

Geologie im Umbruch¹

Alexander TOLLMANN, Wien

Mit 6 Textabbildungen

Einleitung	53
I. Die Etappen im historischen Weg der geologischen Forschung	55
II. Geologische Aspekte der Gegenwart	58
III. Die neuen Probleme des mediterranen Raumes; Ausblick	70
Zusammenfassung	78
Summary	78
Résumé	78

Geologie im Umbruch muß das Thema lauten, versucht man, sich Rechenschaft zu geben über die Bedeutung der neuen Erkenntnisse der Geologie, die eine grundlegende Veränderung unseres Bildes vom Bau und der Entwicklung der Erdkruste in den letzten Jahren bewirkt haben. Geologie im Umbruch deshalb, weil durch diese erstmals in ganzer Breite mit exakten Methoden der Geophysik untermauerten Erkenntnisse unser bisheriges wohlgefügtes und daher gegen das Neue auch bis zuletzt wohlverteidigtes Weltbild des Fixismus, das heißt der heute unter unseren Füßen im wesentlichen unbewegt gedachten Erdkruste, in der Tat zusammengebrochen ist, weil wir an einer Wende ohnegleichen in unserer Wissenschaft stehen, an der sich bereits jetzt nicht nur die Konturen des neuen Bildes abzeichnen, sondern schon ein im Grundsätzlichen festgefügtes Gerüst der neuen Vorstellung errichtet ist.

Wiederholt hat sich in den einzelnen Zweigen der Naturwissenschaft der Schritt vom Fixismus zum Mobilismus vollzogen. Dieser Schritt bedeutete jedesmal den Verzicht auf die dem menschlichen Wesen offenbar immanente Vorstellung der Dominanz des Ruhenden, des Festgefügteten, des Beständigen, das Basis gibt in der Flut der auf uns eindringenden flüchtigen Erscheinungen, den Verzicht auf eine Vorstellung der Stabilität, die letztlich das eigene Ich verankern läßt, der Stabilität, die dem individuellen Sein auch in seinem engeren Kreise und darüber hinaus eine gewisse Sicherheit und Geborgenheit gibt. Jedesmal waren es geniale Forscherpersönlichkeiten, die den einsamen Weg des Neuen wagten, die meist Jahrzehnte, häufig auch ein halbes Jahrhundert ihrer Zeit voran, das Tor zu Neuem aufstießen und dann zugleich naturgemäß gezwungen waren, zum Kampf mit der alten, eingewurzelten und vertrauten Anschauung anzutreten. Jedesmal aber bedeutete dieser grundsätzliche Verzicht auf das Festgefügte zugunsten des Fließens, der Bewe-

¹ Als Antrittsvorlesung am 14. 12. 1972 in gekürzter Form gehaltener Vortrag.

gung, der Entwicklung, den entscheidenden Wendepunkt dieses Wissenszweiges: Waren die Dämme dergestalt gebrochen, waren die Vorurteile weggeräumt, dann ergoß sich jedesmal eine Flut neuer Erkenntnisse, neuer Ideen, zog diese Wendung im Großen hundertfältige Wendung bis ins Detail nach sich.

Einige wenige Beispiele aus den Naturwissenschaften, in denen sich diese entscheidende Wende bereits in so weit zurückliegender Zeit vollzogen hat, daß wir heute die Auswirkung mit dem entsprechenden Abstand in ihrem gesamten Ausmaß überblicken können, seien in Erinnerung gerufen: Als KOPERNIKUS im Jahre 1543 in seinem Buch „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ der Erde ihre seit fast zwei Jahrtausenden zuge dachte ruhende Stellung im Mittelpunkt des Weltalls nahm und sie zugunsten der Sonne entthronte, begann die moderne Ära der Astronomie, für die nun der Himmel in einem neuen Sinn eröffnet war, vollzog sich eine einschneidende Umwälzung des naturwissenschaftlichen Weltbildes, nachhaltig auch die Vorstellung der Philosophie und Religion beeinflussend. Mit dem 1859 erschienenen Werk von Ch. DARWIN „Die Entstehung der Arten“ vollzog sich gleich in zwei Wissenschaften, der Biologie und der Paläontologie, jener entscheidende Durchbruch des Gedankens der Evolution im Belebten gegenüber der zuvor gedachten Konstanz der Arten. Die Revolution auf dem Gebiet der Physik vom Statischen zum Dynamischen, von der Erkenntnis der so unglaublich anmutenden Bewegungssysteme und Energiesysteme im Atombau, also im Feinbau der uns doch so festgefügt entgegertretenden Materie, von E. RUTHERFORD und N. BOHR (1913) zuerst erfaßt, ist mit all den atemberaubenden praktischen Konsequenzen noch so frisch in unserem Gedächtnis, daß es wohl kaum der Worte der Erläuterung des Ausmaßes dieser Revolution bedarf.

In der Geologie hat sich diese entscheidende Wende vom Fixismus zum Mobilismus in zwei deutlich getrennten Etappen vollzogen. Der erste Schritt war mit der Aufstellung der Deckenlehre durch den Pariser Geologen Marcel BERTRAND am 18. Februar 1884 getan, der übrigens ohne jegliche lokale Kenntnis der Verhältnisse in den Schweizer Alpen in genialer Schau riesige Gebirgsmassen der zentralen Alpen zwischen den Préalpes am Genfersee und den westlichen Nordkalkalpen als entwurzelte, ferntransportierte, horizontal überschobene Krustenteile erkannt hatte und damit den Weg von der gebundenen Tektonik zur freien Tektonik gewiesen hatte. Der internationale Geologenkongreß in Wien 1903 bildete den Höhepunkt auf dem Siegeszug der Deckenlehre, die in den Jahrzehnten um die Jahrhundertwende uns erst die Möglichkeit gab, die interessantesten Zonen der Erdkruste, die Orogene der Kettengebirge, zu verstehen.

Die zweite Etappe aber war durch die vor der Geologischen Vereinigung in Frankfurt am 6. Jänner 1912 von Alfred WEGENER vorgetragene Gedankengänge über die Kontinentalverschiebungstheorie eröffnet worden, eine Vorstellung, die zwar etwa gleichzeitig von einer Reihe von anderen Autoren ebenfalls ins Auge gefaßt worden war, aber erst durch WEGENER in der Schrift „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“, in erster Auflage im Jahre 1915 erschienen, in ganzer Breite tieferschürfend begründet worden war. Diese Erkenntnis vom Driften der gesamten kontinentalen Massen als teilbewegliches Schollenmosaik über dem mobilen Untergrund der Kruste, die Erkenntnis von der jungen Entstehung der auch jetzt noch vielfach in Ausdehnung befindlichen Ozeanbecken — eine Erkenntnis, die nach so intensiver allgemeiner Bekämpfung erst ein halbes Jahrhundert später in unseren Tagen

so glänzend bestätigt wurde —, bewirkte die nachhaltigste Umstellung in der Vorstellung von der Entwicklung der Erdkruste, der Orogenese, des heutigen Erdzustandes.

War durch die Deckenlehre bereits eine Mobilität der Kruste im jüngsten orogenen Abschnitt der Erdgeschichte im Hundertkilometerbereich und darüber hinaus erkannt worden, so gibt uns die heute unter dem Begriff der *Plattentektonik* zusammengefaßte Schau der mobilen Erdkruste die Möglichkeit, das ganze ungeahnte und ungeheuerliche Ausmaß der Beweglichkeit der festen Kruste zu überschauen, durch welche die Großschollen der Kontinente allein in alpidischer Ära Wegstrecken von vielen tausend Kilometern relativ zueinander zurückgelegt haben. Diese so lange phantastisch anmutenden Vorstellungen sind heute gut belegt. Sie sind nachgewiesen durch eine Flut geophysikalischer Meßdaten verschiedenster Art, sie sind weiters belegt durch alte und neue fundamentale geologische und paläontologische Beobachtungen. Der Umbau der Kruste vom stabilen Panzer zum treibenden Schollenhaufenwerk auf säkularplastischem Untergrund ist in unserer Vorstellung vollzogen. Ausmaß, Richtungssinn und Auswirkungen der Bewegungen einer „aus allen Fugen geratenen Welt“ zeichnen sich für die nachpaläozoische Entwicklung der Erde in großen Zügen ab, Neuland eröffnet sich für die zahllosen Konsequenzen, die sich aus der Schollenbewegung dieser Ära ergeben, völliges Neuland betreten wir bei dem Versuch, das Erdbild für die Reihe der präalpidischen orogenen Zyklen zu rekonstruieren. Nicht nur die regionalgeologischen Vorstellungen, sondern auch die großen Theorien der geologischen Entwicklung, wie Phasenlehre, Zyklizität des vulkanischen Geschehens, geosynklinale und orogene Entwicklungsetappen u. s. f. — sie alle erfahren durch die nun sichtbar werdende Abhängigkeit von der Plattentektonik zum Teil entscheidende Umgestaltungen, sie werden aber andererseits durch Klarstellung mancher bisher im Dunkeln stehenden Kausalzusammenhänge besser verständlich. Auch auf diesem Gebiet ist das Ausmaß der Folgerungen aus den neuen Vorstellungen von der extremen Mobilität der Kruste noch gar nicht absehbar.

I. Die Etappen im historischen Weg der geologischen Forschung

In Zeiten eines derart stürmischen Umdenkens einer Wissenschaft, im Banne des Suchens neuer, vielfach unbegangener Wege, mag es wohl angebracht sein, den Standort neu zu bestimmen, Rückblick und Ausblick vorzunehmen, um Übersicht und Orientierung zu behalten. Vielleicht mag hier die Entwicklung der Wissenschaft am sinnfälligsten vor Augen geführt werden, wenn wir sie in Bezug setzen zur Frist des Wirkens einer Geologengeneration, oder zu den Umwälzungen, die sich im Laufe eines Forscherlebens vollziehen. Es sei zugleich gestattet, diese Art der Entwicklung geologischen Denkens aus der Sicht der Wiener Schule zu beleuchten.

Als vor nunmehr 71 Jahren Prof. Eduard *Suess*, der Begründer des Wiener Geologischen Institutes, nach 88 Semestern Lehrtätigkeit an der Wiener Universität am 13. Juli 1901 seine Abschiedsvorlesung hielt, war das erste Kapitel moderner geologischer Forschung gerade beendet. Von der zu Beginn der Lehrtätigkeit von Eduard *Suess* (1857) noch gültigen *Cuvier'schen* Katastrophenlehre mit ihren 29 Neuschöpfungen und völligen Faunenvernichtungen ward bereits früh der entscheidende Schritt zum Gedanken der natürlichen Evolu-

tion getan, als Ch. DARWIN 1859 mit seinem Buch über „Die Entstehung der Arten“ in beispielloser Weise das biologische Denken beeinflusst hatte. Von der zu Beginn der Arbeit von E. SUESS noch immer gültigen L. v. BUCH'schen Theorie der Erhebungskrater zur Erklärung der Entstehung der Gebirge durch Beiseiteschieben der Kruste durch vulkanische Kräfte, die durch die Ausgestaltung durch E. de BEAUMONT allerdings bereits zum Extrem verzerrt worden war, vollzog sich in dieser Ära der Umschwung zum Geist der Deckenlehre. Vom Fehlen jeglichen systematisch-regionalen Überblickes über die geologische Formung der Erdoberfläche führt in der Zeit von E. SUESS der Weg zum Verständnis des „Antlitz der Erde“, zur weltweiten Ausgliederung der alpinen, varizischen (-armorikanischen) und kaledonischen Gebirgssysteme, zur Trennung von gebirgsbildender Zone und Vorland. In der alpinen Stratigraphie schließlich erfolgt der Schritt vom Sammelsurium des bis um 1860 verwendeten Begriffes „Alpenkalk“ bis zur Errichtung des stratigraphischen Gebäudes des alpinen Mesozoikums, tethysweit bis Himalaya und Sundaarchipel und darüber hinaus gültig.

In diese Zeit der stürmischen Entwicklung der Geologie in ihrer ersten, mit fundierten naturwissenschaftlichen Methoden arbeitenden Periode, fallen die glanzvollen Entdeckungen und Erkenntnisse der Großen des ausgehenden vorigen Jahrhunderts, von deren klangvollen Namen zur Charakterisierung der Situation beispielhaft in Erinnerung gerufen seien: Albert HEIM als Altmeister der Schweizer Schule mit den „Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung“ (1878), der französische Forscher Marcel BERTRAND, der mit der Umdeutung der „Glarner Doppelfalte“ die im Jahre 1884 zu der Aufstellung der Deckenlehre führte, eine Revolution des tektonischen Denkens einleitete, Pierre TERMIER aus Paris und Maurice LUGÉON aus Lausanne, die die entscheidenden Bausteine für die Kenntnis der Struktur des zentralen mediterranen Raumes fügten, Eduard SUESS selber schließlich, der mit dem schmalen Büchlein „Die Entstehung der Alpen“ im Jahre 1875 nicht nur das umfassende geologische Gedankengut seines späteren Werkes „Das Antlitz der Erde“ vorwegnahm, sondern gerade auch durch diese auch heute noch modern anmutende Schrift maßgeblich an der ersten großen Umwälzung des geologischen Denkens beteiligt gewesen war.

Die erste Hälfte unseres Jahrhunderts gibt nach dem am Ende der ersten Etappe erzielten Überblick über den regionalen Bau der Erde auf der Basis der Deckenlehre Zeit zum Besinnen über die Grundprinzipien der Gestaltung der Erdkruste, zur Entwicklung der Grundideen über die Gestaltungsprinzipien der Erde. Große Geister wie O. AMPFERER (1906), mit der von E. KRAUS später ausgebauten Unterströmungstheorie, A. WEGENER mit der Erkenntnis vom Driften der Kontinente (1912), L. KOBER mit der durch Berücksichtigung der Gravitation gegenüber E. SUESS seit 1935 modifizierten Kontraktionstheorie, R. W. van BEMMELEN mit seiner Undationstheorie und zahlreiche andere Forscher standen nebeneinander, kämpften miteinander und versuchten mit den damals zur Verfügung stehenden Mitteln Entscheidungen zu erzielen. Obgleich dieser Wettstreit der großen Ideen von unserer Generation in seiner Endphase gerade noch miterlebt worden ist, gehört er heute auf Grund der Vielzahl von geophysikalischen Methoden, die bei gar manchen der alten Probleme Entscheidungen fällen lassen, bereits der Geschichte an. Und es legt sich wie ein später Hauch der Versöhnung die Erkenntnis über die einstigen heftigen Diskussionen, daß manches

scheinbar Konträre zu Recht besteht, da eben letztlich stets grundlegende Beobachtungen die Basis der verschiedenen Theorien bildeten und diese dann in dem hierdurch begründeten Anteil Gültigkeit bewahren: AMPFERERS Unterströmungstheorie wird durch die heutigen Erkenntnisse der Passivität der Bewegung der Krustenschollen bei der Plattentektonik glänzend bestätigt, die Annahme der enormen Einengung der Geosynklinalen auf einen Bruchteil der einstigen Breite durch Tangentialdruck im Sinne von TERMIER, STAUB und KOBER besteht zu Recht, die viel bekämpfte Nordnarbe im zentralmediterranen orogenen System im Sinne von E. KRAUS ist als Wurzelzone der Externiden und als erste gewaltige Subduktionszone des abtauchenden europäischen Kontinentes gesichert (allerdings in anderer Bedeutung als bei E. KRAUS selbst). Der wahre Kern der Theorien blieb vor der stets mit neuen Mitteln prüfenden Kritik bestehen, nicht Gültiges verschwand.

Die zweite Hälfte unseres Jahrhunderts aber ist in erster Linie durch das rapide Anwachsen neuer exakter Untersuchungsmethoden in der Geologie gekennzeichnet, Methoden, die vielfach auf dem Einsatz der physikalischen Forschungsprinzipien beruhen und demnach auf vielen Sektoren der Geologie praktisch einen neuen Boden der Forschung geschaffen haben. Es kommt zur echten Zusammenarbeit der Geophysik mit der Geologie. Seismische, gravimetrische, geoelektrische Messungen, paläomagnetische Untersuchungen, genaue Erfassung der Erdwärmeströmung, verschiedenartige Auswertung der Radioaktivität der Elemente im eigenen Zweig der Isotopengeologie wie die Auswertung für Paläotemperaturmessungen und Geochronologie und zahlreiche weitere Untersuchungsarten lieferten vielfach exakte und für manche fundamentale Frage entscheidende Daten. Größere Exaktheit wird auch durch die Anwendung der klassischen Methoden mikroskopischer Gesteinsuntersuchungen auf breiterem Sektor erreicht, nämlich durch Einsatz zur lithologischen und mikropaläontologischen Prüfung der Sedimentgesteine, die durch Schriffe, Folienabzüge, durch Schlämmen, Lösen und andere Mittel für diese mikroskopische Analyse aufbereitet werden. Die Erschließung der Mikrofaunen und die Ermittlung deren stratigraphischer Aussagekraft hat das Gesichtsfeld im stratigraphischen Sektor um ein Beträchtliches erweitert. Ferner aber haben in der Sedimentologie und Fazieskunde die Besinnung auf das Aktualitätsprinzip zu einem Durchbruch bei der Deutung fossiler Sedimente geführt, da die zahllosen Erkenntnisse der rezenten Meeres- und Rifforschung vielfach direkt auf die fossilen Äquivalente Anwendung finden konnten. Über die fazielle Deutung hinaus sind hierdurch befruchtende und wertvolle Impulse für die damit häufig verbundene tektonische Analyse im orogenen Bereich ausgegangen. Vergessen werden darf schließlich nicht die Flut der exakten Daten, die durch die zunehmende Zahl von technischen Großaufschlüssen verschiedenster Art, durch die Tiefbohrprogramme der Erdölfirmen und Bergbaugesellschaften sowie durch deren geophysikalische Exploration zustandegebracht worden sind.

Eine neue Welt schließlich aber hat sich mit dem Einsetzen der systematischen wissenschaftlichen Erforschung der Ozeane unseres Planeten eröffnet: Liegen doch fast 71% der Erdoberfläche unserem Blick entzogen unter dem Spiegel der Ozeane. Die geologische Erforschung dieser Räume zunächst durch detaillierte geophysikalische Aufnahme, seit 1968 durch direkte Tiefseebohrungen vorangetrieben, stellt eine der wissenschaft-

lichen Großtaten unseres Jahrhunderts dar, durch ihre wissenschaftliche Ergiebigkeit noch die Untersuchungen der Mondoberfläche übertreffend. Das eigens hierfür erbaute Bohrschiff „Glomar Challenger“ kreuzt seit 11. August 1968 unentwegt durch alle Meere der Welt, vermag noch bei Wassertiefen von fast 7.000 Metern die Bohrungen, die gelegentlich an und über 1.000 Meter tief in den Ozeanboden vordringen, niederzubringen: Im Rahmen dieses Tiefseebohrprogrammes von vier vereinigten amerikanischen Ozeanographischen Instituten („JOIDES“) sind bereits die Böden vom Atlantik, vom Pazifik, vom Mittelmeer und zuletzt vom Indik durch profilmäßig angesetzte Bohrpunktreihen durchgezogen. Umwälzende Vorstellungen über Sedimentation und Fazies, über Ausmaß und Art des irdischen Vulkanismus, über die Entstehung der Kontinente und Ozeane basieren gerade auf diesen Untersuchungen.

II. Geologische Aspekte der Gegenwart

Ich möchte die sich derzeit abzeichnende Auffassung vom Bau der Erdkruste an drei Beispielen zu beleuchten versuchen, Beispiele verschiedener Dimensionen, von denen den untergeordneten auf Grund ihrer Struktur die Aussagekraft eines Typus zukommt und die daher für das Ganze stehen sollen. Sie können und sollen hier auch nicht annähernd eingehend geschildert werden, sondern es soll durch die Heraushebung einiger grundsätzlicher Wesenszüge die moderne Richtung des Ganges der Forschung gezeigt werden. Als Beispiel eins sei die Großstruktur der Ostalpen vorgebracht, als Beispiel zwei seien die neuen Vorstellungen über den mediterranen Raum skizziert und als drittes Beispiel endlich soll die Struktur der Erdkruste als Ganzes überblickt werden. Das zweite Beispiel, das die neuen Tendenzen in der Deutung der mediterranen Strukturen enthält, soll aber nicht in diesem Abschnitt, der geologische Ergebnisse behandeln wird, Erörterung finden, sondern zufolge des überaus problematischen Charakters der gerade jetzt neu in Bewegung gekommenen Vorstellungen über diese Region erst in den abschließenden Ausführungen vor Augen geführt werden, die die künftigen Aufgaben geologischer Forschung zeigen sollen.

Wenn hier zunächst das Beispiel der Ostalpen als Typus eines Orogenabschnittes des zusammenhängenden Kettengebirgsgürtels im Bereich der Tethys herausgegriffen wird, dann wohl teils aus dem begrifflichen Grunde, da die Wiener Schule mit der Erforschung dieses Gebirgssystems besonders verbunden ist, teils aber auch deshalb, da es wohl im Verein mit dem Westalpenbogen eines der am besten erforschten Orogene der Erde darstellt und in historischer Sicht weltweit stets als Musterbeispiel, als locus classicus eines komplizierten Orogens schlechthin, betrachtet worden ist. Das Fortschreiten detaillierter und sorgfältiger Kartierung in zahlreichen, für die Gebirgsstruktur wesentlichen Regionen, der Einsatz vieler oben genannter exakter Methoden bei der Analyse des Gebirgssystems von der absoluten Altersdatierung über mikropaläontologisch belegte Einstufungen auch noch in leicht metamorphen Serien bis zu kleintektonischen vergenzanalytischen Untersuchungen, umfangreiche Erschließungsarbeiten der Erdölfirmer in den alpinen Randzonen, sowie technische Großaufschlüsse und saline Tiefbohrungen im Inneren des Ostalpenkörpers, haben die Kenntnis der Struktur unseres Gebirges in den letzten Jahrzehnten entscheidend erweitert. Als überraschendes Ergebnis all dieser Untersuchungen zeichnet sich klar eine Linie ab: Das

Ausmaß des tangentialen Zusammenschubes steigert sich nach neuen Erkenntnissen mehr und mehr und wird morgen, wie sich bereits jetzt vielfach abzeichnet, noch weiter anwachsen: Die Vorstellungen von einem noch vor Jahrzehnten gewaltig erschienenen und von so vielen abgelehnten Deckenbau der Ostalpen, für die L. KOBER ein Leben lang gekämpft hat, werden noch weit von dem übertroffen, was uns exakte, auf sorgfältigen Detailuntersuchungen basierende Beobachtungen heute zwingend nahelegen.

Ich möchte hier auszugsweise einige Daten aus allen Stockwerken des ostalpinen Deckengebäudes vor Augen führen, die KOBER bei seiner Synthese noch nicht gekannt hat. Die tiefste Einheit, das penninische System der Zentralzone, das seit der Erfassung im Tauernfenster eine zentrale Rolle für die Beurteilung der großen ostalpinen Überschiebung innehat, erweist sich an Ausdehnung und an Ausmaß des Deckenbaues noch gewaltiger, als bisher angenommen: In bezug auf die Ausdehnung des Pennins ist auf den erst in diesem Jahr gelungenen paläontologischen Nachweis des kretazischen Alters eines Anteils der Rechnitzer Serie zu erinnern, die am Ostende der Alpen fensterförmig unter dem rahmenden Kristallin hervorkommt, und der man auf Grund dieser Stellung lange paläozoisches Alter zugeschrieben hatte, bevor in ihrem Seriencharakter die Züge penninischen Mesozoikums erkannt worden waren. Die Fixierung des Wiederauftauchens des Pennins am Alpenostrand hat, wie vom Standpunkt der Deckenlehre stets betont, gewaltige Folgerungen für das Ausmaß des Deckenbaues der Westkarpaten, da die bis jüngst immer wieder vorgebrachten Konstruktionen, die ein gegen Nordost gerichtetes frühes Auslaufen des Pennins im Alpenkörper und damit ein Enden der großen Überschiebungen gen Osten annahmen, hierdurch hinfällig werden. Im Inneren des Penninikums des — heute ja endlich, nach so langen Kämpfen bewiesenen — Tauernfesters entrollt sich aber ein mit den neuen Beobachtungen stets wachsendes Ausmaß des Deckenbaues: zunächst im mächtigen sedimentären Anteil, der im gesamten Tauernfenster vorhandenen Oberen Schieferhülledecke („Glocknerdecke“) und der bereits der nächsttieferen tektonischen Etage (Untere Schieferhülle) angehörigen, am besten als „Modereckdecke“ zu bezeichnenden Einheit (ehemalige Seidlwinkel- und Brennkogeldecke) und noch weiteren Teildecken im zentralen Teil der Tauern; ferner aber steckt Deckenbau in einem unerwartet hohen Ausmaß auch in den Zentralgneiskernen selbst, die zwar durch altersmäßig unsichere zentrale Schieferhüllestreifen getrennt sind, deren alpidische deckenförmige Gestaltung aber heute durch den auf absoluter Altersdatierung beruhenden Nachweis der permischen also spät- bis postvaristischen Platznahme der Zentralgneismassen geführt werden kann: die gewaltigen, stockwerkförmig übereinanderliegenden Gneiskörper des östlichen und westlichen Tauernfensterteiles von der Gößgraben- bzw. Granatspitzeinheit im Liegenden zu den großen Zentralgneiskörpern im Hangenden im Gasteiner und Zillertaler Raum besitzen demnach zweifelsohne alpidischen, da postpermisch geformten Deckencharakter. Ferner sind große Teile des Alt-Kristallins zwischen dem Zentralgneis und der Schieferhülle (in Form der Storzdecke und ihrer Äquivalente) als allochthoner Anteil des „Alten Daches“ fernüberschoben.

Auch die ostalpine Deckenmasse zeigt mit zunehmendem Maß der Erkenntnisse einen noch wesentlich intensiveren und großzügigeren Deckenbau als in der klassischen Zeit der Deckenlehre unter L. KOBER angenommen worden war. Das 1959 neu abgetrennte mittelostalpine Deckenstockwerk zwingt

zu gewaltigen Schubweiten des im wesentlichen auf die nicht metamorphe paläozoisch-mesozoische Sedimenthaut beschränkten oberostalpinen Deckensystems im Ausmaß von 165 km Horizontaltransport nur zwischen den beiden letzterwähnten Etagen. Gegen diese Deckentrennung, die vielerorts eindrucksvoll durch Unterlagerung von zentralalpiner, dem mittelostalpinen Kristallin transgressiv auflagernder Permotrias unter dem Paläozoikum der Grauwackenzone und der Gurktaler Decke dokumentiert wird, ist als Haupteinwand eine angebliche variszische Verschweißung der Überlagerung in Kärnten westlich und südlich der Saualpe ins Treffen geführt worden. Eine sehr sorgfältige Untersuchung des Kristallins der Saualpe und der angrenzenden Regionen vor allem durch die Schulen PILGER und SCHÖNENBERG's haben schließlich das Gegenteil der Verschweißungshypothese zu Tage gefördert: eine deutliche tektonische Trennungsfläche zieht am Südrand der Saualpe zwischen Oberbau und dem kristallinen Sockel hin, diskordant und durch alpidische Diaphthorite auch altersmäßig einstuftbar. Nicht nur ist durch diese Arbeiten die anfangs gelegnete Trennung vom Mittel- und Oberostalpinen Deckensystem bestätigt worden, sondern darüber hinaus noch ein weiterer interner Deckenbau unerwarteten Ausmaßes innerhalb der oberostalpinen Gurktaler Decke herausgearbeitet worden, indem sich hier die altpaläozoische Serie auf Grund der mit Conodonten vorgenommenen Einstufung Dutzende Kilometer weit quer zum Streichen verdoppelt, so daß innerhalb dieser erst jüngst als alpidische Decke erfaßten Einheit sich weitere interne großräumige Decken herauschälen ließen. Auf der anderen Seite ist durch diese Untersuchungen auch innerhalb des mittelostalpinen Kristallins östlich des Tauernfensters ein bedeutender Deckenbau bestätigt worden (dessen Alter zwar noch nicht eingestuft ist, dessen Ausmaß aber etwa an der Überschiebung der Saualpendecke über die Stubalpendecke überrascht, vgl. hierzu zusammenfassendes Referat des Verfassers 1971).

Ebenso sind Deckenbau und Fernüberschiebung der Nördlichen Kalkalpen über der Flyschdecke und über der Helvetischen Decke nach einer überwundenen Phase der Umdeutungsversuche auf gebundene Tektonik, auf Pilzfalten und Beutelmulden, besser gesichert als je zuvor. Neue Argumente für den Fernschub sind hinzugekommen, so der Nachweis des Flyschfensters von Windischgarsten weit im Inneren der Kalkalpen, die Ergebnisse der kalkalpinen Tiefbohrung Urmannsau bei Gaming, die Entdeckung eines kalkalpinen Spurschollenteppichs in den Zentralalpen im Prätigau. Die in den westlichen Kalkalpen für den Internbau neuerdings versuchte Pilzfaltenhypothese zur Erklärung der Deckschollen und Fenster konnte an jedem einzelnen hierfür genannten Objekt durch kleintektonische Prüfung der Vergenzrichtung an Hand der schönen nordgerichteten Schleppfalten und zahlreicher anderer Kriterien mit Sicherheit widerlegt werden, neue Entdeckungen von weiteren Deckschollen in den Lechtaler Alpen haben dort auch die Existenz der obersten Einheit AMPFERERS, der Krabachjochdecke im Hangende der Inntaldecke, zur Gewißheit werden lassen. Auf der anderen Seite haben Untersuchungen in der Hallstätter Zone im Gegensatz zum klassischen Schema zunächst auch Vielfaziesdecken, schließlich auch parautochthone Hallstätter Schollen zutage gefördert, sodaß die einst von E. v. Mojsisovics aufgestellte Kanaltheorie hier zurecht wieder zu Ehren gelangt. Gerade die Kalkalpen mit ihrer faziellen und tektonischen Mannigfaltigkeit warnen uns eindringlich von jeder Art von Schematismus: Pilzfalten stehen neben echten Deckschollen,

autochthone Decken neben Ferndecken, sekundärer Südschub neben primärer Nordbewegung, Faziesdecken neben Vielfaziesdecken, Faziesrekurrenzen (Hallstätter Zonen als Warnung vor „Zylindrismus“) erscheinen neben enorm weit im Streichen aushaltenden schmalen und sehr spezifischen Faziesstreifen.

Heute haben wir zufolge der Vielfalt der Untersuchungsmethoden durchaus die Möglichkeit, all diese individuellen Gestaltungsprinzipien im einzelnen zu belegen, zu beweisen und sind über den in der Pionierzeit wohl in gewissem Maß nötig gewesenem Schematismus hinausgewachsen. War die Feststellung des großartigen Deckenbaues der Ostalpen nach der Jahrhundertwende von vielen noch mit großer Skepsis betrachtet worden, und zwar unter Hinweis auf die damals ja in vielen Details noch recht unzulängliche Kenntnis dieses Gebirgssystems, und hatte so mancher erwartet, daß bei fortschreitendem Kenntnisstand viele der deckentektonischen Hypothesen fallen würden, so trat genau das Gegenteil ein. Heute, 70 Jahre nach den ersten großen deckentektonischen Entdeckungen im Raume der Ostalpen sind die einst so umstrittenen Grundstrukturen des Deckengebäudes des Gebirgssystems, das Tauernfenster mit seinem penninischen Gesteinsinhalt, das Wechsel-Semmeringfenster, der Fernschub der Kalkalpen etc. längst selbstverständliche Grundtatsachen des Gebirgsbaues geworden, die hinzukommenden oben erwähnten, noch weit darüber hinausweisenden neuen Entdeckungen des letzten Dezenniums werden Zug um Zug mit Belegen exakter Forschungsmethoden untermauert.

Wie kommt es nun, daß nicht nur in den Alpen, sondern auch in allen übrigen Abschnitten des mediterranen Systems von der Betischen Kordillere Spaniens angefangen über Atlas, Apennin, Karpaten, Balkan, Dinariden und Helleniden allenthalben, wo man mit Bohrprogrammen vordringt, wo neue Detailkartennetze über das Land gelegt werden, Schubweiten konstatiert werden, die 100 km vielfach erreichen, vielfach auch übersteigen? Worin liegt die Ursache, daß wir bei noch so vorsichtigen Abwicklungen durch verschiedenste Autoren in den West- und Ostalpen ursprüngliche Geosynklinalbreiten von 600—800 km erhalten, gegenüber einer heutigen Gebirgsbreite von 150 km. L. KOBER (1955), Avantgardist der Deckenlehre in den Ostalpen, wagte nicht, über eine Abwicklungsbreite von 300 km hinauszugehen, benötigte sie übrigens beim damaligen Stand der Kenntnisse auch nicht. Wir sehen heute, KOBER war an ein begrenztes Maß der orogenen Einengung im alpidischen, im variszischen Zyklus gebunden, da er die Kräfte aus der Krustenverkürzung zufolge der Kontraktion der Erde ableitete, und bei dieser fixistischen Vorstellung enge Grenzen durch die möglichen maximalen Kontraktionen gesetzt waren.

Die heute ermittelten Einengungsbeträge überschreiten aber bei weitem dieses Ausmaß. Heute wird sichtbar, daß ein noch gewaltigerer Mechanismus wirksam ist, daß noch größere Kräfte am Werk sind, die die Dimensionen der Bewegungen steigern: wir haben diesen Mechanismus in den letzten Jahren mit immer größerer Sicherheit zugleich in jenen Kräften erblicken können, die die Kontinentalschollen der Erdkruste als Ganzes verdriften, also in den die Kruste bewegenden Unterströmungen. Das Prinzip einer durchgehenden, aus Sial bestehenden Kruste, die die Spannungen bei einer Erdkontraktion, sich allseits abstützend, lange zu tragen imstand ist, bis diese Spannungen dann in einem Zug als Orogenese ausgelöst

werden, ist nach Erkenntnis des Fehlens eines abstützenden Sial-Widerlagers im Bereich der simatischen Ozeanböden gefallen; damit aber auch die (weiterhin im Prinzip durchaus mögliche) Kontraktion der Erde als Kraftquelle für die Orogenese. Orogenzonen stellen sich hingegen dort ein, wo die frei beweglichen Kontinentalschollen durch die Unterströmungswalzen (Prinzip der BENARD'schen Zellen, 1901) gegeneinander gedriftet werden, wo die Kompression die Schollenränder deformiert. Der Tiefbau der Orogene beeinflusst noch den Mantel-Oberrand der Erde beträchtlich. Dem großartigen Deckenbau der Oberfläche entspricht ein noch bedeutenderer der Tiefe. Gebirgswurzeln im geophysikalischen Sinn bringen in großer Breite das leichtere Krustenmaterial bis 50 km und mehr in die Tiefe, also doppelt so tief als die normale Krustendicke beträgt. Schweremessungen und Refraktionsseismik haben darüber hinaus gigantische Dichteinversionen, einem Tiefdeckenbau vergleichbar, ange getroffen (P. GIESE et al. 1970; H. BERKHEMER 1968; W. KAMINSKI und H. MENZEL 1968; J. MAKRIŠ 1971 etc.): Im Ivreakörper z. B. wird das Mantelmaterial in Form von Ultramafititen (F. ROST 1971) sowie tieferes Krustenmaterial mit Dichtewerten von 3,2—2,9 nordvergent in 100 km Breite über Krustenmaterial mit Dichtewerten von 2,7 aus Tiefen von rund 50 km überschoben und erreicht in der Ivreazone selbst sogar die Erdoberfläche (vgl. Symposium über Ivreazone: Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 48, H. 1, 1968). In den Ostalpen und in dem anschließenden südalpinen Raum liegt eine fast die ganze Breite einnehmende inverse Schichtung der Dichteverteilung in rund 20 km Tiefe, wie verschiedene geophysikalische Untersuchungen zeigten (G. ANGENHEISTER et al. 1972). Die zunehmende Kenntnis des Ausmaßes der Deckenstruktur der Oberfläche, die einsetzende Kenntnis der gewaltigen Dichteinversionsstrukturen in den tiefen Stockwerken des Orogen, das heißt ein Tiefdeckenbau noch bedeutenderen Ausmaßes als jener an der Oberfläche, und schließlich die Kenntnis des allen zugrunde liegenden Mechanismus der Plattentektonik, läßt uns heute die Orogenese besser als je zuvor als einen nach Größe der im Spiel stehenden Kräfte und Dimensionen wahrhaft kosmisch-geologischen Prozeß verstehen. In diesem Sinne also sind auch die bedeutenden Schubweiten der Oberflächendecken noch durchaus bescheidene Äußerungen des von uns heute erfassbaren, weitaus größer dimensionierten Geschehens der Tiefe.

Mehrfach ist im Vorhergehenden auf den heute als tektonisches Grundgestaltungsprinzip der Erdkruste erkannten Schollendriftmechanismus bzw. die Plattentektonik hingewiesen worden. Die in den beiden letzten Jahrzehnten, besonders aber in den letzten Jahren von Seiten der Geophysik beigebrachte Fülle verschiedenartigen Beweismaterials, eine Reihe von speziellen Symposien zu diesem Thema seit 1952 und schließlich die direkte Untersuchung der Ozeanböden durch Bohrungen hat endlich dem bereits seit dem Jahre 1912 von Alfred WEGENER so präzise dargelegten Gedankengut der Kontinentaldrift in ganzer Breite zum Durchbruch verholfen. Die Entscheidung über die Verschiebungstheorie fiel also in der Art, wie sie WEGENER selbst im Vorwort der vierten Auflage seines Buches „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“ vorgesehen hatte: „Dennoch glaube ich, daß die endgültige Entscheidung über sie nur durch die Geophysik gefällt werden kann, da nur sie über genügend exakte Methoden verfügt.“ Zuzufolge der tiefgreifenden Auswirkungen, die die erst heute voll erfaßte Realität des Driftens der Krustenschollen auf die verschiedensten Bereiche der Geologie nach sich zieht, sei hier in aller Kürze über die heutige Kenntnis der Kontinentaldrift berichtet.

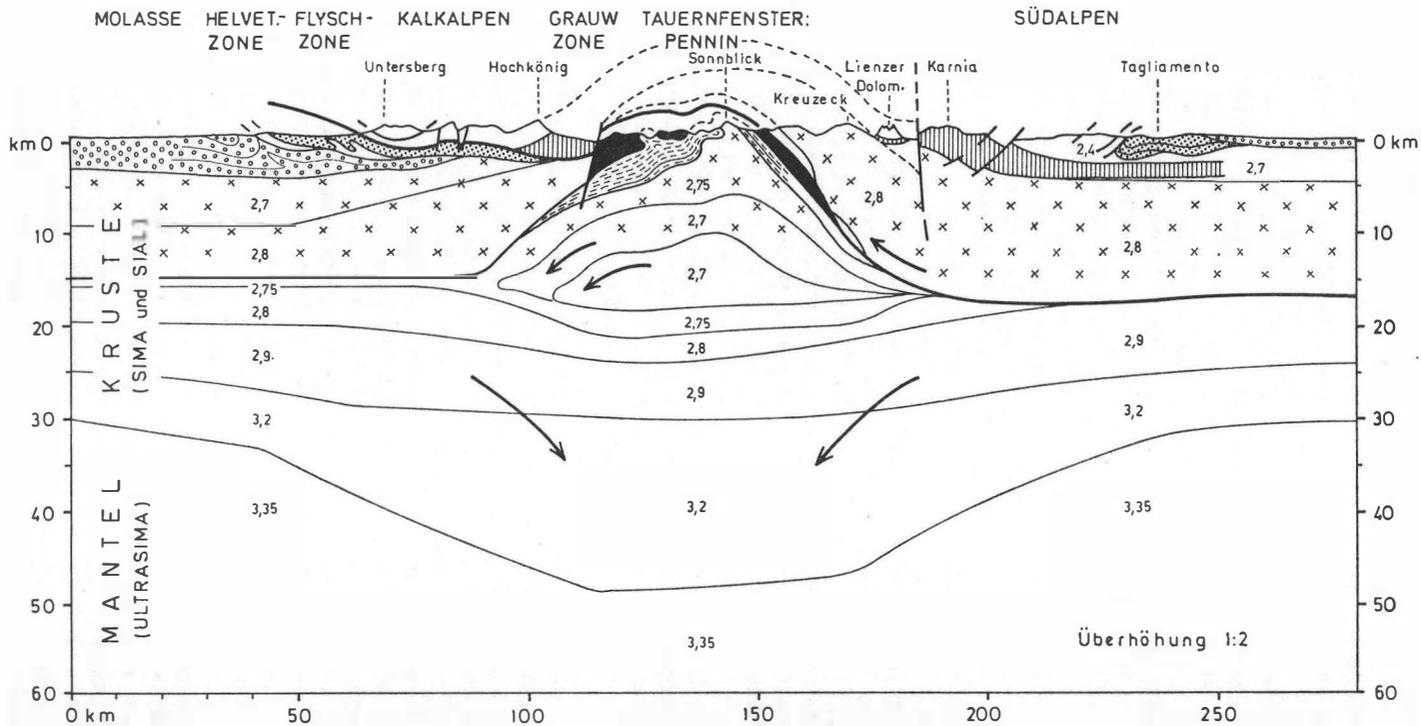


Abbildung 1

Deckenbau und Tiefgang des Ostalpen-Orogens. Die Dichteverteilung in der Tiefe ist nach J. MARKIS (1971, Abb. 15) eingetragen. Im Tiefbau des Penninischen Systems kommt deutlich die enorme Stauchung dieses südlichsten Krustenstreifens des europäischen Kontinents vor dem heran- und darüber hinwegdriftenden Ostalpin-Südalpin-System als Teil des Randschollenkranzes des Afrikanischen Blockes zum Ausdruck. Der ophiolithreiche eugeosynklinale Sedimentstreifen der Glocknerdecke (schwarze Signatur) stellt sich genau an der Grenze der beiden großen Systeme ein und gibt Hinweis auf bedeutende Einengung im Bereich des fast ganz verschwundenen Ozeankrustenbereiches, von dem Reste im Heiligenbluter Serpentin vorliegen mögen.

Das tektonische Geschehen des bis jüngst uns als gewaltig erschienenen Deckenbaues der Orogene ist klein, gemessen an den bereits jetzt mit Sicherheit erfassbaren Bewegungen der Erdhaut, die, in einzelne Großschollen gegliedert, in stetem Wandel begriffen ist. Die Ozeanbecken, lange Zeit schlechthin Symbol der Konstanz, sind im letzten Entwicklungszyklus der Erde seit dem Mesozoikum neu entstanden, jetzt noch mit Beträgen bis zu 12 cm pro Jahr an Breite gewinnend. An ihren Rändern aber werden sie von den Kontinenten bereits wieder partiell überfahren. WEGENERS visionäre Schau des Auseinanderdriftens der vormesozoischen Kruste in der alpidischen Ära, wobei die Krustentrümmer sich in den heutigen Kontinenten abgesondert haben, ist glänzend bestätigt worden, WEGENERS Kampf und Einsatz seines Lebens nachträglich voll gerechtfertigt. An WEGENERS Verdienst ändert auch nichts der Umstand, daß heute naturgemäß etliche Abwandlungen gegenüber seiner ursprünglichen Auffassung nötig sind, wie etwa die Tieferlegung der Bewegungsflächen der Schollen von der Basis der Erdkruste noch weit in den Erdmantel hinein. Auch sind manch fruchtbare Ergänzungen zur Theorie von WEGENER hinzugekommen, wie z. B. die sea-floor spreading Hypothese.

Die Kontinentaldrifttheorie von WEGENER war anfangs Jahrzehnte hindurch in Deutschland praktisch negiert und von führenden amerikanischen Geologen wörtlich als Hindernis für die Forschung oder als Märchen bezeichnet worden. Mit wachsender Detailkenntnis aber kamen zunächst immer mehr Fakten klassischer Art zutage, für WEGENERS Auffassung sprechend: Die Kontinentalränder beiderseits des Atlantiks passen perfekt, wenn nicht die heutige Küste sondern der Sialschelf in Betracht gezogen wird. Das Übergreifen der geologischen Strukturen über den Atlantik, und zwar in bezug auf spezifische Serien, auf Vulkanite, Beckenfüllungen etc. wurde im einzelnen lokalisiert, nicht nur im Appalachen-Kaledoniden-System im Nordatlantik, sondern besonders auch in der Verbindung von Westafrika zu Südamerika, wo unter vielen anderen Strukturen zum Beispiel die scharfe Grenze zwischen dem Eburnischen System westlich von Akkra mit zahllosen, auf absolute Altersmessungen beruhenden Werten von rund 2.000 Mill. Jahren und der Panafrikanischen Altersprovinz östlich davon mit Werten von 550 Millionen Jahren ihre direkte und klare Fortsetzung an der erwarteten Stelle am südamerikanischen Kontinent bei Sao Luis in Brasilien mit entsprechenden Altersdaten findet (E. MACHENS 1971 etc.). Zahllose paläontologische Beweise für die alten Zusammenhänge kamen hinzu, so etwa die im einzelnen untersuchte gleichartige Entwicklungstendenz der Artenreihen der tiefer-kretazischen Süßwasserostracoden-Faunen in zwei über die Kontinentalränder übergreifenden Süßwasserbecken zwischen Angola und dem Golf von Guinea bzw. der brasilianischen Ostküste (K. KRÖMMELBEIN 1964; 1971) — eine Erscheinung, die für sicheren einstigen Zusammenhang spricht, da ein Überqueren des heute dazwischenliegenden marinen Bereiches für diese Süßwasserformen unmöglich ist. Besonders eindrucksvoll sind auch die heute im einzelnen bekannten Abflußrichtungen des Gondwana-Inlandeises aus den Teilzentren Südafrikas, wobei die Fortsetzung dieser Eis-Bewegungsrichtungen sich jenseits des Atlantiks am südamerikanischen Kontinent, von der Küste gegen das Landesinnere gerichtet, nachweisen ließ.

Mit dem verstärkten Einsatz der geophysikalischen Untersuchungen aber schoben sich neue, zwingendere Argumente in den Vordergrund: Zunächst war das Ausdünnen der Sialkruste gegen den gabbroiden-basalti-

schen Simaboden der Ozeane in vielen Abschnitten in allen Einzelheiten registriert worden. Bald kam als wesentlicher Faktor die Koinzidenz der kongruenten, aber verschieden gelagerten Polwanderungskurven hinzu, die nach getrennter Ermittlung der Polwanderungen aus paläomagnetischen Messungen in Amerika und in Eurasien sich nur bei Rücknahme der kontinentalen Drift einstellt. Entscheidend aber für die Anerkennung der weltweiten Schollendrift wurde die anfangs der Sechzigerjahre erfolgte Entdeckung des *ocean floor spreading*, der kontinuierlichen Vergrößerung der Ozeanböden entlang der mittelozeanischen Rücken. Dieses System

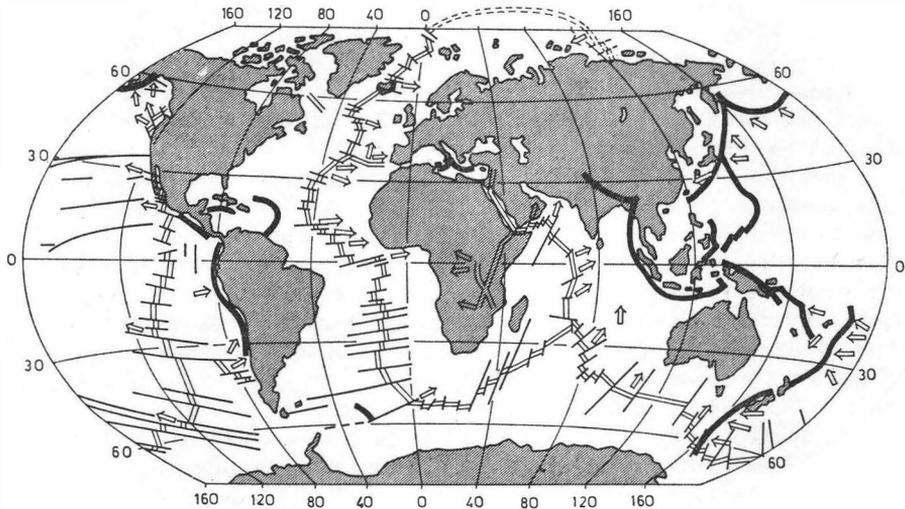


Abbildung 2

Die Hauptaktivität der Erdkruste in der Gegenwart. Sie liegt im Bereich der zentral-ozeanischen Rücken (Riftsysteme) als aktive Streifen ozeanischen Krustenaufbaues zufolge aufsteigender Konvektionsströmungen (Doppellinien) und im Raum der Ränder der Krustenplatten (trenches) mit Verschluckungsfunktion zufolge absteigender subkrustaler Strömungen (dicke schwarze Linien), wo ozeanische Krustenplatten wiederum abgebaut werden. Bewegungsrichtungen nach seismischen Vektoren durch Pfeile markiert. Skizze nach D. TARLING 1971 und P. WYLLIE 1971 kombiniert

der mittelozeanischen Rücken war allmählich immer klarer als eines der Hauptstrukturelemente der Erdkruste im Bereich der Ozeane erkannt und schließlich in einer zusammenhängenden Länge von 80.000 km erfaßt worden. Der Scheitel dieser zentralen Ozeanrücken ist weltweit durch ein Rift (valley)-System (im Sinne J. GREGORY 1920), also eine tektonisch bedingte breite Längsfurche markiert. Die Bedeutung dieses Ozeanrückensystems konnte durch folgende Fakten bald geklärt werden: Im Bereich dieser Rücken ist eine kräftige Erhöhung des Wärmestromes aus dem Erdinneren zu registrieren. Die intensive Seismizität dieser Zonen zeigt aus flach lagernden Herden Bewegungsrichtungen, die von den Rückensystemen weg orientiert sind, die also auf Dehnung der Kruste in diesem Streifen hinweisen. Zusammen mit dem erhöhten Wärmestrom ergab sich daher aller Wahrscheinlichkeit nach als Ursache im Untergrund der mittelozeanischen Rücken ein aufwärts und dann auswärts gerichtetes Konvektionsstromsystem aus der Tiefe des Erdmantels. Beweisend

schließlich für eine derartige Annahme wurde die Entdeckung von durchgehenden, zum zentralen Riftsystem spiegelbildlich symmetrisch angeordneten streifenförmigen Zonen von abwechselnd normal und invers magnetisierten Erstarrungsgesteinen. Kurz zuvor war ja erst die bis heute nicht begründbare Existenz wiederholter, geologisch gesehen schlagartig erfolgter Reversionen, also Umkehrungen des Erdmagnetfeldes konstatiert worden, wobei die Abschnitte zwischen den in geologischer Hinsicht plötzlich erfolgten Umpolungen vom magnetischen Nord- und Südpol jeweils etwa Zeitabschnitte von einer halben bis eineinhalb Millionen Jahre einnehmen². Die Anfügung von verschieden breiten, aber immer spiegelbildlich zum zentralen Riftsystem äquivalent abwechselnd normal und invers magnetisierten Bändern von basischen Eruptivgesteinen auf den Ozeanböden, durch Magnetometer von Schiffen aus seit 1960 systematisch kartiert, hat den direkten Nachweis des Breitenwachstums der Ozeane von den zentralen Narben aus nach beiden Seiten hin erbracht. In jüngster Zeit schließlich ist das jugendliche Alter der Ozeanböden durch die Tiefseebohrungen des JOIDES-Programmes auch vielfach unmittelbar erwiesen worden (Abb. 3). Die Eintragung der heute in ihrer Alterseinstufung bekannten Reversionen auf den Ozeanbodenkarten gibt direkt das Muster der Geschwindigkeit der *sea floors spreading* wieder. Das Wachstum der Ozeanböden beiderseits des Riftsystems ist demnach heute für die einzelnen Abschnitte bekannt: Im Nordatlantik beträgt das Wachstum (und damit die Vergrößerung der Entfernung Europa — Amerika) 2 cm pro Jahr, im Ostpazifik erreicht es ein Maximum von 10—12 cm pro Jahr. Island, genau auf der nordatlantischen Schwelle gelegen, ist eine der wenigen Stellen, wo man das ozeanische Riftsystem mit den aufreißenden Spalten, der deckenförmig ausfließenden Lava und die Entstehung neuer Vulkane an der Erdoberfläche beobachten kann. Ansonsten kommen nur Ausläufer dieses Systems an und unter die Kontinente heran, wie zum Beispiel das System der San Andreas-Verwerfung mit Seitenverschiebungen von durchschnittlich 2 cm pro Jahr in Kalifornien oder das Grabensystem im Ostteil Afrikas bzw. im Roten-See-Gebiet als Ableger des zentralen indischen Ozeanrückens.

Die an die Riftsysteme gebundene ständige Vergrößerung der Ozeanböden hat in der Frühzeit dieser Erkenntnis naturgemäß der Expansionstheorie großen Auftrieb gegeben. Davon abgesehen, daß derartige Beträge in geologischen Zeiträumen zu einer aus der Erdgeschichte durch nichts belegbaren extrem raschen Volumensvergrößerung der Erde führen würde, kennt man heute ja bereits den genteiligen Mechanismus des Verschwindens, Abtauchens der ozeanischen Kruste entlang der großen Tiefseegräben, den sogenannten

² Um die vielfältige Bedeutung mancher der neuen geophysikalischen Erkenntnisse zu demonstrieren, sei hier auf weitere Auswirkungen der Erfassung der wiederholten Reversionen des Erdmagnetismus hingewiesen. Außer der erwähnten Bedeutung zur Klärung der Entstehung der Ozeanböden liegt der Wert der Kenntnis dieser Reversionen in der Möglichkeit des Aufbaues eines neuen geochronologischen Systems, welches besonders für die jüngeren Zeitabschnitte bereits präzise weltweite Korrelationen — auch im Sedimentgestein — erlaubt. Ferner aber läßt sich bereits jetzt die tiefgreifende Auswirkung der Reversionen auf die biologische Entwicklung in der Erdgeschichte ableiten: J. D. HAYS (1971) konnte nach ausgreifenden Studien an Tiefseeboden-Kernen zeigen, daß von acht in den letzten 2,5 Millionen Jahren ausgestorbenen Radiolarienarten sechs Arten jeweils genau mit den magnetischen Reversionen erlöschten. Es ist zu vermuten, daß bei der Umpolung durch den kurzfristigen Zusammenbruch des erdmagnetischen Feldes die kosmische Strahlung in weit größerem Ausmaß die Erdoberfläche erreicht und genetische Veränderungen bei den Organismen bewirkt hat. Wir erhalten so von ganz neuer Richtung Hinweise auf mögliche Ursachen für das bisher ungeklärte Aussterben ganzer Organismengruppen in eng begrenzten Zeiträumen.

„trenches“ — im Beispiel des Pazifischen Ozeans etwa vor den ostasiatischen Inselbögen und in den Tiefseeegräben östlich von Australien sowie westlich der Anden gelegen. Hier verschwindet Ozeankruste in der Tiefe, entweder ebenfalls unter ozeanischen Platten oder aber unter den Schollen der Kontinente. Im Bereich der Tethys aber ist unter Überföhrung einstiger

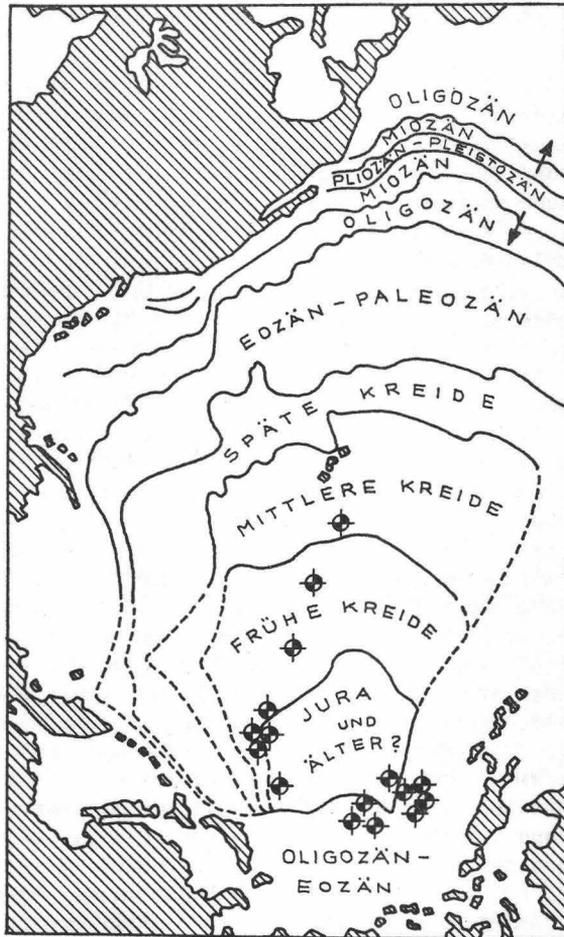


Abbildung 3

Das Alter der Kruste im Nordpazifik und die Bohrpunkte des Glomar-Challenger-Projektes. Das Bild zeigt eindrucksvoll den gleichsinnigen Zuwachs von ozeanischer Kruste seit dem Beginn des Mesozoikums bis zu den jüngsten Bildungen im Bereich des pazifischen Rift-Systems (aus A. G. FISCHER et al. 1970, Abb. 1)

ozeanischer Kruste bzw. in direktem Kontakt von Kontinentschollen eine bedeutende Einengungszone im mesogäischen Orogen gegeben, ebenfalls als Kompensation für anderwärtige Ozeanbodenvergrößerung zu deuten. Das Hinabströmen der wiederaufgeschmolzenen Krustenteile entlang solcher trenches greift tief in den Mantel ein, wie etwa an der schräg unter den Westrand Südamerikas bis 700 km tief absteigenden, seismisch äußerst aktiven Bewe-

gungsfläche festzustellen ist. Hinter diesen trenches reihen sich auch kettenförmig die hochexplosiven Vulkane an — wir verstehen ihre Lage an den arg beanspruchten, tief zerklüfteten Plattenrändern, in deren durchgreifenden Spaltensystemen gute Aufstiegsmöglichkeiten für Laven gegeben sind, wir verstehen auch die Prävalenz des andesitischen Vulkanismus, indem hier basische Magmen sich mit den in die Tiefe geratenen und wieder aufgeschmolzenen Randpartien der Sialkruste mengen und so ein mittelbasisches Magma ergeben.

Noch eine über Jahrzehnte diskutierte Grundfrage großtektonischen Geschehens der Erdkruste läßt sich heute auf Grund der sich stets mehrenden Zahl der Einzelbeobachtungen, aber auch gerade auf Grund des Mechanismus der Plattentektonik mit besseren Argumenten beantworten. Es ist die Frage nach der Existenz weltweit gleichzeitiger orogener Phasen im Sinne von H. STILLE, ein Konzept, für und wider welches jüngst immer weitere Argumente beigebracht worden sind. Bereits aus der Beobachtung der geländemäßigen Fakten größerer orogener Abschnitte ließ sich in neuerer Zeit ablesen, daß es Großregionen mit mikropaläontologisch exakt datierten gleichzeitigen Bewegungsimpulsen gewaltigen Ausmaßes gibt, daß diese orogenen Bewegungsakte aber doch räumlich beschränkt sind, nicht weltweit durchverfolgt werden können. Das STILLE'sche Phasenprinzip in theoretischer Hinsicht in der Vorstellung der hierzu die Kräfte liefernden Kontraktion fundiert, ist demnach abzuwandeln: Das orogene Geschehen läuft phasenhaft ab, es ist aber stets auf bestimmte, verschieden große Regionen der Kruste beschränkt. Daneben gibt es auch gleichsam ein Wandern der Faltungsphasen über den Rand eines orogenen Systems in Längsrichtung hin. Aus der Plattentektonik läßt sich die Erklärung hierzu ableiten. Phasenhafte Einengungen finden in jenen Regionen statt, wo die Platten der Kruste durch die gegeneinander gerichteten Unterströmungen gegeneinander gepreßt werden: Diese Einengung, Spannungssammlung und -Auslösung erfolgt, da die Platten und die Konvektionszellen nur ein begrenztes Ausmaß haben, eben nur in begrenzten, allerdings großen Räumen. Die phasenmäßige Auslösung der durch die Einengung angesammelten Spannung erfolgt demnach durch die ja in Eigenbewegung selbständig driftenden Schollen, nicht weltweit gleichzeitig. Auch die scheinbare wellenförmige Fortpflanzung der Bewegung am Rand eines Orogens versteht sich leicht bei der Drehung einer Scholle und der damit verbundenen gleichsinnigen Verlagerung der Einengungsfront. Gerade im Mediterrangebiet erhalten wir so aus der Eigenständigkeit der einzelnen Abschnitte konkrete Hinweise auf die fundamentalen Bewegungen der afrikanischen Scholle gegenüber dem europäischen Kontinent. Weithin gleichzeitig phasenhafte, zur Deckenbildung führende kräftige Einengung in der mittleren und höheren Kreide im ostmediterranen System, die Hauptgestaltung des westmediterranen Orogens in der pyrenäischen Phase zu Ende des Eozäns, die im Osten noch als keineswegs unbedeutende Nachphase zu verspüren ist und in bezug auf welche erst jüngst durch die Klärung in den Schweizer Alpen schöne Übereinstimmung im gesamten Alpenbogen erzielt worden ist, schließlich die auf Drehung zurückführbare jüngste kräftige Randausgestaltung der Ostalpen-Karpaten-Kette mit gegen Osten immer jünger werdenden neogenen Strukturen spiegelt deutlich das zeitliche Ablösen der Schollenkompression im Osten und Westen und der schließlich erfolgten Schollenrotation wider.

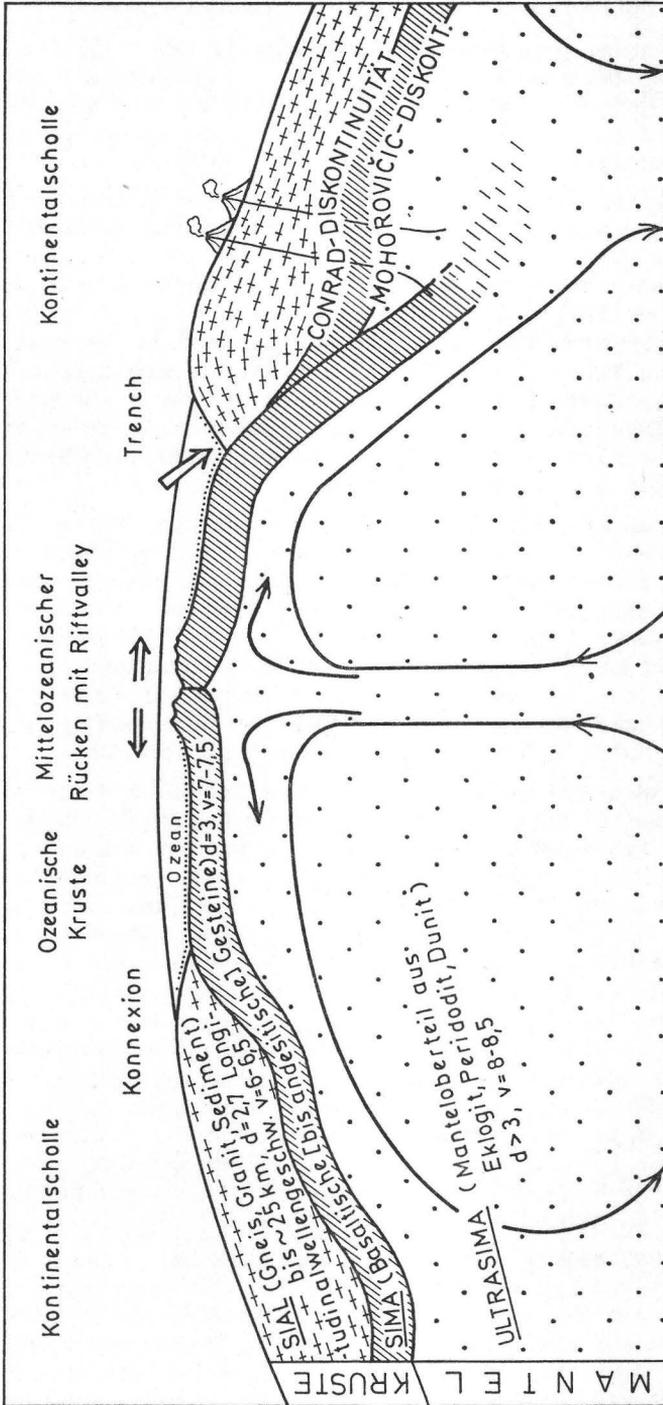


Abbildung 4 Schematisches Profil durch die Erdkruste im Bereich der kontinentalen und ozeanischen Platten

III. Die neuen Probleme des mediterranen Raumes; Ausblick

Mit dem neuen, oben skizzierten Grundkonzept und mit Hilfe der heute zur Verfügung stehenden Methoden erwachsen uns im alpinen Raum Mitteleuropas, im Kernstück und Verbindungsabschnitt zwischen westlichem und östlichem Mediterran bei der Strukturforschung im Orogen gerade jetzt zahlreiche neue Aufgaben.

Auf zwei Aufgabenstellungen soll hierbei erhöhtes Augenmerk gerichtet werden: Zum ersten auf die Prüfung anstehender, viel diskutierter Probleme der Ostalpen selbst, bei denen sich die Diskussion mangels weiterer Argumente erschöpft hat, und bei denen einfach neue Fakten mit Hilfe neuer Methoden beizubringen sind — von feinstratigraphisch-mikropaläontologischen Untersuchungen unter Anwendung der neuerkannten Fazies-Gesetzmäßigkeiten angefangen über kleintektonische Lokalbefunde bis zum Einsatz geophysikalischer Prüfungsmöglichkeiten, die grundlegende Strukturzüge der Tiefe, aber auch eine Verstellung der einstigen Orientierung der Haupteinheiten erkunden können und andere wesentliche, die Obertag-Untersuchungen ergänzende Daten liefern können.

Zum zweiten aber gilt es, die großtektonische Situation im mediterranen Raum in vergleichender Betrachtungsweise zu überprüfen: Noch erheben sich manche deckentektonische Probleme regionaler Art und daran anknüpfend allgemeiner Art, noch liegt die Großfaziesgliederung im orogenen Gebiet letztlich im argen. Trotzdem stürzen zur gleichen Zeit die großen Fragen unter dem neuen Gesichtspunkt der Plattentektonik auf uns ein, tun sich ganz anders geartete Fragestellungen auf, deren Verfolgung viel grundlegendes Neues verheißt und viele Antworten auf seit alters bekannte, aber bis dato nicht begründete Zusammenhänge verspricht.

Wie sehr diese Deutung der Entwicklung der Tethys und des mediterranen Systems in jüngster Zeit unter dem Eindruck der Realität der Plattentektonik in Bewegung gekommen ist, zeigen die ersten, wenigen, sich zum Teil noch beträchtlich widersprechenden Konzepte einer neuen Denkart, was durch die Erwähnung einiger grundlegender Fakten wenigstens kurz beleuchtet werden soll. Schon der Beginn dieser Tethys, dieses einstigen Meeressgürtels zwischen dem Rifbogen am Atlantik und dem Sundabogen, ist erneut zum Problem geworden. Fügt man den nord- und südamerikanischen Kontinent passend an den Westrand der afrikanischen Platte an, fügt man weiters die beiden Seiten des Kaledonischen Orogens zwischen Grönland und Skandinavien passend aneinander, so ist dies nur möglich, wenn zwischen dem einstigen Ostabschnitt der Urkontinente Gondwana und Laurasia ein sich gegen Osten rasch öffnender, in diese Richtung zu exorbitanter Breite anwachsender Klaff vorhanden war, hier also ein echter alter Ozean mit ozeanischer Kruste, zumindest in jungpaläozoisch-triadischer Zeit geöffnet war — vgl. E. WILSON 1962, E. BULLARD 1964, A. SMITH 1971, H. FLÜGEL 1972.

Auf der anderen Seite aber hat T. de Booy (1966; 1969) auf Grund umfangreicher und sorgfältiger Detritus-Untersuchungen aus verschiedenen Regionen der Tethys zeigen können, daß zu Ende des Paläozoikums in allen untersuchten bzw. schon in der Literatur beschriebenen Abschnitten (Betische Kordillere, Rif, Sizilien, Westalpen im Mediterrangebiet; Afghanistan, Karakorum, Nepal-Himalaja, Permsedimente von Timor — allerdings nicht

an basischen Vulkaniten reicher Detritus des Jungmesozoikums dieser letztgenannten Region) Sialkruste den nachmaligen Raum der Tethys eingenommen hatte. Wir sehen ja auch in den Ostalpen, daß selbst jene Gebiete wie der Nordteil des Pennins mit seiner ebenfalls schon eugeosynklinalen Fazies noch Gneiskomplexe als Basis erkennen lassen, wo noch Lamellen des Untergrundes mit den Schieferhülledecken mittransportiert wor-

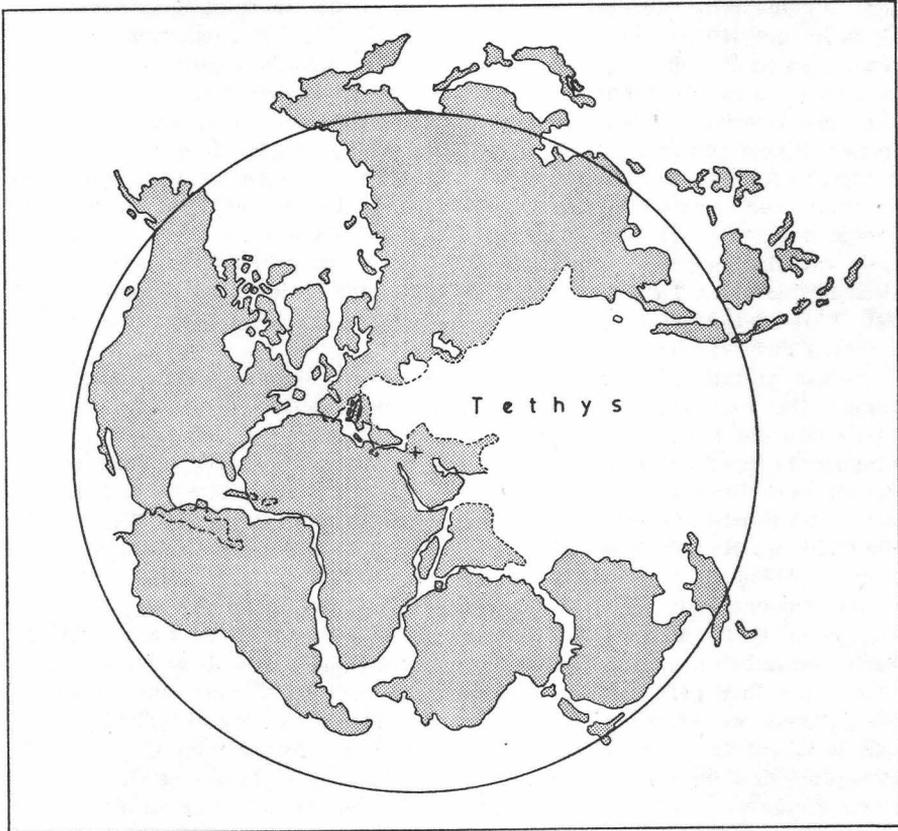


Abbildung 5

Zu Beginn des Mesozoikums scheint die Tethys wahrhaft ozeanisches Ausmaß besessen zu haben. Dies ergibt sich aus der Zusammenfügung der Kontinente beiderseits des Atlantischen Ozeans zur Erstellung der Paläogeographie zu Ende des Paläozoikums unter Berücksichtigung der Paläopollagen der Schollen (nach A. G. SMITH 1971, Abb. 1)

den sind. (Nur die oberste penninische Decke der Ostalpen, die Glocknerdecke, bildet eine Ausnahme, wie unten näher angeführt werden wird. Auch in allen übrigen Teilzonen der ostalpinen Geosynklinalen sind die Reste der sialischen Sockel gleichermaßen nachweisbar.)

Mit der Erforschung der heutigen Tiefseeböden in den Ozeanbecken der Erde hat man durch das JOIDES-Bohrprogramm erkannt, daß die dort angebotenen, seit dem Mesozoikum bis zur Gegenwart gebildeten Ablagerungen ganz jenen Charakter tragen, den wir aus den Orogenen als eugeo-

synklinale Fazies zu bezeichnen pflegen: Als Leitgestein der eugeo-synklinalen Zonen der Kettengebirge der Erde gelten in erster Linie die sogenannten Ophiolithe, also basische, submarine Effusiva wie Basaltlaven mit Pillowstruktur, später oft in Grünschiefer und Prasinit verwandelt, ferner Gabbro, auch Einschübe von Ultramafititen, dann mit den basischen Effusiva eng verbundene pelagische Sedimente wie Radiolarite, schließlich pelagische Kalke und Tonschiefer sowie Flyschgesteine mit ihrem Charakter von Turbiditen; Olisthostrome werden in neuerer Zeit zu dieser einst besonders durch G. STEINMANN (1906) herausgearbeiteten, weltweit in den Orogenen verbreiteten typischen Gesteinsvergesellschaftung hinzugezählt. Die Erforschung der Tiefseeböden durch Kernbohrung hat nun dort ganz den gleichen Typus der Gesteins-Assoziation wiedergezeigt. Von den mittelozeanischen Rücken werden in gewaltigem Umfang Ophiolithe geliefert. Pelagische Kalke entstehen rezent in den Tiefen der Ozeanbecken wohl nur auf submarinen Schwellenzonen, die oberhalb von 4.500—5.000 Metern Meerestiefe liegen, während in größeren Tiefen durch den erhöhten Kohlensäuregehalt kein Karbonat, sondern Radiolarit und Braunschlick zur Ablagerung gelangt, welcher letzterer sich diagenetisch in den roten Tiefseeton verwandelt. Erstaunlich hoch ist schließlich nach den JOIDES-Bohrberichten die Beteiligung von Turbiditen am Aufbau der rezenten Tiefseesedimente.

Diese auffälligen Analogien zwischen den heute beobachtbaren Ablagerungen über ozeanischer Kruste und eugeosynklinalen Sedimenten des mediterranen Orogens haben jüngst dazu Veranlassung gegeben, daß jene eugeosynklinalen Sedimentreihen der Tethys, die in Abscherungsdecken ohne älteren Sockel vorliegen, als Bildungen über einstiger ozeanischer Kruste betrachtet werden. So hat etwa, um einige Beispiele zu nennen, F. WEZEL (1970) die Ophiolith-Radiolaritzone von Rif—Tell—Atlas und sizilianischem Abschnitt als eine Ablagerung über ozeanischer Kruste gedeutet, F. DECANDIA & P. ELTER (1969) Analoges für das ophiolithreiche ligurische Deckensystem abgeleitet, M. LEMOIN (1972) in den Westalpen den penninischen Anteil der Chabrière-Serie vermutlich oberjurassisch-unterkretazischen Alters in diese Zone gestellt. In den Ostalpen paßt die Obere Schieferhülledecke („Glocknerdecke“ nov.sens.) wie sie vom Verfasser im Gesamttraum des Tauernfensters abgegliedert worden war, gut in dieses Konzept: Die Massen an Ophiolithen (Grünschiefer, Prasinite) sind im wesentlichen auf diese penninische Decke beschränkt. Als Basis dieser abgescherten Haut kann im Gegensatz zu früheren Meinungen nirgends mehr Sialkruste belegt werden, da etwa die seinerzeit gerne an ihre Basis gestellte Rote Wand-Modereck-Gneislamelle im Raum von Heiligenblut bereits der nächsttieferen Schieferhülledecke, nämlich der wohl am besten als Modereckdecke zu bezeichnenden Einheit (Vereinigung der einstigen Seidwinkeldecke und Brennkogeldecke) angehört — wie aus der Sonnblickkarte von Ch. EXNER (1962) abzuleiten ist. Es ist bezeichnend, daß das tiefste „Schichtglied“ der Glocknerdecke im Raum Heiligenblut stets aus mächtigem Heiligenbluter Serpentin mit seinen Reliktstrukturen von Diallag und rhombischem Pyroxen entlang der Hauptüberschiebungsbahn gebildet ist. Auch im Nordosten des Tauernfensters ist diese Decke der Oberen Schieferhülle tektonisch von der bisher oft zugehörig gedachten Schrovín-Gneislamelle abgetrennt, wie aus Ch. EXNER (1971) entnommen werden kann. Ob die geringen Reste von Triasfetzen, die sich stellenweise an der Basis der Oberen Schieferhülledecke einstellen, ihr primär zugehören oder Schürflinge darstellen, muß unter diesem

Gesichtspunkt neu geprüft werden. Die Gesamtsituation im Westmediterrangebiet zeigt jedenfalls, daß die penninischen Ophiolithe kein höheres Alter als Jura aufweisen. Im Ostmediterrangebiet hingegen erscheinen im Südost die altberühmten mächtigen Ophiolith-Radiolarit-Zonen von den Dinariden an bis nach Anatolien bereits ab der Trias, gelegentlich auch vom Flysch begleitet. Auch diese Zonen werden heute vielfach als vom ozeanischen Krustenstreifen abgescherte Sedimentdecken gedeutet. Zusage dieser Auffassung hätte sich demnach im früheren bis mittleren Mesozoikum (Trias bis tiefe Kreide) mit einer gegen Westen fortschreitenden Verzögerung Ozeanboden im mediterranen Abschnitt der Tethys gebildet, hätte zu dieser Zeit im Gegensatz zu der ab tieferer bzw. mittlerer Kreide — gegen Westen hin wiederum verzögert — einsetzenden Kompression Dilatationstendenz geherrscht: Diese Auffassung steht im Einklang mit der in den Schweizer Alpen auf Grund von Feldbefunden belegten Zerrbruchtektonik der jurassischen Zeit (H. GÜNZLER-SEIFFERT 1941; R. TRÜMPY 1960), die alte Auffassung E. ARGAND'S von der einengenden Embryonaltektonik ersetzend. Hält man sich an die Vorstellung von frühmesozoischer Ozeanisierung von Tethysabschnitten, so ist das Bild allerdings nicht so einfach, wie bei J. DERCOURT 1970 gezeichnet, da keineswegs ein einheitlicher Tethysozean mit einem mittelozeanischen Rücken und den üblichen Seitenverschiebungen angenommen werden kann, da die hier ins Auge gefaßten Zonen zwar hauptsächlich im Südost, teils aber auch im Nordost liegen und nicht miteinander in Verbindung stehen, sondern durch zwischengeschaltete Sialkrusten getrennt werden. Um trotzdem zu einer einheitlichen ozeanischen Tethys („Ophiolithdecke“) zu gelangen, hat zum Beispiel H. LAUBSCHER (1971) eine gewaltige Seitenverschiebung mit 300 km Versetzungsbetrag angenommen, die aber zumindest in den östlichen Abschnitten nicht nachweisbar ist.

Einem weiteren gewichtigen Gesichtspunkt ist bei der Rekonstruktion der Entwicklung der mediterranen Tethys in alpidischer Ära Rechnung zu tragen. Paläomagnetische Messungen frühpermischer Gesteine verschiedener Abschnitte des Mediterrangebietes zeigen, bereits von J. de BOER (1955) und jüngst besonders von R. van der Voo & J. ZIJDERVELD (1969) dargestellt, verschiedene individuelle Verdrehungsbeträge der Teilschollen. Der außeralpine eurasiatische Schild nördlich der Pyrenäen und der Alpen-Karpatenkette mit seiner einheitlich auf den bekannten frühpermischen Pol ausgerichteten remanenten Magnetisierungen gibt zu erkennen, daß er keine interne Teilverdrehung in alpidischer Zeit mitgemacht hat. Im mediterranen Raum hingegen läßt sich auf Grund der paläomagnetischen Messungen erkennen, daß die Iberische Halbinsel um 35°, Korsika um 21°, Sardinien und der Apennin um rund 40° entgegen dem Sinne des Uhrzeigers als selbständige Blöcke, als Mikrokontinente, verdrift worden sind, was mit Varianten in all den modernen Zusammenfassungen über den westmediterranen Raum Eingang gefunden hat (vgl. z. B. R. van BEMMELEN 1969; A. CAIRE 1970; J. DERCOURT 1970; L. GLANGEAUD 1968; K. HSÜ 1971; A. G. SMITH 1971 etc.). Die selbständige rotierende Bewegung und Verdriftung dieser Schollen, die übrigens nicht gleichzeitig, sondern zu verschiedenen Zeitpunkten zwischen später Trias und später Kreide, ja sogar noch bis ins Miozän vor sich gegangen ist, wird durch eine individuelle Verdrehung der einzelnen Schollen zwischen dem relativ zu Europa in erster und anhaltender Driftbewegung während der mesozoischen Ära ostwärts verschobenen afrikanischen Kontinente erklärt. Der

Gesamtweg Afrikas in bezug auf Europa kann auf indirektem Weg aus den unterschiedlichen Öffnungsgeschwindigkeiten des Mittel- und Nordatlantik, d. h. des verschieden spät einsetzenden und verschieden rasch ablaufenden Driftens der afrikanischen Scholle und der eurasiatischen Scholle abgeleitet werden (A. SMITH 1971).

Die erste, oben erwähnte Relativbewegung Afrikas gegen Osten (gegenüber Europa) erfolgte mit der im mittleren Lias einsetzenden Öffnung des Mittelatlantik und dauerte bis in die späte Oberkreide an. Dann, bis zu Ende des Eozäns, erfolgte im Zusammenhang mit dem nun sich öffnenden Nord-

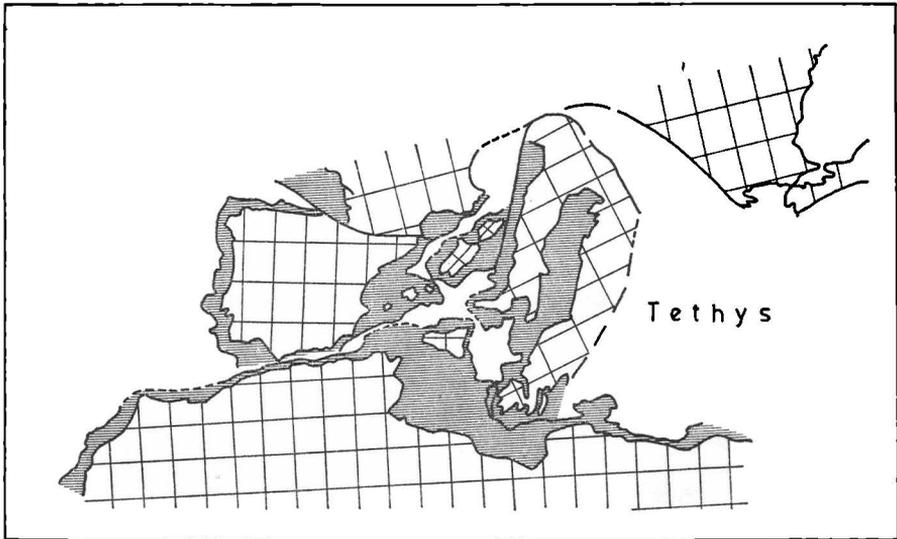


Abbildung 6

Die frühjurassische Paläogeographie des Mediterrangebietes nach K. HSÜ 1971, Abb. 3, als Beispiel für einen Rekonstruktionsversuch des frühen Geosynklijalraumes der westlichen Tethys. Bei derartigen Rekonstruktionen sind derzeit meist erst die bisherigen geophysikalischen Daten berücksichtigt, während zahlreichen geologischen Fakten noch nicht genügend Rechnung getragen wird: So etwa der geologisch ermittelten Abwicklungsweite der Orogene, der Abwicklungsrichtung, der Plastizität der Gebirgsstränge auch in Längsrichtung. Die mediterranen Elemente werden noch als starre „Mikrokontinente“ aneinandergedüht. Erst eine wesentlich verbreiterte geophysikalische Basis und die Berücksichtigung aller geologischen Fakten wird in Zukunft eine fundierte Rekonstruktion der mediterranen Paläogeographie in den einzelnen Entwicklungsstapen gestatten

atlantik eine relative Rückbewegung Afrikas gegen Westnordwesten, die mit dem Ende des Eozäns bis zur Gegenwart in eine langsamere Nordwestbewegung abgewandelt wird. Wir sehen in diesem theoretisch abgeleiteten Gerüst erste Hinweise auf eine Bindung mit den aus der mediterranen Orogenese selbst ablesbaren Daten: Umstellung in der Mittelkreide vom Geosynklijalstadium auf erste kräftigere Einengung (besonders im Osten), zweite Umstellung in der pyrenäischen Phase zu Ende des Eozäns mit einem zweiten markanten Nachdrängen der Vorländer. Während das Auseinanderdriften der Schollen im Atlantik einigermaßen kontinuierlich verläuft, ergaben sich hingegen bei der Kompression der meridional gegeneinander driftenden Kontinentalsschollen Spannungen, die eine Zeitlang aufgestaut, dann aber in Phasen aufgelöst

wurden. Eindrucksvoll ist der Weg der südeuropäischen Mikrokontinente zwischen Iberischer und Apenninischer Halbinsel, deren Rotationsausmaß man durch die oben erwähnten paläomagnetischen Messungen genau kennt (vgl. z. B. Hsü 1971). Es soll nicht vergessen werden, daß bereits der große Tektoniker E. ARGAND (1924, Abb. 22 f.), auf der Kontinentaldrifttheorie WEGENERS fußend, zu dieser Auffassung der Drehung der westmediterranen Mikrokontinente gekommen war, lange bevor paläomagnetische Beweismöglichkeiten bestanden haben.

Über die letzte und jüngste Entwicklungsgeschichte des mediterranen Restmeeres hat ja das JOIDES-Tiefseebohrprogramm, Leg 13, wichtige Aufschlüsse gebracht (W. RYAN, K. Hsü et al. 1970). Es hat sich gezeigt, daß im westlichen Mittelmeer ozeanische Basaltkruste im Alboran-Becken östlich von Gibraltar unter dem Miozän-Pliozän liegt, mindestens als vortortonisch datierbar. Im Valenciatrog vor der Ostküste Spaniens wurde andesitische Asche unter dem Pliozän (und nach einer Erosionslücke des Obermiozäns) angebohrt, so daß auf Andesit-Untergrund zu schließen ist. Das Basement der Pliozän-Obermiozän-Serie im Balearen-Becken konnte nicht erbohrt werden, ist aber nach geophysikalischen Untersuchungen jenem des Valenciatroges gleichzusetzen. Im östlichen Mittelmeer konnte eine ozeanische Kruste durch Bohrungen nirgends erreicht werden, ist aber wohl in den tiefen Becken mit schlichtem Bodenrelief ebenso zu erwarten. Eigenartig erscheint zunächst der Gegensatz, der sich in den Bohrungen kundtat: Rifting, Dehnung, ozeanische Krustenentstehung im Mittelmeergebiet zwischen den einst drängenden und pressenden Kontinenten von Europa und Afrika in junger Zeit bis vor Obermiozän, daneben aber bis in jüngste Zeit ebenso Einengungstektonik, z. B. in Bohrung 127 im Hellenischen Trog (Ionisches Becken), wo unter einer 427 Meter mächtigen, mit Unterkreide einsetzenden Serie zutiefst noch flachlagerndes, überschobenes Mittelplio-än angefahren worden ist. Aber auch auf geophysikalischem Weg ist diese junge Einengung am Nordrand des Hellenischen Troges durch eine ganze Reihe von Fakten belegt worden: aus Anomalien des Schwerefeldes, des Wärmeflusses und der Seismizität durch Ph. RABINOWITZ & W. RYAN (1970), aus der Wirksamkeit der Erdbeben und der Art des Vulkanismus durch P. COMNINAKIS & B. PAPAZACHOS (1972). Der Gegensatz von Dehnung und Einengung wird bei dem Vergleich der Randverhältnisse in manchen der großen Ozeanbecken verständlich, etwa im Weststrahlen des Pazifik: Der Ozeankrustenneubildung entlang der mittelozeanischen Rücken steht die Unterfahrung der angrenzenden Kontinentalschollen durch ebendiese ozeanische, dort bereits wiederum in Tiefseegräben (trenches) abtauchende und einschmelzende Kruste gegenüber. Der Hellenische Trog aber ist in den oben angeführten Arbeiten als ein ebensolcher trench erkannt worden, in dem die mediterrane ozeanische Kruste den Hellenischen Bogen unterfährt, wobei im Bereich von Cypern noch Beteiligung von Ozeankruste und Mantelteilen im Bau dieser Struktur der Tiefe nachgewiesen worden ist. Das Schauspiel, das die ostasiatischen Gebirgs- und Inselbögen im Großen bieten, spielt sich im Mediterran auf engstem Raume ab. Der jüngst entdeckte zentrale Längsrücken im Ostmediterran wird allerdings nicht mit der Struktur der Mittel-ozeanischen Rücken, von denen das Wachstum der Ozeanböden ausgeht, verglichen, da erhöhter Wärme- und Wärmefluß fehlt und durch die Art der Erdbebenwellenfortleitung eine Kontinuität der Kruste dieses Abschnittes bezeugt wird. Eine

rezente Riftzone des Mittelmeeres ist daher im Gegensatz zu den noch wirk-samen trenches nicht bekannt.

Ein Wort noch zum Auftreten der eigenartigen Bogenform der Gebirgsketten des mesogäischen Systems: wir finden die gleiche Bogenform am ausgeprägtesten in den Inselbögen Ostasiens wieder, jeweils meist mit vorgelagerten Tiefseegräben. Diese haben sich heute, wie erwähnt, als Subduktionszonen großen Stils erwiesen, an denen eine Unterfahrung der Girlanden bis in große Tiefen des Mantels erfolgt. H. G. WUNDERLICH (1964, S. 91) macht subkrustale Turbulenz des säkularplastisch strömenden Untergrundes für die Bogenbildung verantwortlich. Jedenfalls steht die Bogenform eindeutig in direktem Zusammenhang mit diesem Unterströmen. Es ist kaum zweifelhaft, daß die Girlandengesamtanordnung des mesogäischen Systems der fossil erhaltene Ausdruck eines solchen tiefgreifenden Unterströmens des hierdurch in solche Bogen aufgelösten Kontinentrandes darstellt. Der explosive Vulkanismus ist für diese Girlanden entlang der trenches typisch, auch im Mittelmeer, wo im Hellenischen trench die Explosion des Santorin ja vor 3.500 Jahren den Untergang der Minoischen Kultur verschuldet hat. Aus Analogiegründen kann die gleiche Tiefstruktur an der Außenseite des Kalabrischen Bogens gefordert werden: Auch hier kommt die Tiefenlinie von 2.000 Metern hart an den bogenförmigen Außenrand heran, auch hier markieren tätige Vulkane wie Ätna und die Vulkane der Äolischen Inseln sowie Tiefbebenherde den Tiefgang der Bogenkontur. A. RITSEMA (1969) hat bereits auf Grund der seismischen Untersuchungen eine solche Drift des Kalabrischen Bogens gegen das Ionische Meer ins Auge gefaßt. Ohne Zweifel ist auch hier eine derartige tiefe Narbe als „Kalabrischer trench“ vorhanden.

Überblicken wir die Vielzahl der zuvor nur angedeuteten neuen Fakten, neuen Gedanken und neuen Theorien, die in dem hier beispielhaft herausgegriffenen und uns besonders am Herzen liegenden mediterranen Raum der geologischen Forschung ganz neue Impulse verliehen hat und nach all dem Mitgeteilten gerade in diesem hochkomplizierten Gebiet heute noch wesentlich mehr Probleme als Lösungen aufwirft, so zeigt sich in aller Klarheit sogleich die Aufgabe, die sich dem hier arbeitenden Geologen stellt. Sie ist — von unserem lokalen Blickfeld aus betrachtet — die gleiche Aufgabe, die seit je die Arbeitsrichtung der Wiener Schule bestimmt hat: vergleichende Betrachtung und Untersuchung der immer noch großen, heute unter neuem Blickwinkel aufgeworfenen weiteren Probleme des vielfältigen Raumes der Tethys, basierend auf zielstrebig angesetzten Spezialuntersuchungen, die heute mit weit besserer Arbeitstechnik, vor allem auch durch geophysikalische Methoden unterstützt, durchgeführt werden können. Die Ostalpen selbst stellen ja in vieler Hinsicht ein verbindendes Glied zwischen Westen und Osten im mediterranen Raum dar: Hier vollzieht sich der Übergang vom jungen, vorwiegend tertiären Bau des Westens zum alten, in den Zentralzonen kretazisch geformten Bau des Ostens. Hier setzen neue, hochindividualisierte Fazieszonen aristo-geosynklinalen Gepräges ein, deren Verfolgung gegen Südosten hin unter Herausarbeitung ihrer Variationsbreite zugleich die Basis für eine Synthese der Geosynklinal-Faziesgliederung bietet. E. SUESS hat einst die regionale Geologie als Hauptarbeitsrichtung der Wiener Schule bezeichnet. In seinem eigenen Wirken aber war diese regionalgeologische Forschung eigentlich Systemanalyse im Weltmaßstab. Regionale Geologie, von Wien aus betrieben, soll ganz in diesem Sinne auch weiterhin Systemanalyse im Großräu-

migen bleiben, in fazieller wie in tektonischer Hinsicht, bei der trotz der immerdar nötigen minutiösen Arbeit im Detail der Blick für das Ganze mit seinen Gesetzmäßigkeiten, aber auch seinen individuellen Zügen stets gewahrt bleiben soll.

Literaturverzeichnis

- AMPFERER, O.: Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. — Jb. Geol. R.-A., 56, 536—622, 42 Abb., Wien, 1908.
- ANGENHEISTER, G., BOGEL, H. et al.: Recent investigations of surficial and deeper crustal structures of the Eastern and Southern Alps. — Geol. Rdsch., 61, 349—395, 17 Abb., Stuttgart 1972.
- ARGAND, E.: La tectonique de l'Asie. — Comptes rendus 13e sess. congr. géol. int. Liège, 1, 171—372, 27 Abb., Liège 1924.
- BEMMELEN, R. W. van: Origin of the Western Mediterranean Sea. — Verh. kon. ned. geol. mijnbouw. gen., 28, 13—52, 10 Abb., s'Gravenhage 1959.
- The alpine loop of the Tethys zone. — Tectonophysics, 8, 107—113, 3 Abb., Amsterdam 1969.
- BERNARD, H.: Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en régime permanent. — Annales chim. phys., (7) 23, 62—144, 28 Abb., Paris 1901.
- BERCKHEMER, H.: Topographie des „Ivrea-Körpers“, abgeleitet aus seismischen und gravimetrischen Daten. — Schweiz. Min. Petr. Mitt., 48, 235—246, 11 Abb., Zürich, 1968.
- BERTRAND, M.: Rapports de structure des Alpes de Glaris et du bassin houiller du Nord. — Bull. Soc. Géol. France, (3) 12, 318—330, Abb. 5—7, 1 Kt., Taf. 11, Paris 1884.
- BOER, J. de: Paleomagnetic indications of megatectonic movements in the Tethys. — J. Geophys. Res., 70, 931—944, 3 Abb., 4 Tab., Chicago 1955.
- BOOY, T. de: Ein jungdliches Alter des simatischen Untergrundes der heutigen Ozeane. — Proceed. kon. nederl. Akad. Wetenschappen, ser. B, 69, No. 2, 283—295, 3 Abb., Amsterdam 1966.
- Repeated disappearance of continental crust during the geological development of the Western Mediterranean Area. — Verh. kon. ned. geol. mijnbouw. gen., 26, 79—103, 26 Abb., s'Gravenhage 1969.
- BULLARD, E. C.: Continental drift. — Quart. J. Geol. Soc. London, 120 (1964), 1—33, 15 Abb., London 1964.
- BULLARD, E. C., EVERETT, J. E. & SMITH, A. G.: The fit of the continents around the Atlantic. — Phil. Trans. Roy. Soc. London, ser. A, 258, 41 ff., London 1955.
- CAIRE, A.: Tectonique de la Méditerranée centrale. — Annales Soc. géol. Nord, 90, 207—246, 24 Abb., Lille 1970.
- COMNINAKIS, P. u. PAPAACHOS, B.: Seismicity of the Eastern Mediterranean and Some Tectonic Features of the Mediterranean Ridge. — Bull. Geol. Soc. Amer., 883, 1093—1102, 7 Abb., Boulder/Colorado 1972.
- DERCOURT, J.: L'expansion océanique actuelle et fossile: ses implications géotectoniques. — Bull. Soc. géol. France, (7) 12, 261—317, 17 Abb., Paris 1970.
- EXNER, Ch.: Geologische Karte der Sonnblickgruppe. 1 : 50.000. Wien (Geol. B.-A.) 1962.
- Geologie der peripheren Hafnergruppe (Hohe Tauern). — Jb. Geol. B.-A., 114, 1—119, 16 Abb., Taf. 1—6, Wien 1971.
- FISCHER, A. G., HEEZEN, B. et al.: Geological History of the Western North Pacific. — Science, 168, 1210—1214, 3 Abb., 1 Tab., 1970.
- FLÜGEL, H.: Zur Entwicklung der „Prototethys“ im Paläozoikum Vorderasiens. — N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 1972, 602—610, 1 Abb., Stuttgart 1972.
- GIESE, P., GÜNTHER, K. u. REUTTER, K.-J.: Vergleichende geologische und geophysikalische Betrachtungen der Westalpen und des Nordapennins. — Z. dt. geol. Ges., 120 (1968), 151—195, 8 Abb., 3 Taf., Hannover 1970.
- GIESE, P., PRODEHL, C. u. BEHNKE, C.: Ergebnisse refraktionsseismischer Messungen 1965 zwischen dem Französischen Zentralmassiv und den Westalpen. — Z. Geophysik, 33, 215—261, 35 Abb., Würzburg 1967.
- GLANGEAUD, L.: Les méthodes de la géodynamique et leurs applications aux structures de la Méditerranée occidentale. — Revue géogr. phys. géol. dyn., (2) 10, 83—135, 16 Abb., Paris 1968.
- HAYS, J. D.: Faunal Extinctions and Reversals of the Earth's Magnetic Field. — Bull. Geol. Soc. America, 82, 2433—2448, 11 Abb., 3 Tab., Boulder/Colorado 1971.
- HSÜ, K. J.: Origin of the Alps and Western Mediterranean. — Nature, 233, 44—48, 4 Abb., London 1971.
- KAMINSKI, W. u. MENZEL, H.: Zur Deutung der Schwereanomalie des Ivrea-Körpers. — Schweiz. Min. Petr. Mitt., 48, 255—260, 2 Abb., Zürich 1968.
- KOBER, L.: Kontraktion und Evolution der Erde. — Forsch. u. Fortschr., 11, 45—46, Berlin 1935.
- Bau und Entstehung der Alpen. 2. Auflage. — 379 S., 100 Abb., 3 Taf., Wien (Deuticke) 1955.
- KOTÁSEK, J. u. KRS, M.: Palaeomagnetic Investigations of the West Carpathians of Czechoslovakia. — Geofyzik. sbornik, 234, Praha 1965.
- KRÖMMELBEIN, K.: Kontinentaldrift: Fossile Muschelkrebse des Gondwanalandes. — Umschau, 71, 426—427, Frankfurt/Main 1971.
- LAUBSCHER, H. P.: Das Alpen-Dinariden-Problem und die Paläospastik der südlichen Tethys. — Geol. Rdsch., 60, 813—833, 6 Abb., Stuttgart 1971.
- LEMOINE, M.: Eugeosynclinal Domains of the Alps and the Problem of Past Oceanic Areas. — 74. Int. Geol. Congr., sect. 3, 476—485, 1 Tab., 5 Abb., Montreal 1972.
- MAACK, R.: Kontinentaldrift und Geologie des südantarktischen Ozeans. — 186 S., 14 Abb., 84 Photos, 1 Tab.-Taf., Berlin (de Gruyter) 1969.
- MACHENS, E.: Zur Frage der Kontinentalbeziehungen zwischen Westafrika und NE-Brasilien/Guayana. — Münster. Forsch. Geol. Paläont., 20/21, 149—197, 9 Abb., Münster/Westf. 1971.
- MAKRIS, J.: Aufbau der Kruste in den Ostalpen aus Schweremessungen und die Ergebnisse der Refraktionsseismik. —

- Hamburger geophys. Einzelschr., 15, 65 S., 23 Abb., 6 Karten, Hamburg 1971.
- PICHON, X. Le: Sea-floor spreading and Continental drift. — J. Geophys. Res., 73, 3661—3697, 11 Abb., Chicago 1968.
- RABINOWITZ, Ph. D. u. RYAN, W. B.: Gravity anomalies and crustal shortening in the Eastern Mediterran. — Tectonophysics, 10 (1970), 585—608, 11 Abb., Amsterdam 1970.
- RITSEMA, A. R.: Seismic date of the West Mediterranean and the problem of oceanisation. — Verh. kon. ned. geol. mijnbouw. gen., 26, 105—120, 13 Abb., s'Gravenhage 1969.
- ROEVER, W. P. de: Genesis of the western Mediterranean area. — Verh. kon. ned. geol. mijnbouw. gen., 26, 9—12, s'Gravenhage 1969.
- ROST, F.: Die alpinotypen Ultramafitite und ihre Bedeutung für den Tiefgang der alpinen Orogenese. — Verh. geol. B.-A., 1971, 266—286, 9 Abb., Wien 1971.
- RYAN, W., HSÜ, K. et al.: Deep Sea Drilling Project, Leg 13. — Geotimes, 15, 12—15, 6 Abb., 1 Tab., Washington 1970.
- Summary of Deep Sea Drilling Project — Leg XIII. — II S., 1 Tab., 1 Abb., San Diego (Univ. of California) 1970.
- SMITH, A. G.: Alpine Deformation and the Oceanic Areas of the Tethys, Mediterranean and Atlantic. — Bull. Geol. Soc. America, 82, 2039—2070, 16 Abb., Boulder 1971.
- STEINMANN, G.: Geologische Beobachtungen in den Alpen. II. — Ber. naturf. Ges. Freiburg/Br., 16, 18—67, 1 Tab., Freiburg/Br. 1906.
- SUESS, E.: Die Entstehung der Alpen. — 168 S., Wien (Braumüller) 1875.
- Abschiedsvorlesung. — Beitr. Paläont. Oesterr.-Ungarn, 14, 1—8, Wien — Leipzig 1902.
- TOLLMANN, A.: Ostalpensynthese. — 256 S., 23 Abb., 11 Taf., Wien (Deuticke) 1963).
- Die deckentektonische Gliederung der östlichen Zentralzone der Ostalpen an Hand alter und neuer Daten. — Zbl. Geol. Paläont., Teil I, 1970, 978—1002, Stuttgart 1971.
- TRÜMPY, R.: Paleotectonic evolution of the Central and Western Alps. — Bull. Geol. Soc. Amer., 71, 843—908, 14 Abb., 2 Taf., New York 1960.
- VOO, R. v. d.: Paleomagnetic evidence for the rotation of the Iberian Peninsula. — Tectonophysics, 7, No. 1, 5—56, 36 Abb., Amsterdam 1969.
- VOO, R. v. d. u. ZIJDERVELD, J.: Paleomagnetism in the Western Mediterranean Area. — Verh. kon. ned. geol. mijnbouw. gen., 26, 121—138, 14 Abb., s'Gravenhage 1969.
- WEGENER, A.: Die Entstehung der Kontinente. — Geol. Rdsch., 3, 276—292, 3 Abb., Leipzig 1912.
- Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. — 1. Aufl., Sammlung Vieweg, Heft 23, 94 S., 20 Abb., Braunschweig (Vieweg) 1915.
- WEZEL, F. C.: Interpretazione dinamica della „eugeosinclinale meso-mediterranea“. — Rivista miner. sicil., 21, No. 124—126, 187—198, 1 Abb., Palermo 1970.
- WILSON, J. T.: Hypothesis of Earth's behavior. — Nature, 198, 925—929, London 1963.
- WUNDERLICH, H. G.: Die Entstehung von Gebirgsbögen und Inselgürländern durch Turbulenz-Erscheinungen im Grenzbe- reich subkrustaler Konvektionsströme. — Geol. Mitt., 4, 91—110, 5 Abb., Aachen 1964.

Zusammenfassung

Im folgenden wird der Umbruch dargestellt, der sich in neuerer Zeit in der Vorstellung vom geologischen Bau und der Entwicklung der Erdkruste sowie der Deckengebirge der Erde vollzogen hat. Es wird der historische Weg dieser Entwicklung im vorigen und jetzigen Jahrhundert beleuchtet. Am Beispiel der Ostalpen und des mediterranen Gebietes wird die Bedeutung der Erkenntnis der Plattentektonik für die Analyse des Gebirgsbaues besonders erörtert.

Summary

The recent revolution of the fundamental ideas about the geological structure and evolution of the earth's crust and the orogenic belts of the earth is described. The history of the evolution of these ideas during the past and the present century is illustrated. The importance of the knowledge of plate tectonics is demonstrated by the example of the analysis of the Eastern Alps and the Mediterranean mountains.

Résumé

Cette article décrit la révolution récente des idées fondamentales concernant la structure et l'évolution de la croûte terrestre et des zones orogéniques. L'histoire de l'évolution de ces idées pendant le siècle passé et présent est tracé. L'importance de la connaissance de la tectonique des plaques est démontré par l'exemple d'une analyse des Alpes Orientales et des chaînes méditerranéennes.