

chemical origine precluding carbon dioxide as the responsible agent.

On the other hand, the decerebrated cats used by BOUCKAERT and coworkers¹ showed no hypoxic hyperpnoea, just as was the case in the permanently denerv-

¹ J. J. BOUCKAERT, K. S. GRIMSON, C. HEYMANS, and A. SAMAN, Arch. Int. Pharmacod. Théor. 65, 63 (1941).

ated unanaesthetized cats and rabbits used by WRIGHT¹.

So it may be that in higher animals under these abnormal conditions a secondary factor plays a role in the respiratory regulation. This factor, easily to be abolished by narcosis, may be connected with the activity of the brain cortex.

(To be continued)

¹ S. WRIGHT, Quart. J. Exp. Physiol. 24, 169 (1934).

Die Assoziation von Radiolarienhornsteinen mit ophiolithischen Erstarrungsgesteinen als petrogenetisches Problem

Von EDUARD WENK¹, Basel

In den Kettengebirgen, die das Mittelmeer umgeben, und in vielen andern jungen und alten Gebirgszügen treten zwei grundverschiedene und eigenartige Gesteinsgruppen in der Regel zusammen auf: kieselige Sedimente, die reichlich Radiolarien enthalten, und eine Gefolgschaft von verschiedenartigen Eruptivgesteinen, die während der Ablagerung der kieseligen Schichtgesteine erstarrt sind und unter denen kiesel-säurearme Typen vorherrschen; es sind dies die sog. Ophiolithe. Radiolarienreiche Gesteine treten in den Schichtfolgen der Erdkruste eher selten auf. Sie sind jeweils auf bestimmte Formationen beschränkt. Im alpinen Raum trifft man sie hauptsächlich im obern Jura an, und sie sind hier mit Ophiolithen vergesellschaftet, wie besonders eindrucklich die Aufschlüsse im Oberhalbstein zeigen (GEIGER², VUAGNAT³). Eine analoge Kombination von Radiolarienhornsteinen und Ophiolithen baut die Danau-Formation Borneos auf, mit der sich der Verfasser beschäftigte und die ihn veranlaßt hat, sich mit der Genese derartiger Assoziationen auf allgemeiner Basis auseinanderzusetzen. Die Entstehung der radiolarienreichen Meeresablagerungen und ihr Verhältnis zu den vergesellschafteten und gleichaltrigen magmatischen Gesteinen bildet in der Tat ein interessantes Problem, das die Biologie, Hydrologie, Geologie und Petrographie in gleicher Weise berührt und uns Gelegenheit gibt, die Resultate verschiedener naturwissenschaftlicher Disziplinen miteinander in Beziehung zu bringen. Zum Ausgangspunkt der Diskussion seien die Organismen, die Radiolarien gewählt.

Radiolarien sind marine Protozoen mit Kieselgerüsten. Diese Kieselgerüste sind auch in Meeresablagerungen der geologischen Vergangenheit gefunden worden, und zwar zuerst in der Radiolarienerde von

Barbados, später in vielen andern Formationen. Radiolarien dienen nicht als Leitfossilien; aber sie geben dem Geologen wertvolle Anhaltspunkte über die Bildungsweise der Sedimente, in denen sie auftreten.

Die Radiolarien sind typische und meist die einzigen Fossilien der Hornsteine und anderer kieseliger Sedimente; sie treten aber auch in Tonen, Mergeln, Tuffen und sogar in Erzanreicherungen auf. Manche Hornsteine sind ganz erfüllt von Radiolarienresten; sie werden deshalb als Radiolarienhornsteine oder kurz als Radiolarite bezeichnet (s. Abbildung).

Die meisten der dichten und harten Kieselgesteine sind vor der Entdeckung der in ihnen erhaltenen Radiolarienreste für vulkanische oder metamorphe Bil-



Hornstein der Danau-Formation von Britisch-Nord-Borneo, erfüllt von Radiolarienresten, mit einigen Kalkitaderchen. Vergrößerung 16 fach.

¹ Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Basel.

² TH. GEIGER, Beitr. Geol. Karte d. Schweiz, Geotechn. Ser. Lief. 27, (1948).

³ M. VUAGNAT, Schweiz. min. petr. Mitt. 28, 263 (1948).

dungen gehalten worden. Mit dem Nachweis von Fossilresten mußten die kieseligen Gesteine aber als marine Ablagerungen, als echte Sedimente aufgefaßt werden. Über ihre Entstehung konnte durch den Vergleich mit den Bildungsbedingungen rezenter analoger Sedimente Näheres ausgesagt werden.

Radiolarien leben heute in allen Meerestiefen. Die Formen der verschiedenen Tiefenstufen unterscheiden sich jedoch; die kräftigsten Gerüste sind in den großen Tiefen gefunden worden. Die Tiefseeforschung hat gezeigt, daß Radiolarien sehr verbreitet sind, daß aber radiolarienreiche, kalkarme Sedimente gegenwärtig nur in einigen Tiefseeregionen des Indischen und Pazifischen Ozeans gebildet werden. Dieser sog. Radiolarienschlick wird hauptsächlich in Tiefen von 3500 bis 6500 m abgelagert. Den Tiefseeregionen dieser Ozeane wird terrigenes Material wegen der großen Entfernung vom Festland in sehr geringer Menge und nur in den feinsten Fraktionen zugeführt. Fast alles Karbonatmaterial wird beim Absinken gegen den Meeresboden aufgelöst, so daß – nach der üblichen Interpretation – die viel schwerer löslichen Kieselgerüste der Radiolarien einen hohen Prozentsatz der überaus langsam sich bildenden Tiefseesedimente darzustellen vermögen. Die Sedimentationsgeschwindigkeit des Radiolarienschlicks ist nicht bekannt; diejenigen des mit ihm verwandten roten Tiefseeton ist nach verschiedenen übereinstimmenden Berechnungen von der Größenordnung von ca. 5 mm pro 1000 Jahre. Eine 100 m mächtige Serie von rotem Tiefseeton entspricht einem Zeitraum von 20 Millionen Jahren. Oft ist auch vulkanisches Material am Aufbau der Tiefseesedimente wesentlich beteiligt, wodurch die Sedimentationsgeschwindigkeit wohl wesentlich erhöht wird.

Auf Grund dieser Resultate der Tiefseeforschung und in Anwendung des Gedankens, daß in der geologischen Vergangenheit die gleichen Faktoren und Prozesse am Werke waren, die heute gültig sind, wurden die fossilen Radiolarite als diagenetisch verkieselter Radiolarienschlick und folglich als Tiefseesedimente gedeutet. Diese auf dem Aktualitätsprinzip fußende Deutung ist in bezug auf die Radiolarienhornsteine wohl erstmals von PANTANELLI¹ im Jahre 1880 vorgeschlagen worden, nachdem schon 1875 EHRENBURG² die losen Radiolarienerden ähnlich gedeutet hatte.

Die Tiefseehypothese ist um die Jahrhundertwende hauptsächlich von MOLENGRAFF³ und von STEINMANN⁴ mit großem Nachdruck verfochten worden. Viele Radiolarite enthaltende Schichtfolgen sind als Tiefseeablagerungen gedeutet worden, so u. a. auch alpine Vorkommen. Alle diese Interpretationen wurden aber nachträglich dahin eingeschränkt, daß es sich

wohl um Tiefseebildungen, nicht aber um landferne Ablagerungen, und somit nicht um echte ozeanische Formationen handle. Der Grund hiefür liegt in folgendem:

Keine der großen Hornsteinformationen der Erdkruste genügt allen an eine ozeanische Bildung zu stellenden Anforderungen. Vor allem die uns besonders interessierenden und so häufigen Radiolarite der Geosynklinalserien der Kettengebirge sind meist mit küstennahen klastischen Sedimenten assoziiert, oder sie gehen unvermittelt in mergelige Gesteine über. Außerdem dehnen sich ihre Schichten nicht allseitig über riesige Distanzen und in gleicher Zusammensetzung und gleicher Mächtigkeit aus, sondern sie bilden wohl langgestreckte, aber schmale Zonen, die lateral rasch in Seichtwassersedimente übergehen. Fast alle Geologen stimmen deshalb darin überein, daß diese Radiolarite zwar in Tiefseeegräben abgelagert worden seien, daß aber Landnähe angenommen werden müsse. Immer wieder wird in Monographien und Lehrbüchern darauf hingewiesen, daß dabei Sedimentationsbedingungen vorgelegen haben müssen, wie sie heute in den Antillen und im Malaiischen Archipel verwirklicht sind: in den von Kontinentmassen und Inseln umrahmten Tiefseen wurde in den Vortiefen das klastische Material zurückgehalten und in den anschließenden Tiefseeegräben oder Tiefseebecken Radiolarienschlick und Tiefseeton abgelagert. *Diese Interpretation des Geologen steht nun aber im Widerspruch zu den neuesten Ergebnissen der Tiefseeforschung in den zum Vergleich herangezogenen Gebieten:*

Dank den Forschungen der *Snellius-Expedition* 1929/30 sind wir besonders gut über die rezenten Sedimentationsbedingungen in Insulinde unterrichtet. Die 1943 publizierten eingehenden Untersuchungen von G. A. NEEB¹ zeigen, daß in den Tiefseebecken im östlichen Teil des Malaiischen Archipels die rezenten Sedimente aus 4000 bis 7000 m Tiefe am reichsten an Radiolarien sind, daß aber der Radiolariengehalt in keiner der 223 untersuchten Bodenproben 6,7% übersteigt. Radiolarienschlick muß aber zum mindesten zu 30% aus den Kieselgerüsten dieser Organismen bestehen. *Es wird somit in keinem der von Inseln umrahmten Tiefseebecken und in keinem der landnahen Tiefseeegräben Radiolarienschlick abgelagert.* Auch im über 10000 m tiefen Philippinentrog fehlen diese charakteristischen Tiefseesedimente. Sie stellen sich erst im offenen Pazifik und Indik ein. Auch im Antillengebiet sind keine rezenten Radiolariantone gefunden worden.

Trotzdem muß der Geologe an der Tatsache festhalten, daß radiolarienreiche kieselige Sedimente in manchen Formationen der geologischen Vergangenheit in küstennahem Milieu auftreten. Nur kann er sich jetzt nicht mehr auf aktuelle Vorgänge berufen. Es be-

¹ D. PANTANELLI, Atti R. Accad. Lincei 8, 35 (1880).

² C. G. EHRENBURG, Abh. Kgl. Akad. Wiss., Berlin 1 (1875).

³ G. A. MOLENGRAFF, Geologische Verkenningstochten in Centraal-Borneo (Leiden 1900).

⁴ G. STEINMANN, Ber. Natf. Ges. Freiburg i. Br. 16, 18 (1905).

¹ G. A. NEEB, Scient. Res. Snellius Exp. Vol. V, Part 3, Sect. II (1943).

deutet dies nicht, daß er sich vom Aktualitätsprinzip löst; denn am Meeresboden spielen sich heute viele geologisch wichtige Phänomene ab, die der Beobachtung und Registrierung entzogen sind. Auch der Kristallin-geologe muß sich ja vielfach mit Phänomenen befassen, die sich innerhalb der Erdkruste abspielen und deren Ablauf er nicht beobachten kann.

Das Radiolaritproblem ist heute wieder gleich aktuell wie im letzten Jahrhundert. Im Jahre 1947 hat H. GRUNAU¹, von schweizerischem Gesteinsmaterial ausgehend, die Argumente *pro et contra* Tiefseehypothese wieder auf breiter Grundlage diskutiert. Wir müssen es hier prinzipiell als eine Einengung des Problems betrachten, daß bis heute die Ablagerungstiefe im Vordergrund der Diskussion steht. Von viel elementarerer Wichtigkeit ist doch das Kieselsäureproblem! Ablagerung in sehr tiefem Wasser landferner tropischer Meere *allein* erklärt den Radiolarienreichtum der Sedimente keineswegs. Denn auch im offenen Indischen Ozean tritt Radiolarianschlamm nur lokal auf (siehe Fig. 1 in: W. SCHOTT, 1939, pag. 398²), und er fehlt den angrenzenden, gleich tiefen und landfernen Meeresgebieten. *Außer der geographischen Breite, Landferne, Tiefenstufe, Temperatur und Druck müssen noch andere Faktoren die Bildung dieser speziellen Sedimente begünstigen.* Im Interesse einer unvoreingenommenen Diskussion sollte man sich auch nicht darauf festlegen, daß die Radiolarien im Sinne der eng gefaßten Tiefseehypothese Relikte von ursprünglich viel reicheren, aber beim Absinken auf den Meeresboden größtenteils aufgelösten Faunen darstellen, sondern man muß auch die Möglichkeit in Betracht ziehen, daß die kieseligen Organismen unter den herrschenden Bedingungen die einzigen waren, die reichlich gedeihen konnten. Die Lebensbedingungen waren vielleicht günstig für kieselige Organismen, ungünstig für Kalkschaler. Dies schließt Ablagerung in der landfernen Tiefsee nicht aus, verlangt sie aber auch nicht.

Betrachten wir zunächst die *chemische Zusammensetzung* der rezenten und fossilen radiolarienreichen Sedimente: Die Kieselskelette der Radiolarien bestehen aus Opal, aus Chalzedon oder aus feinfasrigem bis feinkörnigem Quarz. Die aezenten Radiolarianschlicke bestehen zu 55 bis 60 Gew.-% aus SiO_2 , zu 10–13% aus Al_2O_3 und zu 15–17% aus Fe_2O_3 und MnO_2 . Der Chemismus der fossilen Radiolarienhornsteine variiert stark. Einige haben ähnliche Zusammensetzung wie die rezenten Sedimente. In der Regel sind sie aber viel reicher an Kieselsäure; sie bestehen bis zu 98% aus SiO_2 . Dieser Unterschied spricht nicht für eine analoge Bildung; er spricht aber auch nicht dagegen, denn die noch ungenügend erforschten diagenetischen Vorgänge spielen jedenfalls eine sehr wichtige Rolle. Ein hoher Gehalt an Eisen und Mangan ist

den rezenten und den fossilen Radiolarienablagerungen gemeinsam. Die Radiolarite gehen vielfach in lateraler und temporaler Richtung in sterile Hornsteine über, und oft treten die Radiolarien in den eintönigen Abfolgen kieseliger Gesteine nur sporadisch auf. Die Entstehung der sterilen Hornsteine ist umstritten. Nach den einen Forschern sind sie diagenetisch stark verkieselte biochemische Sedimente, nach anderen aber anorganisch-chemische Ausfällungen. Gleichgültig, welchem Standpunkt wir uns anschließen, so stellt sich die Frage: Woher stammt der Kieselsäuregehalt der biochemischen und anorganisch-chemischen Ablagerungen?

Die Kieselsäure stammt aus dem Meerwasser. Sie ist darin einestails in gelöster Form – nach den neueren Untersuchungen in Form des Ions SiO_3^{2-} – enthalten, andernteils in chemisch gebundener Form, in Gestalt von suspendierten Silikat- und Siliziumoxydpartikeln.

1. Die Konzentration der gelösten *Kieselsäure* ist im Meerwasser *minim.* Sie beträgt durchschnittlich 2 mg pro l. In Flußwässern ist viel mehr Kieselsäure gelöst. In nordamerikanischen Flüssen wurde 1944 durchschnittlich zwischen 10 und 20 mg gelöste Kieselsäure pro l bestimmt. Dieser große Unterschied in der Zusammensetzung von Flußwasser und Meerwasser steht hier nicht zur Diskussion. Wichtig bleibt die minimale Konzentration gelöster Kieselsäure im Meerwasser. Es ist schon von MURRAY¹, dem großen Forscher der Challenger-Expedition vermutet worden, *daß sie zu gering sei, um die reichliche Entwicklung von kieseligen Organismen zu erklären.* Leider fehlen exakte Daten zu dieser Frage; wir sind über die Kieselsäurekonzentration in jenen Meeresgebieten, in denen heute Radiolarianschlick abgelagert wird, sehr schlecht unterrichtet.

2. Die *chemisch gebundene* Kieselsäure spielt auch in der landfernen Tiefsee eine wichtige Rolle, bestehen doch die Tiefseetone aus den feinsten Fraktionen von Tonmineralien, Feldspat, Pyroxen, Hornblende und aus vulkanischem Glas. Diese im Seewasser suspendierten Stoffe stammen vom Lande her, z. T. auch von submarinen vulkanischen Eruptionen. Kommt dieses Material als Kieselsäurequelle der Radiolarien in Betracht?

MURRAY hatte festgestellt, daß kieselige Organismen in jenen Teilen der Ozeane häufig auftreten, die am meisten suspendiertes Material enthalten. Zur Abklärung dieses Zusammenhanges hat er zusammen mit IRVINE² Experimente mit Diatomeen angestellt. Diese ergaben, daß die kieseligen Organismen sich in kiesel-säurefreien Nährlösungen rasch entwickeln, sobald entweder kolloidale Kieselsäure oder nur fein pulverisierter Ton beigelegt wird. Die Diatomeen bauen die Alumosilikate ab und beziehen daraus die Kieselsäure

¹ H. GRUNAU, *Geologie von Arosa*. Diss. (Bern 1947).

² W. SCHOTT, in: P. D. TRASE, *Recent marine sediments* (Tulsa, 1939).

¹ J. MURRAY und A.-F. RENARD, *Deep Sea Deposits*, Rep. Scient. Results "Challenger"-Exp. (London, 1891).

² J. MURRAY und R. IRVINE, *Proc. Roy. Soc. Edinb.* 18, 229 (1891).

zum Skelettbau. MURRAY und IRVINE vermuteten, daß die suspendierten Silikate für das Wachstum der Kieselalgen wichtiger seien als die im Meerwasser gelöste Kieselsäure. Leider scheinen analoge Experimente mit Radiolarien noch nicht durchgeführt worden zu sein. Sie wären für den Geologen von eminenter Wichtigkeit.

Einige Resultate der Snellius-Expedition sind in dieser Hinsicht von Interesse: Es wurde festgestellt, daß unter den Tiefseebodenproben aus dem Malaiischen Archipel die feinen vulkanischen Tone, die vorwiegend aus Silikaten bestehen, am meisten, und die terrigenen Tone mit quarzreichem Detritus am wenigsten kieselige Organismen enthalten. Von G. A. NEEB (1943, pag. 247/48¹) ist auf Grund von diesen Ergebnissen vermutet worden, daß die Kieselsäurekonzentration im Meerwasser, welche die Bildung und Wiederauflösung von kieseligen Organismen beeinflußt, offenbar von der Zusammensetzung und von der Korngröße des absinkenden terrigenen Materials abhängig sei. Die feinen Fraktionen haben geringere Sinkgeschwindigkeit und pro Gewichtseinheit die größere Oberfläche im Kontakt mit Seewasser als die gröberen Fraktionen. Deshalb sollen die feinen Fraktionen – Reaktionsfähigkeit vorausgesetzt – am ehesten gelöste Kieselsäure abgeben. Zu diesem Argument darf ergänzt werden, daß allein schon durch das starke Zurücktreten des schwerlöslichen Minerals Quarz in den feinen Fraktionen die Löslichkeit pro Gewichtseinheit Suspension erhöht wird.

Wie dem auch sei, ob nun die Silikatpartikelchen direkt auf biochemischem Wege abgebaut werden oder ob sie erst gelöst und dann von den kieseligen Organismen aufgebraucht werden; das wichtige an diesen Überlegungen ist folgendes: Auch die Tiefseeforscher stehen einem Kieselsäureproblem gegenüber. Sie suchen nach Quellen, welche die an und für sich geringe Konzentration erhöhen können und glauben, daß ihnen die mineralogische Zusammensetzung der Bodenproben weitere Anhaltspunkte geben könne. Hier ist der Berührungspunkt mit der Geologie und Petrographie. Den Bodenproben des Tiefseeforschers entsprechen die Gesteine des Geologen. Dem Geologen steht ein viel reicheres und leichter zugängliches Untersuchungsmaterial zur Verfügung. Befassen wir uns mit seinen Überlegungen und Folgerungen.

Das für die Deutung geologischer Serien so überaus wichtige Kriterium der Assoziationsverhältnisse, der Begleitgesteine, ist beim Radiolaritproblem von ganz besonderer Bedeutung. Wir haben schon gesehen, daß das Zusammenauftreten der kieseligen Sedimente mit klastischen und karbonatreichen Gesteinen bei der Interpretation berücksichtigt werden muß. Es ist aber noch eine weitere Gesteinsgruppe regelmäßig mit den Radiolariten vergesellschaftet. In den Geosynklinal-

serien der Faltengebirge sind die Radiolarite in der Regel mit ungefähr gleichaltrigen magmatischen Gesteinen von basischem Chemismus assoziiert. Es sind dies die sog. *Ophiolithe*: Serien von Serpentin, Gabbro, Diabas, Spilit, und mannigfachen Tuffen. Die Assoziation dieser teils intrusiven, teils extrusiven, teils pyroklastischen Gesteine ist auf der ganzen Erde verbreitet. Man findet sie in den Alpen, im Apennin, in England, Kalifornien, Westindien, Australien, im Malaiischen Archipel, um nur einige gut untersuchte Beispiele zu nennen. Dieses Zusammenauftreten hat schon die Geologen des vergangenen Jahrhunderts intrigiert und sie zur Diskussion des Problems angeregt. Später hat vor allem STEINMANN¹ mit großem Nachdruck auf die Unzufälligkeit dieser Kombination hingewiesen. In seiner inhaltlich und stilistisch ausgezeichneten und mit Recht viel zitierten Arbeit aus dem Jahre 1905 hat er von einem symbiotischen Auftreten der beiden Gesteinsgruppen gesprochen. Die Hornsteine, Radiolarite und roten Tone hielt STEINMANN auf Grund der schon von früheren Forschern vorgebrachten Argumente für Tiefseesedimente. Unter den großen Meerestiefen, in denen diese Sedimente abgelagert werden, sollen sich nach seiner Interpretation magmatische Massen von extremer Basizität ansammeln, die bei der Auffaltung der abyssischen Regionen mit aufsteigen und zur Intrusion gelangen. Diese Auffassung, daß unter der Tiefsee schwere basische bis ultrabasische Massen vorhanden sind, ist seither durch die Schweremessungen bestätigt worden. Die großen morphologischen Depressionen im Malaiischen Archipel und im Pazifik sind Gebiete mit Schwereüberschuß. Die Paragenese Radiolarit/Ophiolith findet so eine einleuchtende Erklärung; *aber das Kieselsäureproblem ist damit nicht gelöst.*

Die Symbiose scheint in der Tat wesentlich enger zu sein. Verschiedene Geologen petrographischer Richtung haben Argumente dafür angeführt, daß nicht lediglich eine gemeinsame Ursache für die Eruption basischer Magmen und für die Ablagerung von Radiolarien führenden kieseligen Sedimenten vorliege, sondern daß die Eruptionen die Bildung von Radiolarienhornstein begünstigten oder gar kausal bedingten. Dieser Gedankengang ist lange vor STEINMANNs Arbeiten von italienischen Geologen entwickelt worden.

PANTANELLI, der im Jahre 1880² die Radiolarienhornsteine der Toskana als Tiefseesedimente interpretiert hatte, ist drei Jahre später auf diese Deutung zurückgekommen³, da sie ihn auf Grund von neuen Beobachtungen nicht mehr befriedigte. PANTANELLI ist damals schon die gesetzmäßige Verknüpfung der Radiolarite mit basischen Eruptiva aufgefallen. Er konnte beobachten, daß die konkordant in den Sedimenten eingeschalteten Ophiolite oft aus sphäroidalen

¹ G. A. NEEB, Scient. Res. Snellius Exp., Vol. V, Part 3, Sect. II (1943).

² G. STEINMANN, Ber. Natf. Ges. Freiburg i. Br. 16, 18 (1905).

³ D. PANTANELLI, Atti R. Accad. Lincei, Ser. 3, 8, 35 (1880).

³ D. PANTANELLI, Proc. verb. Soc. tosc. 3, 212 (1883).

Blöcken bestehende Bänke bilden und daß die gut geschichteten Radiolarienhornsteine im Hangenden dieser sog. Kissenlaven in die Vertiefungen zwischen den einzelnen Kissen hinabgreifen. Die Zwischenräume der sphäroidalen Blöcke sind von vulkanischen Brekzien, Tuffen oder von Hornstein ausgefüllt und diese Matrix der Kissenlaven führt oft reichlich Radiolarien. PANTANELLI folgerte deshalb, daß submarine *Lavaergüsse während der Ablagerung der Radiolarienhornsteine* stattgefunden haben, daß also Lava- und Sedimentgesteine kontemporär und syngenetisch seien. Der Autor stellte dann die ebenso originelle wie etwas phantastische Hypothese auf, daß durch den Ausfluß der Laven am Meeresboden spezielle Bedingungen entstanden seien, welche die natürlichen tierischen Feinde der Radiolarien vernichtet und diesen als einzigen überlebenden Organismen eine außergewöhnliche Entfaltung ermöglicht haben. Der dieser Theorie zugrunde liegende Gedankengang, daß submarine Extrusionen Bedingungen schaffen, welche die Entwicklung von kieseligen Organismen fördern, ist stichhaltig und findet sich bei anderen Autoren wieder.

Im Jahre 1886 ist LOTTI¹ anlässlich seiner sorgfältigen geologischen Untersuchung der Insel Elba zu ähnlichen Folgerungen gekommen. LOTTI glaubte, daß in der Schlußphase der Ophiolithförderung und im Verlaufe der Ablagerung der zu interpretierenden Sedimente am Meeresboden kieselensäure- und alkalireiche Quellen entstanden, welche die schon abgesetzten, ursprünglich tonigen Sedimente silifizierten und gleichzeitig die enorme Entwicklung von Radiolarien im Meerwasser förderten. LOTTI dachte somit an eine *postmagmatisch-hydrothermale Beeinflussung und Veränderung der in Bildung begriffenen und der schon abgelagerten Sedimente*. Der Zusammenhang zwischen den basischen Magmen und den sauren Quellen blieb aber unklar.

Diese Beziehungen wurden erst durch spätere petrographisch-mineralogische und petrochemische Untersuchungen aufgeklärt. Durch solche Studien ist von einer ganzen Reihe von Forschern gezeigt worden, daß unter den Ophiolithen, die mit kieseligen Sedimenten assoziiert sind, *Tuffe* und die sonst seltenen *Spilite* auffallend häufig, ja geradezu *leitend* sind. Besonders die für submarine Effusion oder doch für Intrusion in unkonsolidierten Schlamm diagnostischen *Kissenlaven* bestehen aus diesen eigenartigen Gesteinen. Spilite sind natron-, wasser- und oft auch karbonatreiche alkalibasaltische Gesteine, die meist an Kieselensäure untersättigt oder gerade gesättigt sind. Sie führen an Stelle des für basaltische Gesteine normalen Mineralbestandes von kalkreichem Plagioklas, Pyroxen und Olivin die abnormale und für epithermale Bildungen charakteristische Kombination natronreicher Plagioklas, Chlorit, Serpentin, Epidot, Titanit, Pum-

pellyit, Fe- und FeTi-Erze, Zeolithe und Kalzit. Dieser Mineralbestand ist teils während der Erstarrung der Schmelze, teils erst durch nachträgliche Umwandlung entstanden, An Stelle von Kalziumalumosilikat (anorthitreicher Plagioklas) wurde also Natriumalumosilikat (Albit) gebildet und das Kalzium wurde karbonatisch gebunden. An Stelle der MgFe- und MgFeCa-Silikate (Olivin, Pyroxen) und teilweise zusammen mit diesen wurden wasserhaltiges Mg-Silikat (Serpentinminerale) und wasserhaltige Mg-Alumosilikate (Chloritminerale) gebildet unter Aufnahme von H₂O und Bildung von Eisenoxyd. Bei diesen Prozessen wird trotz der Albitbildung SiO₂ zum Teil frei, während die Tonerde an Chlorit und Epidot gebunden wird.

Solch ein Spezialverlauf der magmatischen Differentiation, wie er 1911 von DEWEY und FLETT¹ zuerst beschrieben und 1945 von NIGGLI² erneut umrissen wurde, tritt ein, wenn basaltisches Magma, das reich an Kohlensäure, Wasser, Natron und anderen leichtflüchtigen Bestandteilen ist, zu kristallisieren beginnt. *Der Differentiationsverlauf kann zur Bildung von extrem kieselensäure- und natronreichen Spaltungsprodukten* (Quarzkeratophyren usw.) und von Fe- und Mn-reichen Teilschmelzen führen. Häufiger, und besonders wenn noch wenig differenziertes Magma gangartig in andere Gesteine eindringt, wandern aber die charakteristischen Komponenten der Restschmelzen in das Nebengestein ab und bilden dort albitreiche, kieselige oder karbonatische Kontaktgesteine (Adinole, Spilosite, Hornsteine u. a.). Auch die schon erstarrten Magmagesteine werden je nach dem Vorherrschen der einen oder anderen Phase albitisiert, silifiziert, karbonatisiert, epidotisiert oder vererzt. *Diese postmagmatisch-hydrothermalen und metasomatischen Veränderungen und Kontaktbildungen beweisen, daß bei der Intrusion und Erstarrung von spilitischen Magmen in den äußeren Schalen der Erdkruste unter anderem Kieselensäure in das Nebengestein abwandert.*

Wohin gelangen aber diese Stoffe bei der submarinen Effusion und bei der Erstarrung im Grenzbereich zwischen Lithosphäre und Hydrosphäre? Darauf haben DEWEY und FLETT, von britischem Gesteinsmaterial ausgehend, eine Antwort gegeben, die seither mehrfach bestätigt und in Details modifiziert worden ist: *Die im Überschuß vorhandenen natron- und kiesel-säurereichen Lösungen und Dämpfe entweichen in das Meerwasser und schaffen dort auf weite Distanzen ausgezeichnete Bedingungen für die Entwicklung kieseliger Organismen und fördern auch die anorganische Ausfällung von Kieselensäure.* Diese Interpretation wird dem Umstand gerecht, daß die mit der Effusion spilitischer Magmen syngenetischen Sedimente oft eine ähnliche stoffliche Zusammensetzung aufweisen wie die durch die intrusiven Spilite kontaktmetamorphosierten Se-

¹ H. DEWEY und J. S. FLETT, Geol. Mag. 8, 202 (1911).

² C. BURRI und P. NIGGLI, *Die jungen Eruptivgesteine des mediterranen Orogens*, I (Zürich 1945).

¹ B. LOTTI, Mem. descr. carta geol. d'Italia, Vol. 2 (1886).

dimente; sie erklärt den auf Grund von rein geologischen Argumenten erkannten genetischen Zusammenhang zwischen Radiolarit und Ophiolith und löst das Kieselsäureproblem.

Die Interpretation von DEWEY und FLETT darf heute in zwei Punkten ergänzt werden: Das bei der Spilitreaktion wirksame und auch bei submarinen Vulkanausbrüchen als wichtiges vulkanisches Gas in das Seewasser gelangende Kohlendioxyd spielt eine wichtigere Rolle als früher angenommen wurde. Nach WATTENBERG¹ hängt die Löslichkeit vom Kalk, abgesehen von der Temperatur und vom hydrostatischen Druck, sehr stark vom Gehalt an Kohlendioxyd im Wasser ab. Schon eine so geringe Kohlensäurekonzentration wie die der Luft erhöht die Löslichkeit von 16 mg pro l auf 61 mg. Die mit den submarinen Effusionen und Explosionen verbundene Abgabe von CO₂ dürfte somit bei der Schaffung von Bedingungen, wie sie sonst nur in der landfernen Tiefsee verwirklicht sind, wesentlich beteiligt sein. Absinkende Kalkschalen werden aufgelöst und kieselige Organismen finden günstige, Kalkschalen ungünstige Lebensbedingungen.

Der zweite Punkt betrifft die Bedeutung der als Glieder der Ophiolithsippe auftretenden, aber auch ohne Beisein von Lavagesteinen mit den radiolarienreichen Sedimenten wechsellagernden Tuffe (Barbados, Vöge, usw.). Wenn durch Vulkanausbrüche solch feinkörniges Silikatmaterial reichlich gefördert wird und langsam absinkt, dürften kieselige Organismen günstige Lebensbedingungen finden, sei es durch biochemischen Abbau der Aschen oder auf indirektem Wege, durch deren Auflösung und dadurch bedingte Erhöhung der Kieselsäurekonzentration im Meerwasser. Auch Mineralumwandlungen wirken im gleichen Sinne. Beim Studium von tertiären Tuffen und Tuffiten des Malaiischen Archipels ist dem Verfasser aufgefallen, daß bei der marinen Sedimentation die Pyroxen- und Hornblendekristalle der vulkanischen Aschen rasch in Epidot-, Chlorit- und Serpentinminerale umgewandelt werden, während die Feldspate frisch bleiben. Bei diesen Umwandlungen entstehen niedriger silifizierter Mineralien; es wird Kieselsäure abgegeben, die in keine neugebildete Mineralphase eingeht. Diese Feststellung knüpft direkt an die vorher erwähnten, von den Tiefseeforschern gefundenen Zusammenhänge an.

Die Petrographen können somit eine Reihe von Reaktionen anführen, die den Kieselsäurehaushalt in den von kieseligen Organismen bevölkerten Meeresgebieten zu beeinflussen vermögen. Nicht nur die Assoziation von radiolarienreichen kieseligen Sedimenten mit spilithischen Ergußgesteinen, sondern auch ihre Vergesellschaftung mit Tuffen kann als Folge der Effusion wasserreicher alkalibasaltischer Magmen und als Folge der damit verbundenen oder auch selbständig auftretenden submarinen vulkanischen Explosionen und Ex-

halationen gedeutet werden. Diese Prozesse sind nicht an bestimmte Meerestiefen gebunden, sie können auch in landnahen Ozeangebieten Bedingungen schaffen, wie sie sonst nur in der landfernen Tiefsee verwirklicht sind.

Die Beeinflussung von ophiolithischem Magma einerseits, Meerwasser und Sediment andererseits erfolgt nicht einseitig. Es ist hier, dem Thema entsprechend, nur von der Wirkung subaquatisch ausfließenden Magmas auf das Meerwasser und auf syngenetische Sedimente die Rede gewesen. Daß sich dabei die Zusammensetzung des Schmelzflusses schon allein dadurch ändert, daß magmatische Lösungen und Dämpfe entweichen können, ist selbstverständlich. So dürfte zum Beispiel der Umstand, daß kieselsäure- und alkali-reiche Eruptivgesteine (Quarzkeratophyre) selten als Glieder der syngenetischen Ophiolith/Radiolarit-Assoziationen auftreten, durch die besprochenen Stoffwanderungen bedingt sein. Auch das spezielle Gefüge der magmatischen Gesteine (pillow = Kissenlaven) steht im Zusammenhang mit der Effusion am Meeresboden. Verschiedene Forscher (DALY¹, BESKOW², GILLULY³) haben aber nicht nur eine mechanische, sondern auch eine stoffliche Beeinflussung der Laven durch den Kontakt mit überhitztem Meerwasser und unkonsolidierten nassen Sedimenten postuliert (Erhöhung des Wasser- und Na-Gehalts im Magma, Beeinflussung der Kristallisationsvorgänge usw.). Dies sind jedoch Fragen, die hier nicht zur Diskussion stehen.

Wir sind bei der Diskussion des geologischen Problems, welches das Zusammenauftreten von Radiolariten und Ophiolithen stellt, von hydrobiologischen und hydrologischen Ergebnissen ausgegangen, haben diesen die geologischen Gesichtspunkte gegenübergestellt, und haben schließlich in der petrographischen Beschaffenheit der assoziierten Eruptivgesteine, ihrer Kontaktbildungen und ihrer Beziehungen zu den Radiolarienhornsteinen einen Schlüssel für das Kieselsäureproblem gefunden. Ein von den Geologen frühzeitig erkannter Zusammenhang, der zeitweise in Vergessenheit geraten war, ist immer wieder als Ausgangspunkt aufgegriffen und weiter verfolgt worden, bis schließlich mit der zunehmenden Entwicklung der petrographisch-mineralogischen und petrochemischen Methoden eine befriedigende Erklärung gefunden wurde.

Das, was durch eine ganze Reihe von Forschern am Material der geologischen Vergangenheit abgeleitet werden konnte, sollte bei kommenden Tiefsee-Expeditionen überprüft werden. Es müssen die Wechselbeziehungen zwischen der Zusammensetzung der Bodenproben und der entsprechenden Wasserproben erforscht werden, sowohl in jenen Ozeangebieten, in denen heute Radiolarienschlick gebildet wird, als auch

¹ H. WATTENBERG, Meteor-Exp. Wiss. Erg. Bd. 8, 2. Teil, 122 (1933).

¹ R. A. DALY, *Igneous rocks and their origin* (New York, 1914).

² G. BESKOW, Sveriges Geol. Undersökn., Ser. C, No. 350 (1929).

³ J. GILLULY, Amer. J. Sci., 5. Ser., 29, 225 (1935).

in den benachbarten Gebieten gleicher Tiefe, in denen radiolarienarmer Tiefseeton oder Globigerinenschlick abgelagert wird. Das im weitesten Sinne naturwissenschaftliche Problem geht damit an die Tiefseeforschung zurück.

Summary

In many geosynclinal formations highly siliceous sediments, especially radiolarian cherts, are found associated with igneous rocks poor in silica content. These form a suite of extrusive, pyroclastic and subordinately intrusive rocks, embracing serpentine, gabbro, basalt, diabase, spilite, and various types of tuff and tuff-breccia, which are grouped together as ophiolites (greenstones) in continental usage. The sediments and ophiolitic rocks are contemporaneous and compose a paragenesis which is not incidental, as was demonstrated

already by early Italian explorers (PANTANELLI, 1883, LOTTI, 1886).

The paper reviews the silica problem offered by the radiolarian cherts and refers to results obtained and to theories advanced by hydrobiologists, hydrologists, and geologists. A clue to the problem is seen in the composition of the associated magmatic rocks, in their contact phenomena, and in their relations to the cherts.

By several petrologists attention has been directed to reactions that can influence the silica concentration of sea-water. The association of radiolarian cherts with extrusive rocks of spilitic composition and with tuffs can be explained as being effected by submarine effusions of alkalibasaltic magma, rich in volatile constituents, by submarine exhalations (CO₂, SiO₂, etc.) and explosions producing much tuffaceous material suspended in the sea-water. By these processes such conditions as are found in the deep-sea regions of the open oceans may be created at any distance from the shore.

Brèves communications - Kurze Mitteilungen
Brevi comunicazioni - Brief Reports

Les auteurs sont seuls responsables des opinions exprimées dans ces communications. - Für die kurzen Mitteilungen ist ausschließlich der Autor verantwortlich. - Per le brevi comunicazioni è responsabile solo l'autore. - The editors do not hold themselves responsible for the opinions expressed by their correspondents.

Eine neue Gesetzmäßigkeit in der Häufigkeitsverteilung der Isotope: der N₄-Effekt¹

Seit den Arbeiten von HARKINS² und HEISENBERG³ wissen wir, daß die Protonen und Neutronen im Kern zu Zweierschalen zusammentreten. Eine Bildung von größeren Aggregaten als Zweierschalen galt bisher nach v. WEIZSÄCKER⁴ für sehr unwahrscheinlich. Dessenungeachtet zwingt, wie gezeigt werden soll, ein großer Komplex von Erscheinungen zu der Annahme, daß sich die N₂-Schalen unter nochmaligem Stabilitätsgewinn verdoppeln, d. h. N₄-Schalen bilden. Es spalten daher die beiden Kerngruppen mit gerader Neutronenzahl in je zwei Untergruppen auf, mit $N = 4n$ und $N = 4n + 2$. Sehr merkwürdig ist dabei, daß nicht, wie wegen der Bildung von N₄-Aggregaten eigentlich zu erwarten wäre, die $N = 4n$, sondern die $N = 4n + 2$ die größere Stabilität (Häufigkeit) zeigen. Man muß daraus schließen, daß eine N₂-Schale eine besondere Baufunktion hat, während die übrigen nach Möglichkeit zu N₄-Schalen zusammentreten, wobei der jedesmalige Abschluß einer solchen ein häufigkeitsmäßig dominierendes Isotop bedeutet.

Über den zahlenmäßigen Nachweis des neuen Effekts kann an dieser Stelle nur in gedrängter Kürze berichtet werden:

1. Schon zahlreiche Autoren¹ haben bemerkt, daß gewisse N-Werte durch ihre selektive Stabilität ausgezeichnet sind ($N = 30, 50, 82, 126$). Daß diese Zahlen dem Typ $N = 4n + 2$ angehören und daß diese Gesetzmäßigkeit sich nicht auf einige wenige N-Werte beschränkt, sondern eine allgemeine Erscheinung ist, wurde aber nicht erkannt.

2. WEFELMEIER³ hat im Samarium eine scheinbar ungewöhnliche Häufigkeitsverteilung nachgewiesen. In Wirklichkeit handelt es sich um die allgemeine Begünstigung der $N = 4n + 2$:

62 Sm m	144	146	148	150	152	154
N	82	84	86	88	90	92
H	3%	0%	14%	5%	26%	20%

(Die begünstigten N-Werte sind in Schrägschrift dargestellt.)

3. Separiert man aus jeder z-geraden Plejade das optimale (= häufigste) massengerade Isotop, so weist dieses in aller Regel eine Neutronenzahl = $4n + 2$ auf:

Z	26 Fe	28 Ni	30 Zn	32 Ge	...	88 Ra	90 Th	92 U
m optimal	56	58	64	74	...	226	232	238
N	30	30	34	42	...	138	142	146

Ausnahmen: Kr, Mo, Pd, Rn.

4. Von Cd bis Sm beträgt die %-Summe aller Isotope mit $N = 4n + 2$ 442%, aller Isotope mit $N = 4n$ nur 186%.

¹ Vorläufige Mitteilung. Abkürzungen in Text und Abbildungen:

m	Massenzahl	H	Häufigkeit in %
z	Ladungszahl	h	reduzierte Häufigkeitszahl
	Ordnungszahl	g	gerade, u ungerade
N	Neutronenzahl	n	ganze Zahl

² W. D. HARKINS, Z. Phys. 50, 97 (1928).

³ W. HEISENBERG, Z. Phys. 78, 156 (1932).

⁴ C. F. v. WEIZSÄCKER, Z. Phys. 96, 431 (1935).

¹ W. M. ELSASSER, V. M. GOLDSCHMID, W. D. HARKINS, P. NIGGLI, R. A. SONDER u.a.

² W. WEFELMEIER, Ann. Phys. (5) 36, 373 (1939).