbände könnten sich unter Umständen mit so geringen Relativgeschwindigkeiten vollziehen, daß sich daraus eine echte Zusammenballung der vorher getrennten Massen und somit auch ein Massenzuwachs ergibt. Hatten einige Körper auf diese Weise erst einmal etwa die 100-km-Dimension erreicht, dann vermochte ihr gewachsenes



*Materieverdichtung im Urnebelstadium des Sonnensystems
(Schema)*

A = Abtrennung eines planetarischen Urnebels (Außenring) vom solaren Urnebel im Zentrum

B₁₋₃ = zunehmende Massenballung und Wachstum der Teilchen im Zentimeter- und Meterbereich

eigenes Gravitationsfeld zu einem immer stärker wirksamen Beschleuniger der Massensammlung zu werden, die um so verlustärmer erfolgte, je kräftiger die Gashölle war, die sich um solche Urplaneten bildete oder wenigstens vorübergehend erhalten blieb.

Für alle weiteren, dem Protoplanetenstadium folgenden Etappen der Entwicklung unseres Sonnensystems können uns die Oberflächenmerkmale der kleineren Himmelskörper mit ihren ausgeprägten Kraterlandschaften die tatsächliche Ereignisfolge noch besser anzeigen.

Teilen wir die Kosmogonie des Planetensystems nach den Merkmalen

ein, welche die jeweilige Etappe charakterisieren, so wird das Anfangsstadium der Sternentstehung, belegt durch zahlreiche Beispiele an galaktischen Nebeln und Sternassoziationen, für uns in erster Linie durch seine Dynamik erfaßbar. Das anschließende Kondensationsstadium im sonnennahen Urnebel verrät seine Ereignisfolge am ehesten durch Analyse der im Gesteinsverband meteoritischer Massen eingefrorenen physikalischen und chemischen Prozesse, während sich die dritte und letzte Etappe sehr gut durch Oberflächenmerkmale zu erkennen gibt.

Eine solche Dreigliederung baut also auf den Grundbegriffen Bewegung – Substanz – Gestalt auf, wodurch sich markieren läßt, welche Kräfte beziehungsweise welche Vorgänge in der jeweiligen Entwicklungsphase die wesentlichsten Veränderungen erzeugten. Oberflächenformende Prozesse bestimmen eben erst im Spätstadium des werdenden Planetensystems das Bild und spielen in der Anfangsphase noch gar keine und selbst in der Kondensationsphase zunächst nur eine untergeordnete Rolle.

Mond und Erde nehmen Gestalt an

Für die letzte große Entwicklungsetappe unseres Sonnensystems, die zu beständigeren Oberflächenformen der Planeten führte, verwenden wir neben Mars, Merkur und den Planetoiden natürlich unseren eigenen Mond als Hauptzeugen. Daß wir heute in der Lage sind, von seinem schon vor 4 bis 5 Milliarden Jahren mehr oder weniger vollständig erstarrten Gesicht Wesenszüge des ganzen Systems abzulesen, verdanken wir besonders den Erfolgen der Raumfahrt in den letzten beiden Jahrzehnten.

Nach den Ergebnissen von Altersbestimmungen an Gesteinsproben begann die Entwicklungsgeschichte des Mondes irgendwann vor 4,6 bis 4,7 Milliarden Jahren. Genauer läßt sich seine Geburtsstunde auch heute noch nicht angeben.

Wahrscheinlich nach einigen zehn Millionen Jahren, aber sicher noch innerhalb der ersten hundert bis zweihundert Millionen Jahre seiner Existenz und damit während eines, verglichen mit der Gegenwart, mehr als tausendfach intensiveren und wärmeliefernden kosmischen Kleinkörperbombardements schmolz die Mondkruste total auf. Dabei wandelte sich alles etwa noch in Oberflächennähe befindliche chondritische

Urgestein in magmatische Schmelze um. Ursache dieser Aufheizung waren auch die damals reichlicher vorhandenen radioaktiven Elemente, wobei dem Uran und dem radioaktiven Kaliumisotop ^{40}K die Hauptbedeutung zukam.

Das häufigste Erstarrungsgestein der neuen Kruste des Mondes, das im Verlauf der anschließenden Abkühlungsphase aus dieser Schmelze hervorging, wurde nach dem charakteristischen, sehr hohen Feldspatgehalt als Anorthosit bezeichnet. Die älteste Anorthositkrustendatierung reicht bis 4,5 Milliarden Jahre zurück. Noch ältere Datierungsergebnisse wurden mit 4,6 bis 4,8 Milliarden Jahren lediglich aus den glaskügelchenreichen lunaren Staubmassen erzielt. Dabei weiß man, daß mindestens ein Teil dieser Altersangaben auf Beimengungen von meteoritischem Fremdmaterial im Mondgestein zurückzuführen ist. Die jüngsten Altersbestimmungen am Anorthosit ergeben eine Bildungszeit von 4 Milliarden Jahren. Somit dürfen wir annehmen, daß die Erzeugung der neuen lunaren Kruste ein ziemlich langwieriger Prozeß war, der sich über mehrere hundert Millionen Jahre hinweg fortsetzte und wohl an den meisten Stellen des Mondes sogar mehrmals durch Meteoriteneinschläge unterbrochen wurde.

Im anschließenden Zeitraum von 3,85 bis 4 Milliarden Jahren hat unser Trabant wahrscheinlich eine für seine Oberflächenentwicklung besonders katastrophale Periode durchlaufen. Zahlreiche planetoidengroße Himmelskörper, vielleicht bis 50km im Durchmesser, stürzten auf ihn nieder und schufen die meisten der gewaltigen Hohlformen, die heute als Ringmare, weitgehend mit lunarem Basalt gefüllt, vorliegen.

Diese Füllung oder Überflutung der Riesenkrater des Mondes durch aufsteigendes Basaltmagma vollzog sich nicht etwa gleich im Anschluß an ihre Entstehung, sondern erstreckte sich, wie durch weitere Gesteinsdatierungen inzwischen nachgewiesen werden konnte, über eine Zeitspanne von mindestens 700 Millionen Jahren, erfolgte also vor 3,15 bis etwa 3,85 Milliarden Jahren.

Man kann den großen Wert dieser neuen Daten und Fakten zur Entwicklung der Mondkruste wohl erst richtig ermessen, wenn man weiß, daß die Fachleute vorher heftig darüber diskutierten, ob der Mond überhaupt eine aufgeschmolzene Urkruste außerhalb der Verbreitungsgebiete der Marebasalte besitzt. Einige hielten ihn dazu einfach nicht für heiß genug. Die drei wesentlichsten unsicheren Größen waren bislang der Anteil radioaktiver Elemente im Mondgestein, die Starttemperatur, bei der die Ballung der Materie zum Urmond stattfand, und

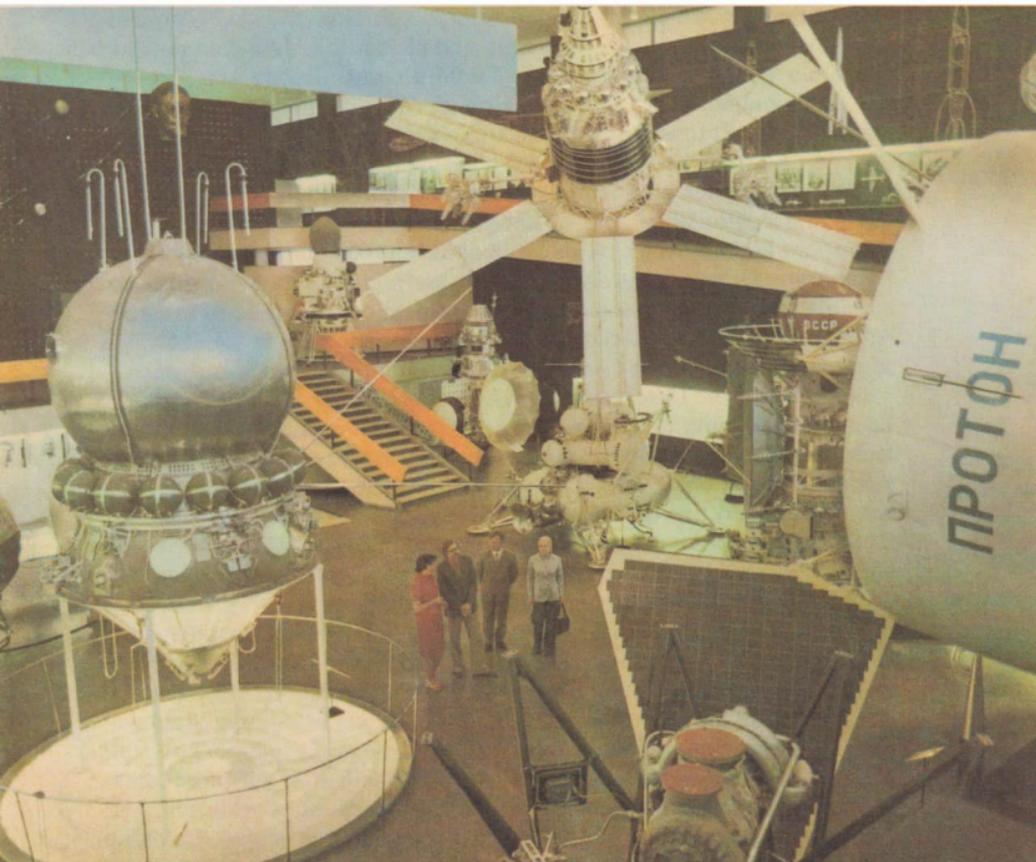
die Größe der Wärmezufuhr je Zeit während des späten Agglomerationsstadiums (lat. agglomerare = zusammenballen), also der Phase, da sich seine Massen vereinigten. Heute verfügen wir auf allen drei Gebieten zwar nicht über endgültige, aber doch über stark verbesserte Werte. Ohne die Raumfahrt wäre der Streit über das Aufschmelzen der Mondkruste auch in 10 Jahren noch unentschieden geblieben.

Die jetzt erkannte Abfolge der lunaren Krustenentwicklung zeigt uns, daß einige wesentliche Prozesse heißer und langsamer verliefen, als manche glaubwürdig erschienenen theoretischen Konzepte berechnet hatten. Wenn die Datierungsergebnisse richtig sind – und es besteht eigentlich kein Grund, daran zu zweifeln –, dann herrschte auf der Mondoberfläche noch echter Flutbasaltvulkanismus, als auf der Erde bereits das Leben Fuß gefaßt hatte. Die ältesten erhaltenen Erstarrungsgesteine unseres eigenen Planeten ergaben Alterswerte um 3,8 Milliarden Jahre, und solche Gesteine, die erste Lebensspuren enthalten, wurden ja als etwa 3,4 Milliarden Jahre alt erkannt.

Vergleichen wir die Angaben über die jeweils ältesten Gesteine von Erde und Mond, dann sieht es ganz so aus, als trennten nur etwa 500 Millionen Jahre den Beginn der Krustenbildung der Himmelskörper mit so verschiedener Masse. Doch der Fortgang der Erstarrung verzögerte sich im Lauf der Zeit auf der Erde gegenüber dem Mond gesetzmäßig mehr und mehr. Der lunare Vulkanismus erlosch zum Beispiel mit Sicherheit vor 3 Milliarden Jahren – der irdische ist noch immer aktiv.

Die große Frage nach der frühen Entwicklung der Lithosphäre unseres Planeten läßt sich bisher erst annähernd beantworten. Wie sah die Kruste zum Beispiel vor 2 bis 3 Milliarden Jahren aus, und wie kam der heutige Bewegungsrhythmus überhaupt in Gang?

Wenn beim Vergleich zwischen Erde und Mond von etwa 3,8 beziehungsweise 4,6 Milliarden Jahre alten ersten überlieferungsfähigen Krustenbildungen die Rede war, so bezieht sich das in beiden Fällen auf Gesteine einer Wiedererstarrungskruste nach der großen Einschmelzungsphase einer noch älteren, festen Oberfläche des Urmonds oder der Urerde. Wie lange unser Planet aber in seiner späten Agglomerationsphase eine solche, der heutigen Mondlandschaft vergleichbare Uroberfläche besessen hat, ist noch unklar. Fest steht eigentlich nur, daß sich die Aufschmelzung infolge der Größe der Erde intensiver, sozusagen gründlicher und wohl auch rascher vollzogen haben muß als auf unserem Trabanten. Es kommt dabei sehr darauf an, unter welcher Starttemperatur der Protoplanet Erde seine Masse vorzugsweise gewann.



Raumfahrtmuseum in Kaluga, zu Ehren von Konstantin Ziolkowski (1857-1935) errichtet

Im Hintergrund Mondsonde „Luna 9“, davor Venussonde; in der Mitte „Luna 16“, darüber Nachrichtensatellit „Molnija“; rechts Marssonde, zum Teil von „Proton“-Satelliten verdeckt; links im Vordergrund „Wostok“

Die neuen Erkenntnisse über den mehr oder weniger stufenweisen Ablauf der Kondensation der Materie des planetarischen Urnebels während seiner Abkühlungsphase führten auch zu ganz neuen, zum Teil

revolutionierenden Vorstellungen über die Entstehung des Innenaufbaus unseres Planeten. Die Geologie ohne kosmische Erfahrungen ging von einer geochemisch ziemlich gleichförmigen Urerde aus und ließ den Schalenbau des Erdinnern sich durch Konvektionsströme und magmatische Entmischung herausbilden. Nach moderner Auffassung dagegen war das heutige Profil des Erdinnern in wesentlichen Zügen schon ursprünglich angelegt. Der Nickel-Eisen-Kern der Erde muß sich nicht erst später abgesondert haben; denn seine Zusammensetzung entspricht ja dem, was sich als Frühkondensat noch unter relativ hohen Temperaturen zuerst aus dem Urnebel abscheiden soll. Die den Erdkern umhüllenden Mantelgesteine passen prinzipiell ebenfalls in die zeitliche Abfolge des kosmischen Kondensationsschemas, und das setzt sich sogar bis zur Vormacht leichterer Silikate in der Lithosphäre fort.

Leider wird die Unterscheidung zwischen primärer und sekundärer Zusammensetzung des Erdinnern den Geowissenschaftlern nicht einfach gemacht; denn die Kondensationsfolge während der Abkühlungsstadien des Urnebels entspricht in erster Annäherung auch einer Ausscheidung nach der Dichte der Stoffe, wie sie bei genügend kräftiger Konvektionsströmung im Erdinnern eventuell erst später erfolgt sein könnte. Vermochten aber die tatsächlichen Geschwindigkeiten der wahrscheinlich sehr träge zirkulierenden Konvektionsströme des Mantelgesteins überhaupt eine dermaßen hochgradige magmatische Entmischung zu bewirken, wie sie das Schalenmodell der Erde voraussetzt? Gerade hieran haben einige Wissenschaftler berechtigte Zweifel geäußert, weil der zähplastische Zustand, der nach neueren geophysikalischen Berechnungen besonders für den unteren Erdmantel ermittelt wurde, für solche Differenzierungen innerhalb der zur Verfügung stehenden erdgeschichtlichen Zeit eigentlich ungeeignet sein soll.

Rufen wir uns zum Vergleich die bis jetzt bekannten Profile von Mond und Merkur sowie die für wahrscheinlich gehaltenen von Venus und Mars ins Gedächtnis zurück. Die aus ihrem Durchmesser-Masse-Verhältnis abgeleiteten Werte über die Dichte sowie die Daten über die Ausbildung oder das Fehlen eines Magnetfelds lassen sich ebenfalls gut mit dem neuen Kondensationsschema vereinbaren, während der übergroße Eisenkern des sonnennahen Merkur sonst wohl kaum zu begründen wäre. Gerade durch das Kondensationsschema wird auch verständlich, weshalb der Mars eine geringere Dichte als der Merkur aufweist, obwohl er etwa dessen doppelte Masse besitzt. Da er ferner von der Sonne entstand, hat er im Protoplanetenstadium vermutlich gar keinen oder nur einen relativ kleinen Eisenkern erhalten.

Kehren wir wieder zur Erde zurück. Auf die heiße Phase unseres Planeten mußte mit dem ständigen Verbrauch der radioaktiven Elemente die lange Periode der Wiederabkühlung folgen, die letztlich auch die Erdgeschichte der Gegenwart umfaßt. Die Erdkruste wurde allmählich dicker und dicker, so daß sie mit der Zeit auch schon Vulkane zu tragen vermochte. Es ist kein geringer Unterschied, ob die Wärme unseres Planeten auf dem Weg der Konvektion, also durch Strömung, über die flüssige Lava bis direkt an die Oberfläche gelangen kann oder ob ihre Abgabe an den Weltraum nur über die Wärmeleitung durch das feste Gestein erfolgt. Daher dürfen wir uns auch die vorangegangene, heiße Phase der Erdgeschichte nicht etwa so vorstellen, daß sich gleichzeitig die ganze Erdoberfläche oder auch nur annähernd ein Zehntel von ihr in flüssigem Zustand befand. Es mag für den Wärmeaustausch mit dem Kosmos schon viel bedeuten, wenn der damalige Vulkanismus gegenüber dem gegenwärtigen zehnmal oder gar hundertmal intensiver war.

Mit der wachsenden Versteifung der Kruste beginnt aber nun auch die Zahl überlieferter Spuren vom tatsächlichen Ablauf der Erdgeschichte rasch zuzunehmen. Vieles, was bisher aus solchen präkambrischen Gesteinen für die Entwicklung der Lithosphäre, ihrer Uratmosphäre und der Ozeane sowie für die Anfänge des Lebens an Aussagen abzuleiten war, haben wir schon in anderem Zusammenhang kennengelernt. Daraus sollte eigentlich auch hervorgegangen sein, wie viele Grundfragen insbesondere zum Thema zyklischer oder nicht-zyklischer Ablauf der Erdgeschichte noch der Klärung bedürfen. Alles in allem sprechen jedoch die meisten Anzeichen dafür, daß sich die Lithosphäre in den 4 Milliarden Jahren Erdgeschichte, die ihrem durch Fossilien besser belegten jüngsten Abschnitt vorausgingen, nicht ganz kontinuierlich, sondern etappenweise, sozusagen in Pulsationen, ihrem heutigen Zustand angeglichen hat. Über deren Dimensionen Genaueres auszusagen wäre aber ein sehr zweifelhaftes Unternehmen.

Und wie geht es weiter?

Wir verzichten auf ein Übermaß an Spekulationen im Vertrauen darauf, daß der weitere Einsatz der Raumfahrt- und Satellitentechnik in Verbindung mit den geowissenschaftlichen Forschungen viele Diskussionen erübrigt. Stellen wir lieber abschließend die Frage, welche Raum-

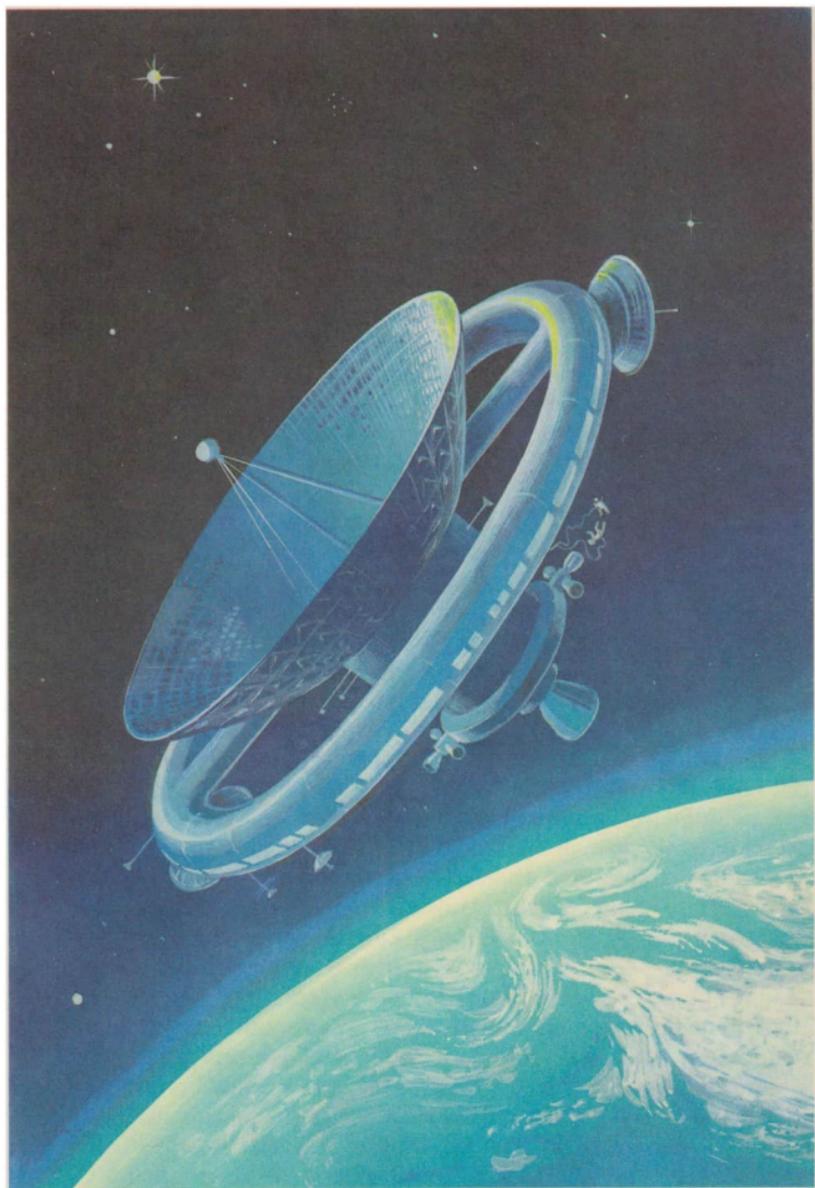
fahrtunternehmungen der nahen und fernerer Zukunft für kosmisch-geologische Untersuchungen wohl die lohnendsten sein würden. Dabei dürfen diese Beweggründe nicht losgelöst von den allgemeinen gesellschaftlichen Belangen gesehen werden; denn die Raumfahrt hat ja dem Wohl und der Entwicklung der ganzen menschlichen Gesellschaft zu dienen.

Es geht uns alle an, daß diese Entwicklung nicht für ewig auf die Erde beschränkt bleibt, sondern daß insbesondere der lebensnotwendigen menschlichen Wirtschaftstätigkeit neue Wirkungsfelder, neue Energien und vielleicht eines Tags auch neue Rohstoffquellen durch die Raumfahrt erschlossen werden. Noch wissen wir vielfach nicht, wie das im einzelnen geschehen soll; doch diese Aufgabe stellt sich uns grundsätzlich, schon um ein Wirtschaftswachstum bis in fernere Zukunft zu sichern, aber auch weil der ökonomisch nutzbare Rohstoff- und Energievorrat unserer Erde nicht unerschöpflich ist. Ein weiterer „Grund, aus dem man die Erstürmung des Kosmos nicht aufhalten darf, besteht, selbst wenn wir dabei ‚sparen‘ wollten, im Wesen des Menschen selbst“ — so hat es der sowjetische Kosmonaut Konstantin Feoktistow einmal ausgedrückt, und er setzte hinzu: „Wenn der Mensch die Tür zum Unbekannten geöffnet hat, wird er die Schwelle dieser Tür unbedingt überschreiten.“*

Für die Raumfahrt im Planetensystem sind die kosmisch-geologischen und wissenschaftlich-planetologischen Fragen nur ein Teil ihres Auftrags. Sie erkundet ja gleichzeitig ganz allgemein die Nutzungsmöglichkeiten des neuen Betätigungsfeldes, das heute manchmal noch Kosmos heißt, das man aber bald bescheidener, auch wenn man das gesamte innere Planetensystem meint, nur als erdnahen Raum bezeichnen wird. Doch da der Zustand dieses gegenüber dem wahren Kosmos so winzigen, für uns trotzdem so wichtigen und so gewaltig wirkenden Sektors bis auf wenige Ausnahmen weitgehend unerforscht ist, verhelfen selbst Programme, die in erster Linie der technischen Erprobung dienen, der Planetologie und der kosmischen Geologie zu wichtigen Informationen. Und in der Phase der Bestandsaufnahme, in der die Raumfahrt zu den Planeten gegenwärtig nun mal noch steckt, stellt das ja eine ganz natürliche Erscheinung dar.

* „NBI“, Nr. 50/1968, S. 5

So etwa könnte eine Raumstation der Zukunft aussehen.



Der einzige Himmelskörper, dessen wissenschaftliche Erforschung im Gegensatz zu gleichzeitig laufenden Erkundungsprogrammen im übrigen Planetensystem ihren Höhepunkt schon überschritten hat, dürfte unser Mond sein. Zwar ist sie längst nicht abgeschlossen — eine verbesserte fotokartographische Unterlage und weitere Gesteinsproben werden immer noch benötigt —, aber ein Teil der planetologischen Fragestellungen läßt sich über den Weg des Vergleichs, zum Beispiel durch die intensivere Erforschung von Merkur und Mars, weit effektiver lösen.

Andererseits wird der Erdtrabant in Zukunft wegen seiner Nähe vermutlich stärker als bisher zum Testfeld für neue, im Kosmos einzusetzende Geräte werden. Vieles von dem, was die Raumflugtechnik in der Experimentalphase erst einmal lernen mußte, mit Präzision auszuführen — zum Beispiel Steuerungsmanöver, um Himmelskörper überhaupt erreichen oder umkreisen zu können oder, was noch schwieriger ist, an ihrer Oberfläche im geplanten Zielgebiet und obendrein funktionstüchtig zu landen —, ließ sich ja bis jetzt schon vortrefflich am Mond erproben.

Der bisherige Ablauf der Planetenforschungen im „erdnahen Raum“ — und sei es bis zum Merkur — zeigt daher nicht zufällig unter schwierigeren Bedingungen bei verbesserter Raumflugtechnik eine Wiederholung des bereits bei der Erkundung des Mondes eingeschlagenen Wegs, also die bekannten Etappen Vorbeiflug, Landung — zunächst hart, später funktionsfähig oder weich —, Einsatz von Satelliten in der Umlaufbahn, weiche Landung mit Forschungsaufenthalt und schließlich Rückstart zur Erde mit Untersuchungsmaterial an Bord. Für Venus und Mars haben diese am Mond erprobten Programme längst, das heißt schon Anfang der sechziger Jahre, begonnen und sind für den am zweitleichtesten zu erforschenden Mars auch am weitesten gediehen. Später kamen Merkur und Jupiter hinzu, und Programme für Saturn und Uranus sind ebenfalls angelaufen oder werden vorbereitet. So erweitern sich Zug um Zug unsere Forschungsvorhaben — aber nicht nur durch den Vorstoß in fernere Räume, sondern auch — was noch wichtiger ist — durch das Ansteuern von Himmelsobjekten, die sich schwieriger erreichen und erforschen lassen.

Dementsprechend wird man, zum Teil vermutlich sogar recht bald, mindestens aber vor dem Jahr 2000, drei weitere Kategorien von Himmelskörpern in die Raumfahrtprogramme aufnehmen. Das wären in erster Linie die Planetoiden, also Vertreter der kosmischen Kleinkörper — aus Gründen, die wir bereits erläutert haben. Als zweites gehören dazu die Satelliten der großen Planeten, vor allem Jupiters und

Saturns, weil sich hier wahrscheinlich die leichtflüchtigen Substanzen und damit Vorgänge der frühen Entwicklung des Planetensystems mit wichtigen Merkmalen studieren lassen. Und abhängig von sich bietender Gelegenheit erfolgen vielleicht schon vom nächsten Jahrzehnt an mit Hilfe von Raumsonden Nahstudien der Kometen, die das innere Planetensystem durchheilen.

Sollten derartige kosmische Programme tatsächlich in einem mit der Gegenwart vergleichbaren Tempo verwirklicht werden, dann dürfte es der kosmischen Geologie und der Planetologie gelingen, ihre große Aufgabe zu lösen – den wissenschaftlichen Vorlauf zu schaffen für die zukünftige stark erweiterte Wirkungssphäre der Menschheit dieser Erde.

Inhalt

- 5 *Planet Erde und die Raumfahrt*
- 6 Geologie aus Raumfahrerperspektiven
- 10 Satellitenbahnen für kosmische Späher
- 20 Fernerkundung – teuer, aber sehr nützlich

- 29 *Rätsel der Eiszeit*
- 30 Leben wir in einer Eiszeit?
- 34 Klimastürze
- 42 Hat die Eiszeit irdische oder kosmische Ursachen?

- 49 *Planetatenatmosphären und Vulkane*
- 50 Eis und Wasser auf dem Mars?
- 61 Uratmosphäre ohne Sauerstoff
- 68 Wie die dritte Atmosphäre der Erde entstand
- 71 Venus – rätselhafte Schwester der Erde
- 75 Satelliten lüften den Schleier
- 85 Gift in der Venusatmosphäre
- 89 Vulkanausbrüche – warum?
- 94 Lebenslauf eines Modellvulkans
- 106 Die Riesenvulkane des Mars

- 117 *Die ruhelose Erde*
- 118 Gebirge sind vergänglich
- 122 Kosmische Verwitterung – von der Raumfahrt entdeckt

- 129 Was verraten die Schichtgesteine?
- 134 Überraschende Ablagerungen am Meeresboden
- 142 Die reißenden Ströme des Mars
- 147 Erschütterungen, die uns erreichten
- 154 Wo Erdbeben zum Alltag gehören
- 162 Das Schalenmodell vom Erdinnern
- 174 Erschütterungen auf anderen Himmelskörpern
- 175 Krustenfahrpläne
- 182 Kontinentalverschiebung aus neuer Sicht
- 192 Gebirge als Zeugen des Zusammenstoßes von Krustenplatten
- 200 Krustenbewegung vor 200 Millionen Jahren
- 203 Kontinentalverschiebungen morgen und übermorgen
- 208 Die Marskruste reißt auf

211 *Kosmische Einflüsse auf die Erde*

- 212 Gäste aus dem Weltraum
- 221 Lebensspuren aus dem Weltraum?
- 223 Zwerge unter den Meteoriten
- 228 Außenseiter des Sonnensystems
- 232 Explodierte ein Komet über Sibirien?
- 239 Meteoritenkrater werden erforscht
- 248 Gefährliche kosmische Geschosse
- 252 Was Planetoiden und Meteorite verbindet

257 *Erdgeschichte aus kosmischer Sicht*

- 258 Sterne im Urnebelstadium
- 262 Älteste Zeugen unseres Planetensystems
- 268 Mond und Erde nehmen Gestalt an
- 273 Und wie geht es weiter?

Planet Erde und die Raumfahrt
Rätsel der Eiszeit
Die ruhelose Erde
Planetenatmosphären und Vulkane
Kosmische Einflüsse auf die Erde
Erdgeschichte aus kosmischer Sicht

Verlag Neues Leben Berlin

