

Tiefseeegräben und Geosynklinalen.

Von

KURT LEUCHS, FRANKFURT AM MAIN.

In den letzten Jahrzehnten hat sich in stets stärkerem Maße die Vorstellung eingebürgert, daß Tiefseeegräben und Geosynklinalen in genetischer Hinsicht gleich zu stellen sind. Von vielen Forschern werden die Tiefseeegräben als werdende Geosynklinalen betrachtet, als Regionen der Erdkruste, welche im weiteren Verlaufe ihrer Entwicklung gesetzmäßig eine Reihe von Stadien durchlaufen, bis sie endlich mit der Auf-faltung zu Hochgebirgen ihr vorübergehendes Endziel er-reichen.

Das allmähliche Erstarren dieser Anschauungen dar-zulegen und die Gründe anzuführen, welche dafür sprechen könnten, soll hier nicht unternommen werden. Diesbezüg-liches findet sich heute in jedem Lehrbuch mehr oder weniger ausführlich dargelegt, so daß ich von einer Aufzählung der für diese Annahme als Beweise angenommenen Tatsachen absehen kann.

Indessen ergibt sich bei kritischer Betrachtung dieser Tatsachen zusammen mit den neueren Ergebnissen ver-schiedener Zweige der Geologie eine Reihe von Gründen gegen die Richtigkeit jener Anschauung, und ich möchte im folgenden den Versuch machen, die wichtigsten dieser Gegengründe zu-sammenzustellen und in ihrer Bedeutung für dieses Problem darzulegen.

Es ist nötig, zunächst die *r ä u m l i c h e A n o r d n u n g* der *Tiefseeegräben* zu besprechen. Dabei soll der Ausdruck „Tiefseeegraben“ vorläufig nur als Bezeichnung für die tiefen, meist in einer Richtung langgestreckten Wannen gebraucht werden, die durch die Ozeanforschung in großer Zahl festgestellt wurden, ohne mit dieser Bezeichnung zunächst auch etwas über ihre Entstehung aussagen zu wollen.

Wir kennen solche Tiefseeegräben in allen Ozeanen (die Schelfmeere kommen hier selbstverständlich nicht in Betracht!). Es bleibt nun zu untersuchen, ob und welche Beziehungen zwischen Tiefseeegräben und Landgebieten bestehen.

Im westpazifischen Gebiete, in dem die meisten und tiefsten Gräben liegen, ergibt sich verhältnismäßig enge Nachbarschaft von Gräben und Landgebieten. Dort entstand deshalb auch zuerst die Vorstellung einer ursächlichen Verbindung beider Arten von Krustenteilen. Die Tiefseeegräben erschienen als Geosynklinalen, die vor bereits gefalteten Zonen liegen und entsprechend der Entwicklung ihres Hinterlandes den Raum für die Auswirkung weiterer orogenetischer, d. h. hier Faltengebirge bildender Kräfte darstellen. Sie wären damit Glieder einer orogenetischen Entwicklungsreihe, die von den alten, bereits faltungsunfähigen erstarrten Massen über die jüngeren, an deren Rand sich anlegenden Faltengebirge hinweg zu den Vortiefen oder Saumtiefen am Außenrande der tertiären Ketten führen und in einer späteren orogenetischen Periode ihrerseits zu Faltengebirgen umgeformt werden können.

Damit erscheinen diese Tiefseeegräben als Anzeichen für eine, in der Zukunft mögliche Vergrößerung der den Stillen Ozean westlich begrenzenden Landmassen, die sich in gewisser Beziehung gesetzmäßig vollziehen würde, weil sie die uralte Tendenz, beispielsweise von Angaraland, des Wachsens nach außen und der Angliederung immer weiterer Räume an das alte Kerngebiet fortsetzen würde.

Schwieriger schon ist es, den *A t a c a m a g r a b e n* vor der Westküste Südamerikas mit Hilfe solcher Abhängigkeit von Gebirgsbildung zu erklären. Denn er liegt nicht am Außenrande der Anden, sondern am Innenrande, und es läßt sich keine ursächliche Verbindung mit der andinen Orogenese erkennen.

Und gänzlich aussichtslos erscheint der Versuch, die zahlreichen, fern von jedem Landgebiete liegenden Tiefsee-gräben bezüglich ihrer Entstehung mit orogenetischen Vorgängen in Landgebieten in Verbindung zu setzen. Im Atlantischen, Indischen und Stillen Ozean sind solche Gräben vorhanden, das beweist schon, daß es sich nicht um irgend welche zufällige Erscheinung handeln kann.

Im Atlantischen Ozean gehören hierher: 1. die breite Tiefe nordwestlich Westindien, deren Mitte etwa 1000 km von den Inseln entfernt ist, 2. der mehr als 6000 m tiefe Graben östlich der nordatlantischen Bodenschwelle zwischen Nordafrika und nördlichem Südamerika, 3. der Graben von 6000 bis mehr als 7000 m Tiefe an der schmalsten Stelle in der Mitte zwischen Nordafrika und Südamerika, nahe bezw. in der atlantischen Bodenschwelle, 4. der Graben von mehr als 6000 m Tiefe im südlichen Teil westlich der Bodenschwelle.

Vom Indischen Ozean möge, abgesehen von kleineren Tiefen, erwähnt werden, 5. der Graben mit mehr als 6000 m Tiefe, der 1300 km westlich Australien und 1500 km südwestlich Java und Sumatra liegt.

Im Stillen Ozean setzt sich 6. der Mariannengraben nach NO mit Tiefen von über 6000 m noch 4000 km weit fort, 7. 800 km nördlich Hawaii erstreckt sich ein Graben von über 6000 m Tiefe, und 8. zwischen 175° und 150° westlicher Länge, 10° südlicher und 15° nördlicher Breite liegen verschiedene, 6000 m überschreitende Gräben.

Alle diese Gräben (es sind nur die tiefsten und größeren hier aufgezählt!) lassen keine Abhängigkeit von Faltenzonen erkennen.

Hält man also bezüglich der westpazifischen Tiefen: Graben südöstlich Japan, südwestlicher Teil des Mariannengrabens, Riukiu-, Philippinen-, Kermadec-, Japan-, Bonin-, Palau-, Yap-, Hebriden-, Tongagraben, an der Abhängigkeit von Faltenzonen fest, so würde sich daraus eine Zweiteilung der Gräben ergeben. Es müßte dann für durchaus gleichartige Gebilde verschiedene Entstehung angenommen werden und es bliebe noch zu erklären, auf welche Weise die von Faltenzonen räumlich weit entfernte Art der Tiefsee-gräben entstanden wäre.

Das legt den Gedanken nahe, ob nicht auch die Gräben in der Nachbarschaft von Faltenzonen unabhängig von diesen entstanden sein könnten.

Um diese Frage näher zu prüfen, ist es nötig, die Gestaltung des westpazifischen Küstenrandgebietes zu untersuchen. Von der großen Kontinentalmasse des asiatischen Landes sind diese Gräben getrennt durch die Inselgirlanden, die dem Rand des Kontinentes vorgelagert sind, gleiches gilt für die südlicheren Gräben, welche den die entsprechenden alten Massen von Malaiien und Australien begleitenden Inselreihen in unregelmäßiger Weise vorliegen.

Es ergibt sich daraus die wichtige Tatsache, daß alle diese Gräben vor schmalen Faltengebirgszonen liegen. Und schon die Gestaltung dieser Zonen, ihre Zusammensetzung aus Inseln und Inselreihen, zeigt das gleiche wie das Studium ihrer geologischen Struktur: es sind durchwegs nur noch die letzten Reste von Faltenzonen, die durch intensive Schollenzertrümmerung mit gegenseitigen Verschiebungen in vertikaler Richtung aus ihren früheren, über weite Strecken hin verlaufenden geschlossenen Kettenformen in die heutigen übergeführt worden sind. Nur Reste der alten Faltenzonen sind erhalten, große Teile sind in die Tiefe gesunken und das ganze Gebiet zeigt in außerordentlich hohem Maße und in unendlichen Variationen die Zertrümmerung und Zerlegung von Faltenzonen durch vertikale Bewegungen.

Das ganze breite Gebiet zwischen den Festländern und den Tiefseegräben erweist sich damit als eine gewaltige Bruchzone, in der gelegentlich (Celebes z. B.) auch Reste älterer Massen noch auftreten.

Durch diese unregelmäßige Zerstückelung ist aber — und damit komme ich zur Untersuchung der Frage nach dem Zusammenhang zwischen Tiefseegräben und Geosynklinale — die frühere Faltenzone hinter den Tiefseegräben in ihrer Masse sehr reduziert. Sie kann deshalb auch nicht in so hohem Grade Baustoffe in die vorlagernden Teile des Ozeans liefern, daß dadurch eine starke Sedimentation in diesen entstehen könnte. Alle Tiefseegräben

der ersten Art, d. h. alle die, welche Faltenzonen benachbart sind, liegen vor schmalen tributären Zonen. Es fehlt ihnen durchwegs ein weites Hinterland und es fehlt ihnen damit die wichtigste Vorbedingung für die Bildung mächtiger Sedimentreihen, wie sie für Geosynklinalmeere bezeichnend sind.

Bekanntlich sind ja alle Faltengebirge, nicht nur die von alpinem Typus, ausgezeichnet durch die große Mächtigkeit ihrer Sedimente. Beträgt doch, um nur einige Beispiele zu nennen, die Mächtigkeit der kalkalpinen Trias 3000—4000 m und erreicht damit einen vielfachen Betrag der germanischen Fazies. Ebenso ist die Mächtigkeit des alpinen Juras wesentlich größer als die des außeralpinen.

Daraus geht die Notwendigkeit lange andauernder Senkung des Meeresbodens hervor, der Betrag dieser Senkungen war wesentlich größer als in den außeralpinen Gebieten und war, allgemein betrachtet, größer in den Geosynklinalgebieten als in den Landgebieten mit episodischen Überflutungen, den Dauerländern.

Selbstverständlich kann auch in solchen Landgebieten gelegentlich große Sedimentmächtigkeit erreicht werden. Beweisend dafür sind die Angaraschichten in verschiedenen Teilen von Inner- und Nordasien. Im nördlichen Streifen des östlichen Tianschan erreichen diese rein kontinentalen, limnischen, fluviatilen und terrestrischen Schichten des Mesozoicums eine Mächtigkeit von 4350 m und stehen damit dem alpinen Mesozoicum bezüglich ihrer Stärke ebenbürtig gegenüber.

Aber das beweist nur, daß dort ebenfalls lange andauernde Senkungen vor sich gingen, unterstützt und in ihrer Wirkung auf die Sedimentation verstärkt durch entsprechende Hebungen der schuttliefernden Hochgebiete ihrer Umgebung und zugleich unter klimatischen Verhältnissen, welche der Schuttbildung und -verfrachtung besonders günstig waren (arides Klima während des größten Teiles der Trias und der Kreide).

In diesen kontinentalen Geosynklinalen läßt sich auch besonders deutlich die Einwirkung von Unterbrechungen der normalen und gleichmäßigen Senkung erkennen. Jeder Stillstand der Senkung oder der Hebung der angrenzenden Land-

gebiete verursacht Unterbrechungen oder Änderungen der Sedimentation, und gleiches gilt bezüglich klimatischer Änderungen, wie das in Innerasien und Nordasien trotz der noch nicht sehr ins einzelne gehenden Erforschung schon vielfach nachgewiesen werden konnte.

Es ist einleuchtend, daß solche Änderungen und Unterbrechungen der Sedimentation gerade in kontinentalen Geosynklinalen sehr häufig sind, da bei diesen die Abhängigkeit von den angrenzenden Landgebieten und die Wechselwirkung zwischen Hoch- und Tiefgebiet, auch wegen der geringeren räumlichen Ausdehnung dieser Geosynklinalen, in viel höherem Grade in Erscheinung tritt als bei marinen Geosynklinalen.

Um so auffallender ist die vielfach zu beobachtende Mannigfaltigkeit der Sedimente in diesen. Und nicht nur die Mannigfaltigkeit in zeitlicher und räumlicher Beziehung, sondern auch die Lückenhaftigkeit der Sedimente muß hier erwähnt werden als Kennzeichen vieler, wenn nicht der meisten marinen Geosynklinalen.

Solange man sich diese als verhältnismäßig tiefe, küstenferne und durch entsprechende Gleichmäßigkeit und lange Dauer der wirksamen Vorgänge ausgezeichnete Sammeltröge vorstellte, war keine Möglichkeit gegeben, diese Tatsachen befriedigend zu erklären.

Erst seitdem durch die zunehmende Erforschung der Nachweis erbracht ist, daß z. B. die alpine Geosynklinale niemals und in keinem Teile sehr weit von einer Küste entfernt und nie sehr tief war, kann die Faziesmannigfaltigkeit und die Lückenhaftigkeit der Sedimente erklärt werden. Die alpine mesozoische Geosynklinale ist entstanden auf variskisch gefaltetem Untergrunde, dieser Untergrund war deshalb von Anfang an unregelmäßig gestaltet, Höhen und Tiefen wechselten mit einander ab, und es besteht keine Notwendigkeit für die Annahme, daß das ganze alpine Gebiet nach der variskischen Orogenese wieder vom Meere bedeckt wurde.

Allerdings erfolgte im Laufe der weiteren Entwicklung eine größere Vereinheitlichung des Gebietes durch das Hand-in-Hand-Arbeiten von Abtragung und Aufschüttung, aber zu keiner Zeit wurde eine vollständige Ausgleichung der Unterschiede zwischen den einzelnen Gebietsteilen erzielt. Es blieb

stets noch eine große Zahl von Höhenunterschieden erhalten und es blieb infolge des Einflusses der einzelnen Landgebiete in Süd-, Zentral- und Nordalpen, in den Ostalpen ebenso wie in den Westalpen die Möglichkeit oder vielmehr Notwendigkeit für weitgehende Differenzierung der Sedimentation und gelegentlichen Ausfall der Sedimentation.

Denn es handelte sich ja nicht nur um die größere oder geringere Widerstandsfähigkeit einzelner Teilgebiete, sondern auch um die Wirkung der verschieden erfolgenden Bewegungen epirogenetischer und orogenetischer Art.

Es ist ein Ergebnis der jüngsten Forschungen, daß die Bildung der Alpen nicht durch einige wenige Orogenesen erfolgte, sondern daß ihre Zahl wesentlich größer ist, als noch vor kurzem angenommen wurde. Insbesondere hat sich dadurch für die Jurazeit eine erhebliche tektonische Unruhe ergeben im Gegensatz zu der bisher meist angenommenen allmählichen gleichmäßigen Tiefenzunahme vom Lias zum Oberjura. Wohl besteht eine solche Zunahme der Meerestiefe im allgemeinen, denn am Beginn der Jurazeit waren ja große Teile des kalkalpinen Meeres trocken gelegt und erst allmählich gelangten diese Landgebiete, im wesentlichen ein großer Teil der triassischen Riffzonen, durch epirogenetische Senkung wieder unter den Meeresspiegel, so daß vielfach der Lias erst mit höheren Stufen über die alten Riffe transgrediert. Auch innerhalb dieser höheren Liasstufen sind verschiedentlich Sedimentationsunterbrechungen nachgewiesen und ebenso gibt es solche im Oberjura, der selbst wieder teils als Tithon über Lias transgrediert, teils einen wahrscheinlich letzten Landrest überflutet (Göllgruppe) und an dessen Saum mit Grundkonglomeraten beginnt.

So zeigt das kalkalpine Gebiet eine, durch Rückschläge infolge weiterer tektonischer Bewegungen unterbrochene, aber doch allmählich zunehmende Ausdehnung des Meeres in der Jurazeit. Eine andere Frage ist aber, ob sich dieses Meer auch in derartigem Maße vertieft hat, daß die bis dahin durchwegs als Flachmeersedimente entwickelten Absätze jetzt durch solche der Tiefsee abgelöst werden.

Die Ansichten hierüber sind geteilt. Der im Oberjura vielfach auftretende *Radiolarit* wird von den Anhängern

der Tiefsee als Beweis angeführt und erst neuerdings hat Steinmann auf Grund der Verbreitung der Radiolarite in Alpen und Apennin einen oberjurassischen Tiefseegraben angenommen, der mit einer Breite von rund 500 km auf rund 1500 km Länge sigmoid gewunden das ganze Gebiet in seiner Mitte durchzog. Beiderseits, nach außen hin, schlossen sich an diesen 4—6000 m durchschnittliche Tiefe erreichenden Graben flachere Meeresgebiete an. Auf das alpine Gebiet entfallen von dem Graben 600 km. Dort war aber das Tiefseegebiet durch mindestens zwei Rücken geringer Tiefe zerteilt.

Es muß weiteren Untersuchungen überlassen bleiben, diese Annahmen Steinmanns nachzuprüfen. Insbesondere ist hierzu nötig eine genaue lithogenetische Bearbeitung derjenigen Vorkommen von Radiolarit in den Nordalpen, welche durch ihre innige primäre Verknüpfung mit Konglomeraten berechnigte Zweifel an der Annahme einer derartigen Tiefsee entstehen lassen.

Und es erhebt sich damit sofort die weitere Frage: ist der Radiolarit tatsächlich eine Bildung solch großer Tiefe oder besteht die Möglichkeit der Radiolaritbildung auch in wesentlich geringeren Tiefen? Sind die mit Radiolarit verbundenen Konglomerate und Breccien in den bayerischen Alpen und im Sonnwendgebirge (Rofengebirge) östlich des Achensees in Nordtirol tektonisch entstanden, wie Steinmann annehmen möchte, oder sind sie primär zusammen mit dem Radiolarit bzw. abwechselnd mit diesem gebildet worden?

Es liegt nach den bisherigen Untersuchungen nichts vor, was diese letzte Annahme widerlegen könnte. Da aber küstenferne Tiefsee und Konglomeratbildung sich gegenseitig ausschließen, bleibt als wahrscheinlichste Annahme nur die, daß der Radiolarit ebenfalls in wesentlich geringerer Tiefe entstanden ist.

Diesbezügliche Untersuchungen über die Bildungsweise des Radiolarites hat besonders Lapparent jun. ausgeführt. Seine Ergebnisse sind kurz dahin zusammenzufassen, daß die Radiolarite stets in engster primärer Verknüpfung mit grobklastischen Gesteinen auftreten. Daraus ergibt sich die

Bildung der Radiolarite in geringen Tiefen, und sie wird, unbeschadet der sonstigen Sedimentbildung, ermöglicht durch die gelegentliche starke Zufuhr von Kieselsäure in das Meerwasser. Deren Auftreten wird auf vulkanische Ausbrüche zurückgeführt, die auf kürzere oder längere Zeit dem Meerwasser eines bestimmten Gebietes so viel Kieselsäure zubringen, daß dadurch entsprechend reiche Entwicklung von Kieselsäure-Organismen (planktonischen) und damit Ausfällung von Kieselsäure-Sedimenten möglich wird.

Ist diese Annahme richtig, dann entfällt damit die Notwendigkeit, zur Oberjurazeit abyssische Tiefen im Alpengebiete anzunehmen. Dann ändert sich auch das Bild der alpinen Geosynklinale, oder richtiger der einzelnen alpinen Teilbecken, nicht gegenüber ihrem Flachmeercharakter vorher und nachher. Es bleibt damit für die Entstehung der alpinen mesozoischen Sedimente maßgebend die dauernde, in den einzelnen Gebieten und zu verschiedenen Zeiten wechselnde Beeinflussung von den Küstenländern des alpinen Sedimentationsraumes her ebenso wie von den Landrücken, Inselreihen und Inseln, die sich innerhalb dieses Raumes teils als Reste der früher entstandenen Gebirgsketten noch befanden, teils als Erzeugnisse der während des Mesozoicums (vor der Mittelkreide) durch tektonische Bewegungen gebildeten Erhebungen entstanden.

Die genauere Untersuchung der jurassischen Schichten in den Nordalpen hat schon jetzt ergeben, wie stark stellenweise die Einwirkung der vorausgegangenen ebenso wie der gleichzeitigen tektonischen Bewegungen die gesamte Fazies dieser Schichten beeinflußt hat. Wenn erst einmal diese Schichten auch vergleichend lithogenetisch durchgearbeitet sind, wird sich noch viel größere Wechselbeziehung zwischen Tektonik und Sedimentation erkennen lassen.

Indessen dürfte für jetzt der bisher ermittelte Tatsachenschatz schon genügen, um die Art des alpinen Sedimentationsgebietes einigermaßen sicher erkennen zu können. Und gerade die Erfahrung, daß in diesem Gebiete immer wieder in stärkster Differenzierung tektonische Bewegungen erfolgten, ist von

Wichtigkeit. Denn dadurch konnte die epirogenetische Senkung nie so lange wirken, um eine Tiefsee entstehen zu lassen.

Für die Triaszeit beweisen die ausgedehnten und mächtigen Riffgesteine, die sich in geschlossenen Zonen durch die ganzen Ostalpen ziehen, die geringe Tiefe des Meeres, wenigstens soweit es von den Riffen eingenommen war. Aber auch außerhalb der Riffe war keine Tiefsee, die gleichzeitig mit den Riffgesteinen entstandenen sandigen, tonigen, mergeligen und kalkigen Gesteine sind durchwegs Absätze flachen Wassers. Das geht nicht nur aus ihren organischen Einschlüssen, sondern auch aus ihrer petrographischen Beschaffenheit hervor, besonders seitdem nachgewiesen werden konnte, daß die gelegentlich auftretenden roten Kalksteine (Hallstätter Kalke z. B.) ihre Entstehung im wesentlichen der Zufuhr von feinstem terrestrischem Material verdanken, welche episodisch und örtlich das Riffwachstum unterband und nach ihrer Beendigung wieder neu entstehen ließ.

Dabei war, wie wir auf Grund der Untersuchungen besonders in dem Kalkalpengebiete zwischen Rhein und Salzach anzunehmen berechtigt sind, Häufigkeit und Wirkung orogener, oder ganz allgemein gesprochen, aufwärtiger Bewegungen in der Triaszeit geringer als in der Jurazeit. Trotzdem fehlen in der Trias Sedimente, die als Tiefseebildungen anzusprechen wären, durchaus. Es mag das seine Ursache z. T. in der damals größeren Höhe der variskischen Gebirgsreste haben, die als zentralalpines und vindelizisches Gebirge das nordalpine Triasbecken begrenzen und der epirogenetischen Senkung durch entsprechend starke Stoffzufuhr das Gleichgewicht hielten.

Die aufwärtigen Bewegungen am Ende der Triaszeit führten zu Trockenlegung großer Teile dieses Beckens, und nur langsam konnte das Meer wieder über sie vordringen. Deshalb sind auch die liassischen Sedimente durchwegs Bildungen geringer Tiefe, und erst im Oberjura erreicht die Meerestiefe größere Beträge, wenn auch durchaus nicht allgemein. Und selbst in dieser Zeit treten die Einflüsse der alten Landreste, besonders des südlichen vindelizischen Rückens, noch deutlich hervor durch Konglomerat- und Breccienbildung, wobei hervorzuheben ist, daß die mit Konglomeraten verknüpften

Radiolarite, z. B. des Gebietes Tegernsee—Schliersee, unter Berücksichtigung der späteren tangentialen Verschiebung gegen N, in dem vergleichsweise schmalen Raum zwischen dem südlichen, innerhalb der Kalkalpen liegenden Abtragungsgebiete und dem nördlichen des südlichen vindelizischen Rückens liegen.

Außerdem müssen, nach *Steinmann's* Definition, die mit Kalksteinen verbundenen Radiolarite von den euabyssischen Sedimenten abgetrennt werden. Wird diese Trennung durchgeführt, dann verringert sich das Auftreten von Radiolariten ziemlich erheblich, denn in vielen Fällen werden heute noch solche Gesteine kurzweg als Radiolarite bezeichnet. Selbst rote Kalksteine des Oberjura ohne jeden einigermaßen beträchtlichen Kieselsäuregehalt werden Radiolarit genannt. Daß dieses Verfahren zu falschen Vorstellungen Anlaß gibt, liegt auf der Hand.

Wichtiger aber als die genaue Feststellung von Radiolarit erscheint die Untersuchung der Frage, ob der Radiolarit unbedingt stets als euabyssisches Sediment aufgefaßt werden muß. Diese Frage ist noch nicht gelöst. Die Fazies der Begleitgesteine spricht, wie schon erwähnt, in vielen Fällen für geringe Bildungstiefe, und für die Fazies des Radiolarites selbst und seinen Aufbau aus wechselnden Mengen von Radiolarien kann bei der planktonischen Lebensweise dieser Organismen und ihrer demgemäß sehr großen Verfrachtungsmöglichkeit Entstehung in beliebiger Tiefe in Frage kommen.

Ist doch auch für Globigerinen- bzw. Pteropodenschlick nachgewiesen, durch *Gardiner*, daß er in den Malediven in der Lagune eines Atolls entstanden ist, und hat doch *Heinrich* festgestellt, daß der Hallstätterkalk des Feuerkogels bei Aussee aus Globigerinenschlick gebildet ist.

Da aber die Hallstätterkalke, wie ich kürzlich feststellen konnte, in ihrer Fazies weitgehend mit den roten Lagen im Dachsteinkalke übereinstimmen, auch bezüglich des Vorkommens von Foraminiferen, so müssen beide Gesteine als korrelierte Gebilde angesehen werden, die in recht geringer Tiefe entstanden sind.

Wenn wir nun noch einmal auf die mit Konglomeraten, überhaupt mit grobklastischen Ablagerungen verknüpften

Radiolarite zurückblicken, so ergibt sich grundsätzliche Übereinstimmung mit den eben besprochenen Bildungen: der Einschaltung einer abweichenden Sedimentation in eine, in sich einheitliche Gesteinsfolge (Riffe) durch Strömungen mit entsprechender Stoffzufuhr (rotes Material) entspricht bei dem Radiolarit die Unterbrechung der Kalksedimentation durch Zufuhr größerer Mengen von Si O_2 .

Wird für sie Herkunft aus vulkanischen Ausbrüchen angenommen, so möge auf die weite Verbreitung basischer Eruptiva in den Alpen hingewiesen werden, die in der Oberjurazeit dort gefördert wurden, vielleicht in Zusammenhang mit den tektonischen Bewegungen dieser Zeit.

Ungeklärt bleibt bei Annahme euabyssischer Entstehung des Radiolarites auch der oftmalige Wechsel von Kalk- und Kieselgestein, wie er z. B. in den Julischen Alpen vorhanden ist. Denn wenn die Kieselgesteinsbildung eine reine Funktion der Tiefe wäre, müßte in solchen Fällen ein dauerndes, rhythmisches Schwanken des Meeresbodens angenommen werden, ein Auf und Ab, das zu schematisch erscheint, als daß es tatsächlich durch längere Zeit hindurch hätte vor sich gehen können. Dagegen könnte periodisch wiederkehrender Wechsel der Stoffzufuhr, sei es durch Strömungen oder andere Ursachen, eher glaubhaft erscheinen.

Es sollte in den vorausgehenden Ausführungen — nur ganz kurz und ohne Heranziehung vieler Einzelbeispiele, die natürlich in großer Zahl gebracht werden könnten — gezeigt werden, daß marine Geosynklinalen keine Tiefsee-sedimente enthalten müssen. Sie sind sogar, soweit sich heute schon darüber ein sicheres Urteil fällen läßt, im Gegenteil ausgezeichnet durch Sedimente geringerer bis geringster Tiefe.

Notwendig ist ferner für die Geosynklinalen große Sedimentmächtigkeit. Damit stehen sie in starkem Gegensatz zur Tiefsee und besonders zu den Tiefseeegräben.

Denn diesen fehlt die reichliche Stoffzufuhr vom Lande her und damit die Möglichkeit für mächtige Sedimentbildung. Es wurde schon erwähnt, daß selbst die westpazifischen Tiefseeegräben, die Landgebieten benachbart sind, aus diesen keine

erhebliche Sedimentmenge erhalten, weil die Landzonen nur schmal und vielfach zerstückelt sind. Und gänzlich ausgeschaltet ist terrigene Stoffzufuhr für die zweite Art von Tiefseeegräben, die fern jedem Lande gelegen ist.

Es ist daher als eine notwendige Folge der räumlichen Anordnung der Tiefseeegräben vor allem die geringe Sedimentation in ihnen zu beachten, die nicht nur durch die geringe Zufuhr von außen her, sondern auch durch die verschiedenen Auflösungsvorgänge während des Niedersinkens erzeugt wird.

Infolgedessen und unter Berücksichtigung des Umstandes, daß überhaupt im tiefen und küstenfernen Meere nur langsam und in geringem Maße Sedimentation erfolgt, erscheint es äußerst unwahrscheinlich, daß sich Tiefseeegräben jemals als Geosynklinalen, d. h. als Gebiete späterer Auffaltung zu Gebirgen, verhalten haben oder werden. Zu dieser Annahme zwingt auch das Fehlen oder, vorsichtiger ausgedrückt, die Seltenheit echter Tiefseesedimente unter den Gesteinen der Faltengebirge, was sich nicht nur für die des alpinen Typus, sondern auch für die älteren Gebirge, besonders auch für die carbonischen, nachweisen läßt.

So ergibt sich als notwendiger Schluß aus allen einschlägigen Beobachtungen und Folgerungen die grundsätzliche Verschiedenheit von Geosynklinalen und Tiefseeegräben. Es sind Gebilde verschiedener Art, ihre Genese ist verschieden und es bleibt nun noch übrig, die Möglichkeit bzw. Wahrscheinlichkeit dieser verschiedenen Entstehung zu untersuchen.

Von den Geosynklinalen wissen wir jetzt, daß sie nicht sehr tief sein müssen. Sie können sogar im Gegenteil meist seicht sein, und was wir an fossilen Geosynklinalen kennen, beweist durchaus die geringe Tiefe dieser Meeresbecken.

Außerdem sind sie in ihrer Lage abhängig von den sie ernährenden Ländern, denn nur bei starker Stoffzufuhr von diesen her können sich die mächtigen Sedimente bilden, welche die Geosynklinalen auszeichnen.

Deshalb liegen sie stets vor Landmassen und zwar vor Faltenzonen. Sie bilden Vortiefen vor den Gebirgen, Saum-

tiefen, deren Lage durch jene vorgezeichnet ist, und deren Funktion es ist, den Verwitterungsschutt der Gebirge aufzunehmen, bis sie selbst durch eine neue Orogenese dem Lande angegliedert werden. Damit verschiebt sich die Geosynklinale weiter nach außen, aber die Abhängigkeit der Lage vom Gebirgslande bleibt bestehen. Die Geosynklinale wandert also, entsprechend dem Fortschreiten der Gebirgsbildung, und erlischt dann, wenn das sich episodisch vergrößernde Gebirgsland an und über eine ältere, starre, Widerstand bietende Landmasse stößt.

Auch dafür bieten die *Alpen* wieder ein klares Beispiel. Nach der variskischen Orogenese liegt die Geosynklinale (ich beschränke mich hier auf das Gebiet nördlich der zentralen Ostalpen!) nördlich der Zentralzone zwischen dieser und den südlichen Zonen des vindelizischen Gebietes, die zunehmende Abtragung und Senkung des Nordlandes und seine Zerlegung in einzelne Höhenrücken ermöglicht das Eindringen des Meeres zwischen diese Rücken, bis durch die mittelkretazische Orogenese der größte Teil des Gebietes zwischen Zentralzone und südlichem vindelizischem Rücken an jene angegliedert wird. Die Geosynklinale wandert nach N und liegt jetzt vor den kretazischen Kalkalpen, die südlichen Ausläufer des Meeres greifen z. T. weit in das kalkalpine Gebiet hinein (Gosaukreide), die Hauptmasse der Sedimente aber entsteht nördlich davon, in der Flyschzone und in der helvetischen Zone zwischen den beiden vindelizischen Rücken.

Im Oligocän wird durch neue Orogenese auch dieses Gebiet an die Kalkalpen angeschweißt, die Vortiefe verlagert sich noch weiter nach N, die beiden vindelizischen Rücken sind unter den über sie geschobenen Decken der jüngeren Sedimentgesteine verschwunden und in der Vortiefe entstehen die Molassegesteine.

Schließlich werden auch diese von der Faltung ergriffen. Da aber jetzt das Hauptgebiet des vindelizischen Landes als starres Widerlager wirkt, bleibt kein Platz mehr für eine Geosynklinale, das Meer verschwindet und die nordalpine Geosynklinale hat aufgehört, zu bestehen.

Gegenüber dieser Abhängigkeit der Geosynklinalen von gewissen Landgebieten zeichnen sich die **Tiefseegräben** aus durch weitgehende Unabhängigkeit ihrer Lage vom Lande.

Für die früher erwähnte zweite Art von Tiefseegräben ist dies ohne weiteres ersichtlich. Weniger klar aber ist es für die erste Art. Daß aber auch für diese genetische Unabhängigkeit von den benachbarten Landgebieten besteht, soll im folgenden versucht werden zu zeigen.

Es wurde schon gesagt, daß die Gebiete des westlichen Stillen Ozeans, für welche scheinbar der Satz von der Unabhängigkeit der Tiefseegräben nicht zutrifft, eine Region stärkster vertikaler Bewegungen sind. Die gesamten Inselkränze sind nichts anderes als Reste von Faltenzonen, die sich um ältere Gebirgsreste herumlegen. Sie sind das jüngste Produkt der gewaltigen, seit dem Algonkium wirksamen gebirgsbildenden Kräfte, die im Laufe dieser langen Entwicklung den asiatischen Teil von Eurasien geschaffen haben. Wie die alpine Geosynklinale bei der letzten stärkeren Orogenese aufhörte, zu bestehen, so verschwand auch an der Südseite des Angaralandes im Tertiär der letzte Rest der Geosynklinale zwischen Angaraland und dem indischen Gondwana.

Das Gebiet der Tethys wurde stabilisiert, gewissermaßen festgeklemmt zwischen den beiden Kontinentalmassen.

Anders dagegen war die Entwicklung im O. Denn wenn auch von einigen Forschern ein jetzt versunkener Kontinent im Stillen Ozean angenommen wird, so fehlt es ebensowenig an gewichtigen Gegengründen. Wenn aber dort kein Gegenkontinent zu Asien bestand, war damit für die weitere Entwicklung vielfache Möglichkeit zu andersartiger Großformung gegeben. Die Produkte der letzten großen Faltungsperiode, d. h. eben die Ketten am Westrande des Stillen Ozeans, erscheinen dadurch als nur einseitig (mit der Innenseite) an ältere Landgebiete angeschweißt, während ihre Außenseite unmittelbar an große Senkungsgebiete herantritt.

Es ist eine der vielen, noch ungelösten Fragen, wann die großen Tiefen entstanden sind. Gab es schon in viel früheren Zeitabschnitten solche Gegensätze zwischen Höhen und Tiefen, wie sie heute auf der Erde vorhanden sind,

oder sind diese Höhenunterschiede erst das Ergebnis der jüngeren und jüngsten Entwicklung?

Hinweise auf die Lösung dieser Frage können wohl in erster Linie die *fossilen Sedimente* geben. Bei diesen ist das auffallendste Merkmal die Seltenheit echter Tiefseesedimente. Und wenn die noch immer zweifelhafte Entstehungstiefe des Radiolarites bzw. die für ihn oben schon dargelegte Bildungsmöglichkeit in geringer Tiefe berücksichtigt wird, bleibt als Ergebnis der bisherigen lithogenetischen Forschung eigentlich für kein durch Mächtigkeit, weite Verbreitung oder wiederholtes Auftreten unter den Sedimentgesteinen ausgezeichnetes Gebilde die Möglichkeit einer Tiefseeentstehung bestehen.

Das könnte andererseits wieder dazu verleiten, eine *Permanenz der Ozeane* anzunehmen. Die Verteilung von Kontinenten und Ozeanen müßte dann seit uralten Zeiten im großen ganzen ungefähr die gleiche geblieben sein; die weitere Folge wäre, daß die seitdem den ältesten Kontinenten angegliederten Gebiete schon vorher in einem starken Gegensatz zu den Ozeanen gestanden hätten und insgesamt nur vorübergehend von Epikontinentalmeeren überflutete Kontinentgebiete gewesen seien.

Damit würde aber die *Hauptformung der Erdoberfläche* in sehr frühe Zeit zurückverlegt und die gesamte Entwicklung seitdem wäre nichts anderes als eine verhältnismäßig geringfügige Umbildung der vorher geschaffenen Großformen.

Nun kennen wir aber eine ganze Reihe von Tatsachen, die deutlich für *starke Umbildung der Großformen* sprechen. Ich erinnere hier nur, um ein besonders auffallendes Beispiel zu nennen, an die Zerlegung des großen Südkontinentes, Gondwana, und an die Verschiedenheit seiner jüngeren Entwicklung gegenüber dem Nordkontinent oder, richtiger, gegenüber der Reihe von Nordkontinenten, die uns heute als älteste Kerne von Eurasien entgegnetreten.

Bei diesen fand genau die umgekehrte Entwicklung statt. Jede neue Orogenese führte zu Vergrößerung der Kernmassen durch Angliederung weiterer, vorher von Epikontinental- oder von Geosynklimaleeren eingenommener Gebiete, bis

einzelne oder mehrere dieser solcherart gewachsenen Kontinente verschmolzen und zuletzt ein gewaltiger Landblock entstanden war.

Seine jüngste Entwicklung aber läßt schon gewisse Analogien mit der jungen Geschichte der Ozeane erkennen: es sind das die gewaltigen und zahlreichen Bruchzonen von Inner- und Nordasien (Baikalgraben, Tianschanggraben z. B., um nur die auffallendsten zu nennen), die den Beginn einer neuen Entwicklung anzeigen.

Sie haben ihr Gegenstück in den Bruchzonen Ostafrikas, des Roten Meeres und Syriens, welche das gleiche zeigen wie die viel bedeutenderen Bruchzonen, durch die Gondwana zerschnitten und zerlegt wurde in einzelne Reste. Die gesamten Erscheinungen sind die eines großartigen Zerfalles von Kontinentalmassen, wobei weite Schollen abgesunken sind.

Diese Senkungsvorgänge sind verhältnismäßig junger Entstehung. Sie bezeichnen den Ersatz der Kontraktionswirkung, die vorher im wesentlichen durch Faltung und Hochbewegung kompensiert wurde, durch Zerbrechen und Einsinken (natürlich auch Hebung anderer Schollen) der für weitere Faltung zu starren und widerstandsfähigen Schollen.

In den inneren Teilen der alten Kontinente konnten dadurch, gemessen an der Größe der Tiefseegräben, nur unbedeutende Senkungszonen entstehen. Stärker sind solche Gebilde schon in den Randgebieten vorhanden und ihre größte Ausdehnung erhalten sie in den heutigen Ozeangebieten.

Sie erscheinen dort als Zonen stärkster Senkung inmitten der im ganzen gesunkenen Gebiete. Es besteht nach den Formen kein grundsätzlicher Unterschied zwischen den versenkten Teilen von Gondwana und dem Stillen Ozean. Überall sind in den an sich schon tiefen Boden der Ozeane noch tiefere Wannen eingelassen.

Ein Mittel, ihre Entstehung zu erklären, gibt uns die Erdbebenkunde. Die Tiefseegräben sind sehr reich an Beben. Sieberg hat berechnet, daß 41 % aller Beben in Landgebieten nahe den Tiefseegräben und in diesen selbst erfolgen, zugleich sind das die stärksten seismischen Erschütterungen überhaupt. Die meisten dieser Erdbeben sind

tektonischen Ursprungs, das deutet auf noch jetzt vor sich gehende größere Verschiebungen hin und wir können annehmen, daß die Tiefseeegräben Zonen besonders aktiver Bodenunruhe sind, in welchen auch heute noch stärkere vertikale Bewegungen und zwar Senkungen erfolgen.

Diese Bewegungen sind aber, wie schon die von ihnen hervorgerufenen Erschütterungen beweisen, nicht gleichwertig mit den dauernd erfolgenden epirogenetischen Senkungen, sondern es sind episodische Vorgänge stärkerer Art.

Dann liegt es aber sehr nahe, in den Tiefseeegräben echte Gräben im tektonischen Sinne zu sehen. Sie werden damit zu Beweisen für den „Zusammenbruch des Erdballes“, der sich am stärksten und ausgedehntesten abspielt in den weiten Gebieten der Ozeane, in welchen keine Konsolidierung größerer Erdkrustenteile vor sich gegangen oder wenigstens nicht bis in junge Zeit erhalten geblieben ist.

Die Tiefseeegräben werden damit zu bezeichnenden Formen des Entwicklungsganges der Erdkruste, der mit dem Urmeere beginnt, allmählich zur Entstehung von Kontinenten und Flachmeeren führt und später erst eine zunehmende Verschärfung der Höhenunterschiede entstehen läßt, indem sich mit der immer stärkeren Konsolidierung einzelner Landmassen die Möglichkeiten für Spannungsauslösung mehr und mehr in den labileren Gebieten konzentrieren.

Dadurch, d. h. durch die allmähliche Herausbildung des Gegensatzes zwischen Kontinent und Ozean, wird erst die Möglichkeit für die Entstehung der Tiefseeegräben geschaffen. Denn gegenüber der anfänglich mehr oder weniger universell wirksamen orogenetischen Kraft entstand im Laufe der Entwicklung eine immer stärkere räumliche Einengung wegen der Versteifung einzelner Gebiete. Ein Überblick über Lage und Verteilung etwa der carbonischen und der tertiären Faltenzonen läßt dies klar erkennen. Mehr und mehr wurde das faltbare Gebiet eingeschränkt, vielleicht auch dadurch bei späteren Orogenesen höher und enger gefaltet, so daß die jeweilig entstandenen Strukturformen zugleich Gradmesser für die Stärke des Kampfes um den Raum sind.

Dann ist es auch erklärlich, warum in den früheren Zeiten, als erst kleine Gebiete konsolidiert waren, nur geringere Höhenunterschiede entstanden und die Flachmeere so große Ausdehnung hatten.

Erst später, als die Kontinente gewachsen und große Teile der Flachmeere dadurch Land geworden waren, indem die neu entstandenen Geosynklinalen an den Rändern der Kontinente diesen einverleibt wurden, erfolgten allmählich zwar, aber doch mehr und mehr an Bedeutung für die Formung hervortretend, neben der bis dahin vorherrschenden Hochbewegung (durch Faltung) die großen Senkbewegungen. Sie führten zur Entstehung der weiten Ozeane, sei es, daß große Flachmeergebiete durch starke Senkungen zu Tiefsee wurden, sei es, daß ausgedehnte Teile von Kontinenten, infolge gewaltiger Bruchbildung aus ihrem Zusammenhange gelöst, zur Tiefe sanken und gleichfalls Ozeanboden wurden (Südkontinente).

Die damit beginnende Tendenz des Absinkens blieb dann erhalten bis heute, wo sie noch andauert.

Submarine Rutschungen mögen ihr Teil dazu beitragen, allzu schroffe, durch episodische Bewegungen entstandene oder neu entstehende Höhenunterschiede der Ozeanböden zu verwischen. Indessen muß vor Überschätzung solcher Rutschungen gewarnt werden, denn die heutige Gestaltung der Tiefseeegräben beweist zugleich die, im ganzen betrachtet, geringe ausgleichende Wirkung dieses Vorganges.

So führen alle Überlegungen zu dem Schlusse, für die Tiefsee eine verhältnismäßig späte Entstehung anzunehmen. Sie erscheint als das jüngste Gebilde unter den Großformen der Erdkruste. Aber auch die Tiefsee ist nicht einheitlich. Ihre Gräben sind noch jüngerer Entstehung, sind eingebrochene und noch weiter einbrechende labile Streifen in dem ganzen, selbst labilen Gebiete, welches den relativ stabilen Kontinentalmassen gegenübersteht.

Die Gründe für diese Annahme wurden schon angeführt. Der wichtigste ist wohl der bis heute unmögliche Nachweis

echter Tiefseebildungen größerer Verbreitung in fossilem Zustande. Fehlt es so an Beweisen für die Umwandlung von Ozeanboden in Kontinent, so besitzen wir andererseits deutliche Beweise für den umgekehrten Vorgang.

Und die Tiefseeegräben in den versenkten Gebieten solcher ehemaliger Kontinente beweisen, daß sich diese tiefsten Senkungszonen erst ziemlich spät gebildet haben, nach der Absenkung dieser Kontinentalschollen, als stärkste Steigerung der Senkungstendenz.

Ebenso zeigen uns die Verhältnisse im Westrandgebiete des Stillen Ozeans die junge Entstehung der Tiefseeegräben. Denn die nächsten Landgebiete sind von genetisch vollkommen gleichen Vorgängen betroffen, wodurch die Faltenzonen zerschnitten und zerhackt und nur in Resten erhalten sind.

Das ist aber überall das sichtbare Zeichen für den Beginn eines neuen Stadiums, eines neuen Umbildungsvorganges der Erdkruste: auf die Faltung folgt die Zertrümmerung, auf die vorwiegend tangential Bewegung folgt die vorwiegend vertikale.

Es ist nur eine Frage der verschiedenen Mobilität, wie weit sich die Gesteine durch Faltung zusammenpressen lassen. Ist aber die Grenze überschritten, dann muß Zerreißen eintreten, es erfolgen vertikale Verschiebungen der Schollen gegeneinander und die Gestaltung der Erdoberfläche wird dadurch wieder mannigfaltiger.

In kleineren Verhältnissen lassen ja auch die Kontinente diese Entwicklung erkennen. Für Zentralasien habe ich dies schon wiederholt dargelegt und kann mich deshalb auf eine kurze Angabe beschränken: starke Orogenese mit vorwiegender Hochbewegung durch Faltung und Intrusion im Carbon, entsprechend kräftige Abtragung während des Perms und Mesozoicums (ich lasse hier die schwächeren orogenetischen Bewegungen dieses Zeitraumes außer Betracht!), neue starke Orogenese im Tertiär mit Zerstückelung der allgemein stark abgetragenen und teilweise zu Rumpfebenen in verschiedenen Höhenlagen umgestalteten Gebirgslandschaften, dadurch vorwiegend vertikale Bewegungen von Schollen, im

ganzen Zerteilung in Hoch- und Tiefschollen und morphologisch Reaktivierung großer Teile der carbonischen Gebirgsreste zu Hochgebirgen.

Wenn die dadurch gebildeten Höhenunterschiede (z. B. Bogdo-Ola im östlichen Tianschan 6500 m und Tianschangraben südlich davon — 169 m) heute noch so stark sind, trotz der kräftigen Zufüllung des Tianschangrabens mit den Erzeugnissen der Verwitterung im ariden Klima, so beweist das, neben der Wahrscheinlichkeit weiterer Senkung bezw. Hebung, doch auch die Lebhaftigkeit des durch die tertiären Orogenesen geschaffenen Reliefs.

Es steht bezüglich Reliefenergie der der Ozeanböden durchaus gleichwertig gegenüber; Unterschiede bestehen nur in der Ausdehnung der Gräben auf dem Lande, die sich erklären durch die wesentlich größeren Widerstände in dem versteiften Kontinente.

Aber die weitere Entwicklung ozeanischer und kontinentaler Gräben ist verschieden. Erfahren nämlich die kontinentalen Gräben starke Zuschüttung mit den Verwitterungsprodukten ihrer Umgebung, so werden sie, bei gleichzeitiger epirogenetischer Senkung, zu Geosynklinalen (z. B. die jungpaläozoischen kontinentalen Geosynklinalen Mitteleuropas, nach B o r n), während die ozeanischen Gräben entsprechend starker Zuschüttung entbehren und deshalb auch nicht in Geosynklinalgebiete umgewandelt werden können.

Es bleibt demnach der Gegensatz zwischen beiden Arten von Tiefenzonen, wie ich in den vorausgehenden Ausführungen darzulegen versuchte. Die primäre Entstehung kann für Tiefseegräben und Geosynklinalen, besonders für intermontane Geosynklinalen, gleichartig sein, aber die weitere Entwicklung ist verschieden und nötigt dazu, beide Arten von Großformen auseinander zu halten.

Daß unter besonderen Umständen, d. h. eben dann, wenn sie die Möglichkeit starker Sedimentzufuhr erhalten, auch Tiefseegräben zu Geosynklinalen werden können, soll

nicht bestritten werden. Solange aber diese Möglichkeit fehlt, wird kein Tiefseeegraben zur Geosynklinale, und die Beschaffenheit der Geosynklinalsedimente früherer Zeiten liefert keinen Beweis für die Umwandlung eines Tiefseeegrabens in eine Geosynklinale und ebensowenig für das Bestehen von Tiefseeegräben in wesentlich früheren Zeiten.

Erfurter Hütte im Sonnwendgebirge,
29. Sept. 1926.
