Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 124 (1944)

Artikel: Die Gebirgsbildung im Rahmen der Erdgeschichte

Autor: Staub, Rudolf

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90442

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 31.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Gebirgsbildung im Rahmen der Erdgeschichte

Von

RUDOLF STAUB, Zürich

Die Gebirgsbildung, wie die Gebirge selber ein uraltes, von tausend Geheimnissen umwobenes Rätsel dem menschlichen Geiste, blieb unverständlich bis in die jüngste Zeit hinein. Sie ist aber mehr und mehr zu einem zentralen Grundproblem der gesamten Erdgeschichte geworden; zu einem fundamentalen Hauptphänomen in der Entwicklung unseres Planeten, das, faszinierend und aufregend zugleich, seinesgleichen an Bedeutung nicht mehr hat. Das wegweisend geblieben ist für den äusseren Grundplan unserer Erde, von dessen Erlöschen als selbstleuchtender Stern bis zum heutigen Tag. So wie die Gebirge heute das Rückgrat der Festländer bilden und die Wasser der Kontinente, deren Wohnräume und damit deren Völker und ihre Schicksale scheiden, über die ganze Erde hinweg, so steht auch die Bildung der Gebirge in allerengster Verbindung mit der Geschichte des Planeten schlechthin.

Die Frage nach der Entstehung der Gebirge hat den denkenden Menschen naturgemäss schon seit langem in ihren Bann gezogen; aber erst die moderne Naturforschung der letzten 150 Jahre ist einer Lösung des Gebirgsbildungsproblems etwas näher gekommen. Die Hauptetappen der Erkenntnis des vergangenen Jahrhunderts sind bekannt : Einer ersten Epoche, befangen in der Vorstellung von vulkanischen Hebungen in den Gebirgen, von einer höchst aktiven Rolle des feurigflüssigen Erdinnern, des Magmas, verbunden mit Verstellung der Gesteinskomplexe an Brüchen und Spalten, folgte, mit SAUSSURE und ELIE DE BEAUMONT, mit ALBERT HEIM und EDUARD SÜESS an der Spitze, eine zweite; mit scharfer Negierung jeder aktiven Rolle des Magmas, mit der Erkenntnis vom Primat der horizontalen Zusammenschübe in der Erdrinde,

mit der Deutung der Gebirgszonen als *Faltungsstreifen* der festen Kruste, entstanden durch eine allgemeine Schrumpfung der an sich steif erscheinenden Gesteinsschale der Erde über einem noch flüssig gedachten und damit schwindbaren, infolge fortdauernder Abkühlung weiter sich kontrahierenden Erdkern. Die Kontraktionstheorie folgt der Ansicht des aktiven Aufblähens der Kruste durch vulkanische Vorgänge. Die Faltung als Schrumpfungsergebnis der Erdkruste wurde zum Hauptphänomen in der Architektonik und zur Hauptursache bei der Bildung der Gebirge. Der Anschauung der vulkanischen Erhebungstheorie, in unserem Lande hervorragend vertreten vor allem durch Bernhard Studer, folgte die Grundthese der *Kontraktionstheorie,* die als feststehendes Dogma der Geologie gelten sollte bis in unsere Tage hinein.

Aber die Erforschung der Alpen brachte ungeahnte Weiterungen in dieses bis um die Jahrhundertwende fast unerschütterte Bild von der Schrumpfung der Kruste als Ursache aller Gebirgsbildung. Weit überliegende Falten, wie vor allem die Glarner Doppelfalte, wo die alten Gesteine der Gewölbekerne über grosse Strecken die jungen Gesteine der vorliegenden Muldenzonen überdecken, sogenannte Deckfalten, Plis couchés, wurden vor allem in unserem Lande bekannt. Deckenförmige Überlagerung jüngerer Gesteine durch weit ältere, im übrigen schon erkannt durch Bernhard Studer in den Gebirgen um Parpan und in der Grevasalvaskette, erschien immer mehr als ein Hauptzug des alpinen Baues. Aus den zunächst — mühselig genug — erkannten Deckfalten entwickelten sich mit dem Fortgang der Forschung die eigentlichen Gesteinsdecken, deren Material durch weitreichende Überfaltung oder Überschiebung vom Ort seiner Bildung über grosse Distanzen hinweg in seine jetzige Lage im Gebirge gebracht worden war. Der Auffassung der Gebirge vom Typus der Alpen als eines relativ einfachen Faltenstranges folgte die grundlegende Erkenntnis vom *Deckenbau* der Gebirge. Zunächst erschien solcher Decken-, solcher Überschiebungsbau, als eine seltene Ausnahme, beschränkt auf einige dafür besonders geeignete Teilgebiete der Alpen; aber bald erlangte diese neue Auffassung, als sogenannte *Deckentheorie,* unter dem Gewicht der Tatsachen allgemeine Anerkennung. Marcel Bertrand, Hans Schardt, Maurice Lugeon, Pierre Termier, Gustav Steinmann, Victor Uhlig, Emile Argand sind ihre klassischen Vorkämpfer gewesen. Das erste Viertel dieses Jahrhunderts brachte

deren endgültige Festigung; zunächst innerhalb der Alpen selber, dann aber auch weitherum in anderen alpinen und sogar voralpinen Gebirgen der Erde. So sind heute als Deckengebirge neben den Alpen anerkannt: der Apennin mit Korsika, die betische Kordillere, das Rif, die Karpathen, die dinarischen und hellenischen Gebirge des Balkans, grosse Teile der herzynischen Ketten Mitteleuropas, die alten kaledonischen Gebirge Schottlands und Skandinaviens, in Asien neben Taurus und dem Hochland von Pamir vor allem das Himalajasystem, die Ketten Sumatras, Borneos, Timors und viele andere.

Die Erkenntnis der grossen alpinen Decken aber brachte als wichtiges allgemeines Ergebnis die Lösung von der starren Verbindung der Kruste mit dem tieferen Untergrund, denn die gewaltigen horizontalen Verschiebungen in den Deckengebirgen der Erde, jeden Raumes und jeder Zeit, verlangten eine ungeheure freie *Eigenbeweglichkeit* der Kruste.

Eines der Hauptergebnisse unserer Alpengeologie aus den letzten dreissig Jahren ist die Erkenntnis eines stark gehäuften Deckenbaues unserer europäischen Zentralgebirge, und zwar nicht nur in den Alpen selber, sondern weithin durch die Ketten des Mittelmeeres, vom Eisernen Tor bis an die Strasse von Gibraltar. Diese Häufung relativ dünner Schubdecken aber konnte nur verständlich gemacht werden durch weitgehende Mitbewegung der den Gebirgsstrang beidseits umgebenden Krustenteile, d. h. der bisher als fest im Raum verankert erschienenen sogenannten Vor- und Rückländer der grossen Kontinente. Dieselben konnten angesichts dieses Gebirgsbaues unmöglich einfach ruhig an Ort und Stelle unverrückt gestanden haben, sie mussten im Gegenteil notwendigerweise, als zwar in sich weitgehend starre Schollen, in beträchtlichem Masse gegeneinander vorgerückt sein, um den zwischenliegenden alpinen Raum als einen Streifen relativer mechanischer Schwäche zu dem grossartigen Überschiebungsbau zusammenzustossen, der effektiv heute in den alpinen Gebirgen erkennbar ist.

Damit aber gelangen wir von der eigentlichen Dislokation der Kruste im Gebirge selber zur Dislokation, d. h. zur Bewegung der die Gebirge umrahmenden Kontinentalteile, d. h. zur Bewegung der Kontinente selber. *Ohne kontinentale Verschiebungen keine wesentliche Gebirgsbildung,* das wurde immer mehr die grund-

legende These im Anschluss an die Erkenntnisse der Deckenlehre. Gegenüber und zwischen den aktiv stossenden starren Schollen der Kontinente erschienen damit *die Gebirge als zusammengestossene Schwächezonen* der Erdrinde. *Die Gebirgsbildung wurde im wesentlichen immer mehr als eine Folge mächtiger Wanderungen der kontinentalen Blöcke erkannt,* und damit erst wurde jede Gebirgsbildung zu einem erdgeschichtlichen Vorgang allerersten Ranges.

Alfred Wegener hatte erstmals die amerikanischen Anden als riesige Stauungswülste der westlichen Kontinentalränder der Neuen Welt an einer starren pazifischen Masse gedeutet, hervorgerufen durch eine mächtige Westbewegung der beiden Amerika und ein damit verbundenes Abdriften derselben vom Block der Alten Welt. Aus einer weitgehenden Konformität des heutigen Küstenverlaufes beidseits des Atlantischen Ozeans hatte Wegener dieses Abtreiben der amerikanischen Festlandsblöcke gegen Westen hin abgeleitet. Diese konkrete Auffassung als solche ist heute nicht mehr haltbar, aber die Mobilität der Kontinente, die Wegener damit bereits 1911 in voller Schärfe postuliert und nachzuweisen geglaubt hatte, besteht effektiv in vollem Umfang zu Recht. Sie ist vor allem gerade durch die Alpengeologie und ihre weiteren Ergebnisse in anderen Gebirgen heute sichergestellt. Argand und ich haben sie zu gleicher Zeit, vor 20 Jahren, in aller Schärfe postuliert.

Mit dieser neuen Auffassung der Gebirgsbildung als einer einfachen und logischen Folge kontinentaler Massenverschiebungen wachsen aber die Grundprobleme um die Gebirgsbildung nur um so mehr. Was sind die Ursachen dieser gewaltigen Krustenbewegungen, was sind die Gründe für das Vorhandensein einer labilen Schwächezone zwischen den aktiv eine solche zum Gebirge zusammenstossenden starren Rindenschollen ? Auf blosse « Kontraktion » der Erde im Sinne der alten Erklärung der Faltengebirge, d. h. auf blosse Schrumpfung der Erdrinde, konnten diese Bewegungen nicht mehr zurückgeführt werden. Man musste sie vielmehr auffassen als mächtige Eigenbewegungen der kontinentalen Blöcke, hervorgerufen im wesentlichen durch andere Kräfte als die der Kontraktion. Die zentrifugalen Impulse der rotierenden Erde, mit einer Flucht der Massen von den Polen gegen den Äquator, verbunden mit mächtigen Strömungen im magmatischen

Untergrund der Kruste, wurden zur Erklärung herangezogen; eine fortdauernde Kontraktion dabei zwar nicht völlig in Abrede gestellt, aber doch stark in den Hintergrund gedrängt. Waren bis zu diesem Zeitpunkt die eigentlichen Gebirgstürmungen das grösste tektonische Phänomen der Erde gewesen, so wurden es nun die Wanderungen der Kontinentalblöcke. Sie regierten das Schicksal der Erde, sie deformierten die Gründe der Meere und liessen neue Festländer aus denselben aufsteigen, mit Gebirgen von weltumspannendem Ausmass. Sie liessen aber auch weite Strecken alten Festlandes stets wieder neu vom Meere überfluten und damit den uralt bekannten und immer neu wieder einsetzenden Wechsel von Land und Meer in der Erdgeschichte beherrschen. Sie regierten damit im höchsten Masse aber auch das Schicksal des irdischen Lebens, wirkten zu gewissen Zeiten als regelrechte Katastrophen in der Entwicklung der organischen Welt. Sie vertrieben oder vernichteten, durch die Deformation und das Emporsteigen weiter Meeresgründe zu festem Lande, die marine Lebewelt einer langen Evolutionsepoche, sie vertrieben oder vernichteten umgekehrt, durch Anregung der Überflutung alten Landes, auch das Leben der Kontinente. Sie änderten das Klima ungeheurer Landstriche durch die Bewegung des kontinentalen Untergrundes, und sie waren es, die weiter, durch tektonische Krustenschwächung in gewissen Gebieten, den Schmelzfluss der Tiefen aktiv werden liessen, den Vulkanismus neu belebten, neue Strömungen im magmatischen Untergrund auslösten, und damit abermals, als natürliche Konsequenz, neuerliche Bewegungen der festen Schollen. *So wird die Verschiebung der starren Blöcke der Kontinente heute zum Grundphänomen der Erdgeschichte überhaupt.*

* * *

Die Frage, wie im einzelnen solche gewaltige Krustenbewegungen, und damit auch die Gebirgsbildung als blosse Folgeerscheinung derselben, möglich werden, soll uns heute näher beschäftigen.

Sicher ist die absolut aktive Rolle der starren Schollen, sicher auch die durchaus passive der labilen Zonen der späteren Gebirge. Die labile Zone ist, von einem gewissen Entwicklungsstadium an, die sogenannte « Geosynklinale », d. h. jene grosse Mulde, in der die Sedimente des späteren Gebirges zur Ablagerung kamen. Noch

Argand hat sich, bis 1924, die Geosynklinale als aktiv sich kontrahierend vorgestellt und die Bewegung der starren Schollen auf diese Geosynklinale hin mit der Schrumpfung der Kruste in der Geosynklinale selber in Zusammenhang gebracht. Emile Haug u. a. hatten die Deformation dieser Geosynklinale als Anfangsstadium der Gebirgsfaltung sogar mit einer Expansion der Kruste, hervorgerufen durch Versenkung derselben in grössere Tiefen und damit Dilatation in Bereichen höherer Temperatur, in Zusammenhang gebracht, und auf diese Eigenfaltung der Geosynklinale ist sogar der Deckenbau alpinen Typs zurückgeführt worden.

Heute ist die Faltung als primärer Vorgang bei der Gebirgsbildung aber weitgehend in den Hintergrund getreten. Das Primäre bei der Deformation der Geosynklinale sind, nach ganz kurzer, fast ephemerer Grossverbiegung derselben, die unter dem Seitendruck der die Geosynklinale beidseits begrenzenden starren Schollen einsetzenden reinen *Überschiebungsphänomene*, Überschiebungsphänomene, die sich dann stetig steigern bis zum Zusammenschub des fertigen Gebirges; und was an Faltung, zwar genug noch, in den grossen Gebirgen der Erde erscheint, bedeutet lediglich Stauung in den Überschiebungsmassen selber, an deren Front oder in deren Untergrund. An Stelle der Faltung tritt so heute als tektonisches Hauptphänomen, und zwar bis hinab in den mikroskopischen Bereich der Gesteinsumformung, die Gleitung, d. h. die freie Bewegung der Massen in der Horizontalen. *Gleitung und Überschiebung,* ausgelöst vor allem an Grenzflächen im heterogenen Untergrund der Geosynklinalen und der benachbarten starren Schollen, und zwar, wie wiederum gerade der Bau der alpinen Gebirge zeigt, Übereinandergleiten von im Vergleich zu den kontinentalen Massen nur sehr dünnen Gesteinskomplexen. Dies aber in einer Intensität, die oft jeder Beschreibung spottet — man betrachte dazu nur die neue geologische Karte der Berninagruppe — und die abermals erst in neuester Zeit in ihrer wahren Grösse erkannt worden ist : In den grandiosen Schürfzonen an der Basis der grossen Überschiebungen einerseits, in der weitgehenden Zerlegung grosser Hauptschubmassen in viele Einzelschollen, bar jeden Faltenursprungs, anderseits.

Dass derartige Zusammenschübe nur bei sehr weitgehender Schwäche, d. h. relativ *ganz geringer Dicke des geosynklinalen Rindenstreifens* möglich sind, ist abermals klar. Eine Deformation

mächtigerer Rindenschollen, d. h. etwa der kontinentalen Massen, nach dem Typus des alpinen Deckenbaues, ist mechanisch wohl absolut ausgeschlossen. *Es muss also die Geosynklinale als Geburtsstätte der späteren Gebirge effektiv ein Streifen weit geringerer Krustendicke zwischen den mächtigen Gesteinsblöcken der kontinentalen Massen sein,* ein Postulat, das mit einer ganzen Reihe typisch geosynklinaler Eigenschaften in Einklang steht, von der leichten Verbiegbarkeit und den Erscheinungen der geosynklinalen Metamorphose bis zur Förderung der geosynklinalen Magmen bei der Intrusion der Ophiolithe.

Aber die « Rolle der Faltung » bei der Ausbildung der gewaltigen alpinen Plis couchés, der Deckfalten, und die « verkehrten Serien » an der Basis derselben, die alten « Mittelschenkel » ? Da kann gesagt werden : Es gibt heute nur noch sehr wenige derselben, und was noch vor 10 und 20 Jahren unbedenklich als riesige Übertreibung reiner Faltung gedeutet wurde, die penninischen Decken etwa, vor allem die Dent Blanche oder die Zonen des Grossen St. Bernhard und des Monte Rosa, zeigt heute klar scharfen Überschiebungsbau, Fehlen jeglicher verkehrten Serie, Überschiebung auf glatter Bruchfläche, mit Lösung jeglichen Zusammenhanges und Aufsplitterung in viele Einzelschollen. Und dies von den klassischen Decken der Glarner Alpen bis in die obersten ostalpinen Stockwerke des alpinen Deckengebäudes hinauf. Alle Faltung in diesen Gebieten bedeutet effektiv nur sekundäre Stauchung der Überschiebungsmassen in sich selbst und an deren Umgebung. *Die Überschiebungen sind heute das Hauptphänomen, gegenüber dem alle Faltung in den Hintergrund tritt.* Ein neuer Mechanismus der Gebirgsbildung wird damit offenbar, irgendwie leichter, verständlicher, natürlicher als der alte, blosse Verbiegungsmechanismus.

Auf einen weiteren Punkt haben wir hinzuweisen. Nicht nur die Schwächezonen der Geosynklinalen, sondern auch die aktiv treibenden Kontinentalschollen selber werden bei diesen und durch diese Bewegungen deformiert. Die grossen Krustenblöcke der Kontinente zersplittern zwar bei diesen Wanderungen in erster Linie, mächtige Bruchsysteme — vom Typus des Roten Meeres etwa — entstehen bei diesen gewaltigen Ferntransporten in der Erdkruste, und in deren Gefolge grossartige Vulkanreihen. Die kontinentalen Blöcke werden auf ihrer säkularen Reise durch den

Raum aber auch schwach verbogen zu Grossfalten, sie stauen sich irgendwo an ihrer Front oder am Untergrund. Sie können so, wie etwa der asiatische Koloss, selbst weitgehende Drehungen erfahren, an Hindernissen, die sie auf ihrem Wege treffen. Im Zusammenprall zweier Schollen entstehen, an Stelle der alten Schwächezonen der Geosynklinalen, die Hauptgebirge einer Epoche; aber auch im Innern der Kontinentalschollen fehlt es keineswegs an sekundären Schwächezonen, die ihrerseits gleichfalls zusammengestossen werden. Diese *intrakontinentale Gebirgsbildung* zeigt aber einen ganz anderen Typ der Krustendeformation, einen Stil, der unendlich viel steifer, in seinen Bewegungen ungleich gehemmter ist und der damit nur Gebirge mit viel schwächerem Zusammenschub der Kruste erzeugt. Im Raume der alpinen Ketten des Mittelmeeres entstehen so neben den komplizierten Geosynklinalgebirgen des mediterranen Zentralstranges vom Typus der Alpen die weit einfacheren Gebirge vom Typ der Pyrenäen, des Jura oder des Atlas-Systems.

Es sind somit *zwei Grundtypen von Gebirgen* scharf voneinander zu unterscheiden, die aber beide zurückgehen auf die gleiche Grundursache, nämlich auf die Bewegung der kontinentalen Schollen. Im einen Falle wird die Schwächezone einer Geosynklinale zusammengestossen und entsteht ein kompliziertes Geosynklinalgebirge. Im andern Fall reagiert der kontinentale Sockel selber an irgendeiner sekundären Schwächezone im kontinentalen Raum mit nur sekundärem Zusammenschub, es kommt dort zur Deformation auch der starren Zonen selber, d. h. der weiten Vor- und Rückländer der alten geosynklinalen Zone. Geosynklinalgebirge, Vor- und Rücklandgebirge gehen damit alle auf die gleichen Schollenbewegungen zurück, die den Gang der kontinentalen Verschiebungen beherrschen, und *die Deformation der Vorländer und der Rückländer ist damit nicht zu trennen von jener der Geosynklinale.* Mit « Plis de fonds » und « Vorlandfaltung », mit « Chaînes neuves » und « Geosynklinalgebirgen » haben ARGAND und ich vor 20 Jahren auf diese Zusammenhänge übereinstimmend hingewiesen. *Alles Relief auf der Erde geht somit letzten Endes auf gebirgsbildende, d. h. im weiteren schollenverschiebende Kräfte zurück.*

Damit ist die Stellung der Gebirgsbildung im Rahmen der Erdgeschichte in räumlicher Beziehung umrissen. *Die sogenannten*

gebirgsbildenden Bewegungen umfassen nicht nur den relativ engbegrenzten Raum der schmalen Kettengürtel der Erde, sondern die ganze Kruste, mit allen Festlandsblöcken, mit allen Meeresgründen. Die Gebirgsbildung selber, d. h. die eigentliche *Türmung der Kettengebirge,* ist nur ein besonders auffälliger *Teileffekt* von Bewegungen, die den ganzen Erdball, zum mindesten aber den ganzen Steinmantel des Planeten, unsere Lithosphäre umfassen. Diese Bewegungen der Lithosphäre aber sind auf das engste verkuppelt mit solchen des tieferen, d. h. des magmatischen Untergrundes.

* * *

Betrachten wir dazu nun auch die *zeitlichen Ausmasse einer Gebirgsbildung,* ihre zeitliche Stellung in der Erdgeschichte. Auch da sind wiederum die Ergebnisse der modernen Alpengeologie für die Erkenntnis leitend geworden, und auch hier ist wiederum Emile Argand in erster Linie es gewesen, der den Weg uns vorgezeichnet hat, wenn auch manches von seinen Thesen, die er vor bald 30 Jahren über Bau und Entstehung der Westalpen aufstellte, heute unter dem Gewicht neuer Tatsachen modifiziert werden muss. Hatte man früher die Gebirgsbildung als ein zeitlich eng umgrenztes Geschehen von nur ganz kurzer Dauer, als eine kleine Episode nur im Rahmen der Erdgeschichte aufgefasst, so brachte die Erforschung des Wallis durch Emile Argand, zum mindesten für jenes penninische Segment der Alpen, grundlegende Änderungen. Argand hat 1915 an der Versammlung unserer Naturforschenden Gesellschaft in Genf erstmals darauf hingewiesen, dass die Verteilung der Fazies im penninischen Sedimentationsraum eine derartige sei, dass daraus unbedingt auf eine *lange tektonische Entwicklung* dieses Alpensektors geschlossen werden müsse, dass embryonale Phasen der Alpenfaltung sich schon durch das ganze Mesozoikum geltend gemacht hätten, dass die gebirgsbildenden Bewegungen, die schliesslich zur Türmung der alpinen Ketten führten, schon seit dem Ende der vorletzten Bewegungsphase der Erdgeschichte, d. h. seit der herzynischen Faltung, tätig gewesen seien. Der Vorgang der Gebirgsbildung wurde damit zum erstenmal statt einer relativ kurzfristigen, bis zu einem gewissen Sinne fast katastrophal wirkenden Episode als ein Phänomen hingestellt, das sich *über ganze erdgeschichtliche Epochen verteilt,* das lang-

sam, fast zögernd nur, beginnt, sich stetig entwickelt und schliesslich mit der eigentlichen Gebirgstürmung endet. Den Nachweis aber geleistet zu haben, dass es sich dabei nicht bloss um geniale Deutungen relativ lokaler Walliser Phänomene handelt, sondern dass effektiv für die ganzen Alpen, im besondern auch für die östlichen, die Auffassung Argands von einer langen Vorbereitung der Gebirgsbildung im Prinzip wirklich zutrifft, das ist in erster Linie ein Verdienst der bündnerischen Alpengeologie geworden, deren naturgegebene Aufgabe es ja seit alter Zeit war und auch heute noch ist, die Fäden der Verbindung zu knüpfen zwischen den bis in unsere Tage so verschiedenen Deutungen unterworfenen Gebirgen der West- und der Ostalpen. Die Geologie des Engadins aber hat an der Herstellung dieser wichtigen Verbindung ihren ganz besonderen Anteil. Dass in der Folge solche Vorbereitungsphasen der Gebirgsbildung an Hand vertiefter tektonischer und stratigraphischer Analyse auch in andern Deckengebirgen Europas, im Apennin, auf Korsika, in der betischen Kordillere Spaniens, nachgewiesen werden konnten, sei in diesem Zusammenhang weiter bemerkt.

So steht nunmehr seit gegen 30 Jahren zur Genüge fest, dass die Vorgänge der alpinen Gebirgsbildung beginnen mit ausgedehnten Embryonalphasen während des früheren Mesozoikums, dass sie in stetiger Entwicklung sich steigern bis zu einem wahren Paroxysmus der Bewegung im älteren Tertiär, dass sie dann in einem letzten Akt, mit gewaltigen Erosionszyklen, die erst das eigentliche Gebirgsland als solches entstehen lassen, langsam ausklingen zur Zeit der Molasse und im Quartär. Dabei ist wohl im Prinzip das Argandsche Bild von der Entstehung der Westalpen geblieben, im einzelnen aber zeigen sich wesentlich neue Züge, die auf weiterer Vertiefung der Beobachtungen während der letzten 20 Jahre fussen.

* * *

Die alpinen Bewegungen beginnen nicht, wie Argand und auch ich seinerzeit angenommen hatten, schon im oberen Paläozoikum oder dann vor allem in der Trias, sondern erst zu Beginn der Jurazeit. *Sie setzen somit nicht einfach und kontinuierlich die Arbeit des herzynischen Bewegungszyklus fort,* sondern *sind von demselben durch eine lange Zeit wenigstens äusserer Ruhe, wäh-*

rend der ganzen Perm- und Triasepoche, getrennt. Was geschieht aber in dieser Zeit äusserer Ruhe im heutigen alpinen Raum ?

Der alpine Gesamtraum, heute über weite Strecken gegliedert in helvetische, penninische, ost- und südalpine Zone, zeigt einen ausserordentlich *heterogenen älteren Untergrund.* Neben der letzten voralpinen Gebirgsbildung, d. h. der herzynischen, haben weit *ältere Bewegungsphasen im alpinen Grundgebirge* ihre Spuren hinterlassen und in demselben ein überaus bunt zusammengesetztes Mosaik erzeugt. Über einer tieferen, kräftig metamorphen Kristallinserie vom Typus der alten Gneisse und ihrer Schieferhülle, der sogenannten Zentralgneisse der penninischen Zone z. B. oder des Silvrettakristallins oder den älteren Gneissen der Zentralmassive, erkennen wir fast überall, gleichviel ob konkordant oder diskordant dazu, eine höhere, weit jüngere Gesellschaft kristalliner Schiefer, mit weit geringerer Metamorphose als die tiefere Grundserie, das ist die Gruppe der sogenannten Casannaschiefer oder der Quarzphyllite. Dieselben bilden in den nördlichen Ostalpen und in der karnischen Kette die direkte Basis des Alt-Paläozoikums, d. h. des tieferen Silurs. Die Casannaschiefergruppe der Alpen hat somit sehr wahrscheinlich, wenigstens in ihren tieferen Gliedern, vorpaläozoisches Alter; sie dürfte, verglichen mit dem übrigen europäischen Grundgebirge, am ehesten dem obersten Algonkium, d. h. im besonderen der sogenannten « Jotnischen Stufe » Nordeuropas entsprechen. Zwischen diese beiden Hauptserien des alpinen Grundgebirges aber schaltet sich, nicht überall, aber über weite Strecken und immer wieder in dieser Position erscheinend, und abermals teils diskordant, teils konkordant, eine merkwürdige Mittelgruppe ein, die besonders charakterisiert erscheint durch das im übrigen Grundgebirge nur seltene Vorkommen zahlreicher, zum Teil recht mächtiger Einschaltungen von Marmoren und eine sehr weitgehende Metamorphose derselben. Das sind die Serien der Valpelline- und der Fedozgesteine des Wallis und des Oberengadins, der Tonaleschiefer und der Laasermarmore der Ostalpen, nebst anderem mehr. Diese Mittelserie dürfte, zufolge ihrer Lage zwischen Casannaschiefergruppe und basalen Gneisskomplexen, am ehesten ein früh- bis mittelalgonkisches Alter haben und damit etwa den sogenannten « jatulischen » Serien Finnlands oder den moldanubischen Zonen Böhmens entsprechen. Die zonenweise Verteilung dieser Valpellinegesteine aber, und ihr ebenso zonen-

weises Fehlen, weist auf uralte Verbiegungen der Kruste vor der Bildung der vermutlich jotnischen Casannaschiefergruppe hin. Dieses ganze, schon vorpaläozoisch so komplexe Grundgebirge der alpinen Zone wurde aber in seiner stratigraphischen Gesamtheit noch zum mindesten von einer weiteren grossen, jüngeren Bewegungsphase der voralpinen Zeiten, d. h. der herzynischen, ergriffen und dabei so differenziert, dass im heutigen alpinen Unterbau nunmehr herzynisch stark gefaltete und herzynisch kaum bewegte Zonen miteinander abwechseln. Dazu kommen noch die mannigfachen Intrusionen jüngerer Eruptivgesteine, im besondern der herzynischen Phase der Erdgeschichte, aber auch frühere, die das Mosaik des alpinen Grundgebirges abermals komplizieren. Auf jeden Fall sind, und zwar im Gegensatz zu bis vor kurzem im Kurs stehenden Ansichten, herzynische Bewegungen und damit auch herzynische Eruptivgesteine heute nachgewiesen im ganzen helveschen, im ost- und südalpinen Bezirk, während in der dazwischenliegenden penninischen Zone diese Bewegungen sich auf einzelne schmale Sonderstreifen beschränkten, besonders auf den zentralen Zug des Briançonnais, wo sich bezeichnenderweise auch die herzynischen Eruptivmassen in den berühmten Besimauditen und Roffnagesteinen wiederfinden.

Tatsache bleibt auf jeden Fall, dass *nach dem Abschluss des Paläozoikums der alpine Raum in seinem kristallinen Unterbau eine ungeheure Heterogenität aufwies,* eine Heterogenität, die nun *grundlegend werden musste für den weiteren Ablauf des alpinen Geschehens* und damit auch für das, was man gemeinhin die Alpenfaltung nennt. Der zuletzt durch die herzynischen Bewegungen zusammengeschobene, damit verdickte und daher weitgehend mechanisch versteifte Grundgebirgsblock des späteren alpinen Raumes konnte aber unmöglich als solcher, d. h. in seinem damaligen Zustande, zu dem grossen Überschiebungsbau deformiert werden, den die Alpen effektiv aufweisen; erkennen wir doch gerade am Beispiel der autochthonen Zentralmassive vom Typus des Mont Blanc oder des Pelvoux oder des Aarmassivs, wie wenig der alpine Schub diesen Grundgebirgsblöcken noch anzuhaben vermochte. Der eigentliche Überschiebungsbau der Alpen aber, der in der alpinen Zentralzone mesozoische Sedimente und altes Grundgebirge mit herzynischen und älteren Bruchstücken im gleichen ungeheuerlichen Masse erfasst hat, ist nur vorstellbar, wenn wir

nach der herzynischen Bewegungsphase eine *weitgehende Reduktion der Krustendicke* im alpinen Raum annehmen, d. h. eine *sehr weitgehende Verdünnung der Lithosphäre.* Eine solche Krustenreduktion ihrerseits aber wird nur verständlich durch das Mittel grossartiger und weitreichender *Aufschmelzung der Kruste durch die magmatischen Massen der Tiefe.* Eine solche haben wir heute anzunehmen für die Zeit zwischen dem Abschluss des herzynischen und dem Beginn des alpinen Zusammenschubes.

* * *

Eine solche *Krustenaufschmelzung* erklärt sehr vieles: zunächst den Bereitschaftsgrad für die enormen Zusammenschübe des alpinen Raumes in alpiner Zeit und die Intensität des alpinen Überschiebungsbaues schlechthin. Dann aber auch verschiedene Grundfaktoren der alpinen Geosynklinale, vor allem die Förderung der schwach differenzierten ophiolithischen Magmen ausschliesslich in derselben, die Durchtränkung der Geosynklinale mit den der magmatischen Tiefe entströmenden Mineralisatoren, verbunden mit der Eigenmetamorphose der geosynklinalen Sedimente. Die Reduktion der Kruste durch das Mittel subkrustaler Aufschmelzung beherrscht aber auch die eigentliche *Entstehung des geosynklinalen Troges* an und für sich, vor allem das *Einsinken eines relativ schmalen Krustenstreifens* zu einer wirklichen Gross*mulde.* Denn durch die geforderte Krustenaufschmelzung gelangt schwereres basisches Material der irdischen Tiefen in relativ höheres Niveau hinauf; der Querschnitt der schweren Massen der Tiefe ist somit im Gebiet solcher Krustenaufschmelzungen ganz naturgemäss wesentlich grösser als nebenan, infolgedessen wird sich in solchen Aufschmelzgebieten automatisch eine gewisse Überschwere einstellen, in deren Gefolge der darüberliegende Raum gegenüber den Nachbargebieten einsinkt und damit erst zu jenem weiten *Troge* wird, der vom Meere erfüllt werden kann und erst damit eine wirkliche *Geosynklinale* entstehen lässt. *Aufschmelzung bedingt Krustenreduktion, sukzessive Aufschmelzung ein stetes, infolge der Trägheit der Massen wohl ruckartig vor sich gehendes Nachsinken der Kruste nach isostatischen Gesetzen, und damit endlich umfassende Transgressionen der Meere nach langen Festlandzeiten.* Durch diese sukzessive Aufschmelzung aber wird schliesslich auch die Kruste selbst derart *geschwächt,* dass sie

erneut mit einer gewissen Leichtigkeit auf *Zusammenschub* zwischen starreren, mächtigeren Schollen, d. h. gewissermassen stehengebliebenen, von der Krustenaufschmelzung verschonten mächtigeren Rindenteilen reagieren kann. Das aber heisst weiter: *Die Geosynklinale wird ganz automatisch nach einer gewissen Zeit,* aber *erst nach einer bedeutenden Phase sukzessiver Senkung und damit verbundener Sediment-Akkumulation, sich in Wellen werfen,* wie ein dünnes Blech zwischen dicken, gegeneinder bewegten Stahlplatten, *und die Geosynklinale kann nun, aber erst jetzt, von den Seiten her zusammengestossen werden zu Gewölben, den Geantiklinalen, und zu Mulden, den Teilträgen.* Mit diesem Zusammenschub des geosynklinalen Raumes zu dem bekannten System von Grossfalten beginnt so bereits eine zweite Phase in der Geschichte einer Geosynklinale, aber *hier* erst stehen wir am Beginn des eigentlichen orogenetischen Zyklus, d. h. am Anfang der Gebirgsbildung einer bestimmten Epoche.

* * *

Die *erste Phase* der eigentlichen Geosynklinal*bildung* und deren *erste Entwicklung zum grossen Trog* geht zurück auf sukzessive *Schwächung der Kruste durch das Mittel subkrustaler Aufschmelzung.* Im alpinen Zyklus umfasst diese erste Phase das Perm und die Trias. Die mächtige Sedimentanhäufung derselben vermag die Schwächung der Kruste keineswegs aufzuheben, sonst würde nicht am Schluss der Triaszeit diese Kruste schon soweit deformabel sein, dass nunmehr die Differenzierung des geosynklinalen Primärtroges durch sukzessiven Zusammenschub desselben erfolgen kann. Dass ein solcher Zusammenschub nicht vorher erfolgte, wenigstens nicht in grösserem Ausmass, das zeigt klar die Sedimentationsgeschichte der ostalpinen und der benachbarten penninischen Bereiche. Senkung im Gefolge subkrustaler Aufschmelzvorgänge, immer wieder verbunden mit kräftigem Vulkanismus, vom Perm bis in die Raiblerzeit hinauf, mit ausgedehnter seismischer Tätigkeit im Gefolge der Senkungsvorgänge, illustriert durch ein auffallendes Hervortreten der sogenannten Primärbreccien in der Trias, aber keine wesentlichen Differenzierungen des Gesamttroges in deutliche Einzelschwellen und Einzelrinnen.

Es folgt, wohl meist schon im Rhät beginnend, die *zweite Phase* der Geosynklinalgeschichte, d. h. der *Zusammenstau* der-

selben zwischen neu sich nähernden starren Schollen, und damit erst jene starke *Verbiegung des geosynklinalen Gesamttroges,* der zu einer *Differenzierung* desselben in enger umgrenzte *Sonderschwellen,* die sogenannten Geantiklinalen, und die *Sonderrinnen* der Teiltröge führt. Aber diese Geantiklinalen entstehen nun nicht irgendwo beliebig im geosynklinalen Gesamtraum, sie entstehen auch nicht in gesetzmässigen, rein mechanisch resp. statisch bedingten Distanzen von den Rändern der schiebenden Blöcke, sondern sie entstehen *als flache Grossgewölbe dort,* wo in der geschwächten, durch subkrustale Aufschmelzung genügend verdünnten Lithosphäre schon vorher *Diskontinuitätsflächen* vorhanden sind, d. h. Gesteinsgrenzen, alte Schubflächen, Bruchsysteme, oder auch einfach dort, wo Gebiete verschiedener Steifheit mit verschiedenartigem Gesteinsinhalt aneinandergrenzen. Dort entstehen, infolge der durch den Horizontalschub in der Kruste erweckten Spannungen, neue Gleitflächen oder ganze Scharen von solchen, und längs solchen *Gleitflächen,* die nur zu oft einfach *auf bestehenden alten Grenzflächen sich nur mehr weiter ausbilden,* dort steigt das gegen das stossende Rückland der Geosynklinale hin gelegene Rindenstück langsam in die Höhe, d. h. gegen den geringen Widerstand der Atmosphäre und der Hydrosphäre hin, dabei nur den jungen Sedimentmantel, vor allem die eben abgelagerte Trias, samt dem Perm, über sich aufwölbend zu einem jungen, grossradigen Gewölbe. Dieses Gewölbe, die eigentliche Ge-« Antiklinale », ist wohl in den Sedimenten der betreffenden Region vorhanden. *In der Tiefe aber, d. h. im kristallinen Unterbau, rückt der Kern der geantiklinalen Schwelle, als meist sehr heterogene Basis derselben, an Bruch- und Gleitflächen vor, in Form einer glatten Überschiebung, aber auf uralt vorgezeichneter Überschiebungsbahn.* Im weiteren Verlauf der Vorbewegung des geantiklinalen Unterbaues bricht dann schon bald auch dessen Sedimentumhüllung, die eigentliche Grossantiklinale; sie wird vielleicht noch etwas unter die nunmehrige Front der sich langsam in Marsch setzenden Überschiebungsdecke eingerollt, aber schliesslich *überschiebt* eben doch der alte Kern *ohne jede Verkehrtserie* die vor ihm gelegenen jüngeren Sedimente der nächsten Trogtiefe. *So entstehen, aus längs alten Grenzflächen als neuen Gleitbahnen vorbewegten geantiklinalen Schwellen und deren Rücktiefen die eigentlichen Überschiebungsdecken vom alpinen*

Typ. Alte Grenzflächen im kristallinen Unterbau der Geosynklinale wachsen sich so aus zu den mächtigen Überschiebungsflächen der alpinen Decken. Gerade das Studium bündnerischer Profile hat abermals in erster Linie diesen Einblick in den eigentlichen Kernmechanismus der Geantiklinalen und der Deckenüberschiebungen enthüllt.

Die gleiche Rolle junger Bewegungsbahnen spielen diese alten Grenzflächen des kristallinen Unterbaues naturgemäss auch innerhalb der mächtigen Vor- und Rücklandblöcke. Aber hier ist es im Gegensatz zu den Geosynklinalgebieten eben *nicht* zu jener grossartigen Krustenreduktion durch das Mittel magmatischer Aufschmelzung gekommen, dass diese Kruste nun, wie in der Geosynklinale, als eine relativ dünne Haut mit grosser Leichtigkeit in sich zusammengestossen werden könnte, sondern hier ist diese Aufschmelzung unterblieben oder in ihren Anfängen wieder gestoppt worden; hier kam es somit zu keinem weitgehenden « Bergversatz » leichter Krustenteile durch schweres, subkrustales Material, und damit von Anfang an naturgemäss auch zu keinem wesentlichen, isostatisch bedingten Nachsinken der Kruste. Keine geosynklinalen Sedimentserien gelangten daher hier zum Absatz. So kam es zwar beim Zusammenschub der kontinentalen Platten wohl auch hier ohne weiteres zu einem Wiederaufleben alter Bewegungsbahnen an mehr oder weniger steil stehenden, weit älteren Grenzflächen, an denen Partien der Kruste gegeneinander verschoben werden konnten, aber, infolge zu grosser Krustendicke, nur in sehr bescheidener Art; so dass nur Gebirge mit ganz einfachem Bau als Folge dieser intrakontinentalen Bewegungen entstehen konnten. Dem Typus der Alpen steht so der weit einfachere Typus der Pyrenäen oder des Kaukasus gegenüber.

Im Prinzip gibt es hier wohl eine *kontinuierliche tektonische Reihe,* vom extremen Überschiebungsbau vom Typus der Alpen bis zu den einfachsten Vorlandgebirgen und schliesslich den grossradigen Verbiegungen der kontinentalen Platten. Denn *der Deformationsgrad eines Gebirgsstreifens erscheint uns heute in erster Linie abhängig von der Intensität der erlittenen Krustenreduktion.* Starke Aufschmelzung in der Geosynklinale, schwache oder nur zeitweise wirksame Aufschmelzung in den kontinentalen Schwächezonen, vom Typ des Pyrenäentroges etwa, keine Aufschmelzung unter den kontinentalen Platten. *Der Gebirgstyp, der entsteht, ist*

eine Funktion der Intensität der vorangegangenen Krustenreduktion durch magmatische Aufschmelzung, welche die Dicke der Kruste differenzierte und regulierte, die ihrerseits für den entstehenden Gebirgstyp leitend geworden ist.

Dass innerhalb der sich deformierenden Geosynklinalen schwach differenziertes Magma der Tiefen in Form der *Ophiolithe* ziemlich rasch längs den Gleitbahnen an der Basis der Geantiklinalkörper emporsteigt und sich in die vorliegenden Tiefentröge entleert, ist seit einiger Zeit schon bekannt. Gerade Bünden und Wallis lieferten auch dafür schon vor vielen Jahren erkannte klassische Beispiele. Aber dieses empordringende Magma der Ophiolithe erleichtert dank seiner hohen Beweglichkeit auch weithin die Eigenbewegung der Geantiklinalen selber, d. h. deren Auswachsen zu den grossen Überschiebungsdecken. Denn dass sich zwischen der Hauptintrusion der Ophiolithe und der Überschiebung grosser Deckenkomplexe auch auffallende zeitliche Übereinstimmungen ergeben, ist abermals bemerkenswert. Kontaktmetamorphose an oberjurassischen Radiolaritgesteinen einerseits, mächtige, etwa unterkretazische Schubphasen penninischer und ostalpiner Decken anderseits. Auf solche Art dürfen wir wohl annehmen, dass *ein guter Teil der grossen zentralalpinen Deckenüberschiebungen sich auf einer magmatisch geschmierten Gleitbahn, parallel der Intrusion ophiolithischer Magmen,* zusammen mit derselben, *vollzogen hat.* Und wenn diese Bewegungen später auch noch weiter andauerten, so dürfen wir doch wohl annehmen, dass, in der Tiefe der Gleitbahn zum mindesten, semimagmatische Zustände noch herrschten zu einer Zeit, wo in den vorliegenden Trögen die Spitzen dieser Magmaförderung schon längst erstarrt gewesen sind.

Der hier vorgetragene Mechanismus der Bildung der grossen Decken aber, der offenbar geworden ist beim Studium der näheren Beziehungen zwischen geantiklinalen Schwellen und dem alten Strukturwerk des kristallinen Unterbaues, ist nichts als eine natürliche Bestätigung der durch tektonische Analyse immer mehr in die Erscheinung tretenden Tatsache, *dass die grossen Decken nicht aus Falten, sondern aus Überschiebungen hervorgegangen sind,* dass es nur ganz wenige echte Deckfalten, in der Hauptsache aber *nur Überschiebungsdecken* im Sinne der *Nappes cassantes* Pierre Termiers und Hans Schardts gibt. Und wir wundern uns heute keineswegs, wenn dieser gewaltige Überschiebungsmechanismus

sich weiterhin auch kräftig äusserte an rein sekundären Diskontinuitätsflächen innerhalb der Deckenkörper selber und sogar innerhalb der vorgestossenen Schichtstösse, d. h. dass dieselben durch diese Vorgänge ganz naturgemäss noch weiter zerlegt wurden in mächtige Abscherungssysteme, in jene *Abscherungsdecken* als Decken zweiten Grades, auf die in neuerer Zeit Robert Helbling am Beispiel der Glarner Alpen in erster Linie aufmerksam gemacht hat.

Die *Rolle der magmatischen Tiefen* aber, die diese bei der Gebirgsbildung und damit den Krustenbewegungen überhaupt spielen, erscheint in neuem Lichte. Wohl gibt es heute keine aktive Hebung von Gebirgen durch empordrängendes Magma mehr, wohl werden, bis auf die jüngsten, sogenannten nachtektonischen Intrusivmassen vom Typus des Bergeller Massivs oder des Adamello, sämtliche Eruptivgesteine von der Gebirgsbildung passiv ergriffen und deformiert, als wären es Sedimente oder ältere Kristallinserien. Auch die Ophiolithe erleiden dies und bezeugen es durch ihre weitgehende Metamorphose und Tektonisierung, es sei nur an die grossartigen Faltenstrukturen etwa im Malencoserpentin erinnert. Aber daneben hebt sich heute eine *Mitbeteiligung der magmatischen Schmelzen an den grossen Krustenbewegungen* ab, die von weittragender Bedeutung ist. Die Rolle der magmatischen Vorgänge bei der *Bildung einer Geosynklinale,* die überhaupt erst durch magmatische Aufschmelzung der festen Kruste möglich und verständlich wird, die *Präparierung der Kruste für die eigentliche Krustendeformation,* des weiteren die *Schmierung der Bewegungsvorgänge* durch die in den Gleitbahnen der grossen Deckenkörper vordringenden *ophiolithischen Magmen,* die die Beweglichkeit der Überschiebungsmassen weitgehend gefördert und sicher auch in ihrem Tempo *beschleunigt* hat, stehen heute ausser Zweifel. Daneben aber spielt die magmatische Zone der Erde bestimmt auch bei der *Auslösung* der grossen, alles andere treibenden *Verschiebungen der kontinentalen Massen* eine ausschlaggebende Rolle. Eine Rolle, die noch vor wenigen Jahren kaum in ihren vagen Umrissen erkennbar war; denn es ergeben sich heute Zusammenhänge zwischen dem Geschehen in der Lithosphäre und jenem in den magmatischen Tiefen, die zu den grossartigsten Erkenntnissen der Geologie zu zählen sind. Phänomene allerdings, die wir in ihren Grundlagen nur begreifen können, wenn wir das Gesichts-

feld weiten und tief in die Vergangenheit der Erde zurückforschen. Da offenbaren sich uns erst die wirklichen Grundkräfte, die alle Krustenbewegungen auf der Erde und damit auch jede Gebirgsbildung beherrschen und bedingen.

* * *

Sicher ist, dass eine äusserst heterogene Erdkruste von durchaus verschiedener Dicke *heute* existiert. Das beweisen unter anderem die Differenzen der Schwere, die wir über die ganze Erdoberfläche hinweg messbar feststellen können: Schwere-Überschuss, Schwere-Defizit, Normal-Schwere, und zwar nicht nur in absoluten Massen, sondern auch bezogen auf ein und dieselbe Niveaufläche der Erde, d. h. das Meeresniveau. Grössere Schwere bedeutet automatisch einen relativ grossen Radius der schweren, subkrustalen, magmatischen Massen und somit geringe Rindendicke, kleinere Schwere umgekehrt grössere Krustenmächtigkeit. Bei geringerer Rindendicke nun kühlt das Magma sich relativ rascher ab als unter den dicken, die Abkühlung verhindernden oder doch weitgehend verzögernden Krustenteilen. Es entsteht daselbst, zusammen mit den Anfängen einer magmatischen Differenziation, *ein Strom gekühlten Magmas gegen die heisse Tiefe,* ein Abstrom unter den dünnen Krusten der Geosynklinalen zum Beispiel, der aber sofort Magmenteile aus der Nachbarschaft in Bewegung gegen diesen Abstrom zur Tiefe setzt. Mächtige *Konvektionsströmungen* entstehen so, *Magma wird in grossen Massen gegen die Kühlzone unter den Geosynklinalen hingesaugt,* und es entsteht ein regelrechter Magmenstrom an der Basis der kontinentalen Blöcke, ein Strom, der die darüberliegende feste Kontinentalscholle weitgehend *mit sich fortträgt,* gegen die Zone der Geosynklinale hin. *Dieser sogenannte Geosynklinalstrom drängt somit die dicken Schollen unwiderstehlich gegen die dünnen Rindenstreifen der Geosynklinalen hin* und *schiebt dadurch dieselben, durch das Mittel der zur Bewegung getriebenen starren kontinentalen Schollen, in sich zusammen, zum Gebirgssystem.*

Damit aber tritt an die Stelle der dünnen Krustenteile der alten Geosynklinale ein mächtig gestauter Rindenwulst im nunmehrigen Gebirgssystem, und das Magma, das vorher relativ weit in die Höhe reichte, wird nun durch diesen, an die Stelle der alten Geosynklinalhaut getretenen, dicken Gesteinswulst *verdrängt.* Es

muss somit automatisch in andere Zonen abfliessen, abströmen, vor allem in die Zonen neben dem entstandenen Kettengürtel. Nach vorn, nach rückwärts, nach beiden Seiten hin. *Es entsteht so ganz naturgemäss nach jeder Gebirgsstauung ein Abstrom magmatischer Massen vom Gebirgsgürtel weg.* Damit ist nun aber eine gewisse *Zerrung* in der Rinde selber verbunden, die noch verstärkt wird durch die auch heute noch fortschreitende Kontraktion des Erdkörpers im Gefolge seiner weiteren Abkühlung. Denn diese *Kontraktion* ergreift, gemäss stärkerer Abkühlung, selbstverständlich gerade die *äussersten* Rindenteile der Erde viel mehr als die unter dem dicken Gesteinsmantel geschützten Zonen der magmatischen Tiefe, d. h. die Kontraktion führt zum geraden Gegenteil dessen, für was sie früher die Vertreter der Kontraktionslehre verantwortlich gemacht hatten. Die Kontraktion führt nicht zu einer relativen Volumvergrösserung der Kruste gegenüber einem weiter schwindenden Erdkern, verbunden mit einem Nachsinken der festen Rinde und Schrumpfen derselben zu den Gebirgen der Erde, sondern diese Kontraktion der *Kruste* gegenüber einem weit stabiler bleibenden, weil vor direkter Abkühlung seit langem stark isolierten Erdkern führt gerade umgekehrt zu einem Zukleinwerden der Kruste gegenüber dem Erdkern und damit zu *Dehnungen* in der Kruste oder gar zum *Zerreissen* derselben. Was abermals, in beiden Fällen, das Gleichgewicht der magmatischen Massen stört und zu *neuen Strömungen* derselben gegen die eben entstehende Schwächezone hin führt. Magmatische Massen strömen so diesen Stellen grosser Druckentlastung zu, werden liquid und damit aktiv, Gasphasen spalten sich hier ab, dringen in die feinsten Diskontinuitäten der sich dehnenden Rinde und *leiten so die Massenintrusion, d. h. die Krustenaufschmelzung im grössten Massstab ein.* Eine neue Geosynklinale entsteht und damit die Möglichkeit eines neuen, gebirgsbildenden Zyklus.

So sehen wir, wie einerseits die *Gegensätze* zwischen dicken und daher starren Rindenschollen und relativ dünnen Schwächezonen der Erdrinde *magmatische Strömungen in deren Untergrund auslösen* und zu mächtigen *Bewegungen der Krustenteile* gegeneinander und damit zur *Gebirgsbildung* führen, anderseits aber, wie durch die *Reaktion des magmatischen Untergrundes auf das bei der Gebirgsbildung gestörte Krustengleichgewicht und durch die fortschreitende Kontraktion der Erde neue Schwächezonen*

ganz automatisch immer wieder neu geschaffen werden müssen. Dass im Hintergrunde aber die der Erdrotation entspringenden *zentrifugalen* Kräfte der sogenannten *Polflucht* in der Erdkruste eine fundamentale Rolle spielen, und zwar sowohl eine höchst aktive, die Bewegungen direkt *antreibende* als auch eine grossartige *Richtung gebende,* indem sie die Marschrichtung der Schollen weitgehend bestimmen, ist ebenfalls klar.

* * *

Die Gliederung der Erdkruste in dicke Schollen und dünne Areale ist uralt. Sie war schon vorhanden bei der ersten Erstarrung des damaligen Erdensterns, bedingt durch den *Mechanismus dieser Erstarrung* selbst, der *von allem Anfang an keine gleichmässige Kruste entstehen liess.* Das Spiel der Kräfte, sowohl der zentrifugalen als auch das der magmatischen Strömungen, war damit von Anbeginn an gegeben. Denn *das Gleichgewicht zwischen Kruste und Magma war von allem Anfang an gestört.* Damit aber war auch *von allem Anfang an der Impuls für die Krustenbewegungen der Erdgeschichte gegeben.* Streben nach Gleichgewicht, immer wieder gestört durch die Trägheit der Massen und die fortschreitende Abkühlung und damit Kontraktion, bedingt die sukzessiven Bewegungszyklen der Erdgeschichte und damit jede Gebirgsbildung, vom Anfang der geologischen Zeit bis zum heutigen Tag. Aber während in einem der ersten Erstarrung der Kruste direkt nachfolgenden Entwicklungsstadium des Planeten die einzelnen Krustenteile sich noch relativ leicht verschieben liessen, Polflucht und magmatische Strömungen noch relativ unbehindert ihr reiches Spiel und Gegenspiel vollführen konnten, hat sich dies mit dem Dickerwerden der Kruste und der damit verbundenen vermehrten Kompression der magmatischen Zone recht wesentlich geändert. Der natürlichen Polflucht der Massen setzte die zunehmende Erstarrung der Kruste einen stets wachsenden *Widerstand* entgegen, und die Strömungen im magmatischen Untergrund sind seit dem Abschluss der astrischen Zeit der Erde immer mehr *behindert* worden durch eine zunehmende Viskosität der magmatischen Massen. Es hält so seit dem Fortschreiten der Erderstarrung schwer, sich bei dem hochviskosen Zustand der magmatischen Schmelzen unter den stark verdickten grossen Kontinentalmassen die Entstehung geologisch derart aktiver Strömungen vorzustellen,

wie sie nötig erscheinen, um den Mechanismus der irdischen Bewegungen in Gang zu halten. Aber dafür, dass immer wieder im Ablauf auch der späteren Erdgeschichte grosse Bewegungszyklen in der Kruste einsetzten, die ganze Kontinente verschoben, weltumspannende Gebirgsgürtel schufen, das Klima der einzelnen Stationen auf der Erde weitgehend veränderten, gibt die Analyse der Erdkruste mit ihren einander stets wieder in regelmässigen Abständen folgenden Gebirgstürmungen, und zwar bis in unsere Zeit hinein, sicheres Zeugnis.

Wir müssen also annehmen, dass die Strömungen im magmatischen Unterbau der Kruste auf irgendeine Weise stets wieder erleichtert und in erhöhtem Masse angeregt werden können. Das scheint möglich, einerseits durch regionale Entlastung und damit verbundene Liquifizierung der magmatischen Zone im Gefolge immer weiterschreitender « kontraktiver » Dehnungen der Kruste im Dach dieser Magmazone, anderseits aber wohl auch, vielleicht sogar im Zusammenhang mit der Kontraktion der Erde und den Krustendehnungen stehend, durch zeitweise *erhöhte Wärmeproduktion,* Schaffung einer gewissen, die Druckeffekte überwindenden « Überwärme » in den obersten Teilen der Magmazone, *im Gefolge des Zerfalls radioaktiver Stoffe* in derselben, wodurch abermals grössere Magmaschichten, besonders aber das eigentliche Dachstockwerk der magmatischen Zone im direkten Untergrund der Lithosphäre, wenigstens vorübergehend liquifiziert und damit zu Strömungen befähigt würde.

Die Idee dieser « *radioaktiven Katalysatoren* », deren Grundzüge von dem irischen Forscher Joly stammen und die u. a. auch von Holmes weiterausgebaut wurden, könnte neben andern Faktoren sehr wohl ein *zyklisches Immerwiedereinsetzen* der tektonischen Bewegungen nach langen Perioden relativen Stillstandes erklären. Aber die Bestimmung des absoluten Alters und der wirklichen Dauer der geologischen Formationen und Zeitabschnitte gibt uns leider, obschon vielversprechende Ansätze zu einer solchen bereits vorhanden sind, noch zu wenig wirklich konkrete Anhaltspunkte für eine sichere Beurteilung der erwähnten Zusammenhänge. Und doch, nehmen wir etwa die Mittelwerte der von Barrell nach der Bleimethode eruierten Zeitdauer des Tertiärs, des Mesozoikums und des Paläozoikums, und berücksichtigen wir, dass der alpine Bewegungszyklus Mesozoikum und Tertiär

umfasst, das Paläozoikum aber zwei gebirgsbildende Zyklen aufweist, so gelangen wir trotz aller Unsicherheit doch zu irgendwie auffallenden Ergebnissen. Es ergäbe sich nämlich, dass der alpine Bewegungszyklus mit Mesozoikum und Tertiär rund 220 Millionen Jahre umfasst hat, die beiden paläozoischen Zyklen zusammen aber rund 450 Millionen Jahre, d. h. fast genau, wenigstens der Grössenordnung nach, das Doppelte. Auf jeden Fall tun wir gut, diese Dinge weiter im Auge zu behalten; denn es scheint doch schon jetzt, dass die Gebirgsbildungen, und damit die Krustenbewegungen überhaupt, sich irgendwie sehr regelmässig wiederholen. Rund 200 Millionen Jahre wäre die Dauer eines Bewegungszyklus. In Abständen von rund 200 Millionen Jahren würde sich immer wieder der Mechanismus der Krustenbewegungen wiederholen.

* * *

Hochverehrte Versammlung! Ich habe versucht, Ihnen in einer kurzen Stunde einen bescheidenen Begriff von der Grösse der Phänomene zu vermitteln, die die Gebirgsbildung im Rahmen der Erdgeschichte bedingen. Vieles ist noch zu tun, bevor wir weiter und völlig klar sehen. Aber gegenüber dem Stand der Erkenntnisse noch vor wenig mehr als 20 Jahren sind wir doch wieder einen guten Schritt weitergekommen. Beanspruchten damals die gewaltigen, neu erkannten Rindenbewegungen das berechtigte Hauptinteresse, indem der Schauplatz der Gebirgsbildung von den engen Strängen der irdischen Gebirgszüge weg sich mächtig weitete und in der Bewegung ganzer Kontinente die Ursache der irdischen Gebirgsbildung gesehen werden musste, so neigt unser Hauptinteresse heute sich erneut den irdischen *Tiefen* zu, die, neben den Äusserungen der Kontraktion und neben den Effekten der Erdrotation, mit durchaus *eigenem Kräftespiel,* mit *Krustenaufschmelzung und magmatischen Strömungen,* den grossen Mechanismus der irdischen Krustenbewegungen stets aufs neue in Gang bringen helfen.

Nicht Kontraktion allein, wie die klassische Geologie vermeinte, nicht Polflucht und Westdrift in erster Linie, wie Wegener vermutete, nicht Strömungen im Untergrund allein, wie vor vierzig Jahren Otto Ampferer in einer revolutionierenden Schrift gegen die Kontraktionslehre sich vorstellte, bedingen den komplizierten

Mechanismus der Krustenbewegungen und damit die Gebirgsbildung der Erde. Diese Faktoren arbeiten vielmehr zusammen in einer grossartigen Arbeitsgemeinschaft, sie unterstützen einander, sie lösen einander ab und lösen einander aus im Wechsel der Zeiten. *Eine Kontraktion der Erde besteht,* auch heute noch. *Eine Flucht der Massen von den Polen gegen den Äquator dirigiert die wandernden Schollen* wie auf andern Gestirnen; *die Strömungen im magmatischen Untergrund unterstützen diese Wanderungen* im Streben nach Isostasie; der *Zerfall radioaktiver Stoffe sorgt,* neben isostatischen Vorgängen und weiterer Kontraktion des Planeten, für ein stetes *Wiederaufleben* der sonst langsam erlahmenden Strömungen, und so erkennen wir heute :

Es ist nicht die Kontraktionstheorie als solche, es sind auch nicht die bloss auf Polflucht zurückgehenden Verschiebungen der Kontinente oder die Strömungen im magmatischen Untergrund, die für sich allein den Mechanismus der Krustenbewegungen erklären könnten, sondern es gibt nur *ein grosses Zusammenspiel* aller dieser verschiedenen Faktoren, die vereint das tektonische Leben der Erde und damit auch unser Dasein mit allen seinen Schicksalen bedingen und erhalten.