

Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 33 (1940)
Heft: 2

Artikel: Über das Ausmass des alpinen Krustenzusammenschubs
Autor: Sonder, Richard A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-160030>

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: 24.04.2026

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

Über das Ausmass des alpinen Krustenzusammenschubs.

Von **Richard A. Sonder**, Oberrieden.

Mit 1 Textfigur.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Schätzungen über das Ausmass des alpinen Zusammenschubs anzustellen. Angesichts der Tatsache, dass seit Aufkommen der Deckenlehre eine sehr grosse Unsicherheit in den Schätzungen nach Profilrekonstruktionen eingetreten ist, erlangen die Methoden, welche den Zusammenschub nach anderen Gesichtspunkten zu schätzen suchen, ein grösseres Gewicht. Ich wende mich deshalb zuerst diesen Methoden zu.

1. Volummässige Schätzung des Faltungsprozesses.

Es besteht heute unter den Geophysikern ziemlich einheitlich die Meinung, dass die hauptsächlichsten salischen Inhomogenitäten, welche das Relief schaffen, in einer oberflächlichen Krustenschicht stecken, die vermutlich kaum mehr als 30 km dick ist. Die Dichteinhomogenitäten, welche unter dieser Grenze liegen, dürften bei Tiefland nicht mehr sehr wesentlich sein, wohl aber bei den eigentlichen Gebirgen, wie z. B. den Alpen, wo eine merkliche salische Krustenverdickung anzunehmen ist. Man ist ziemlich einig darüber, dass die salische Krustenverdickung des Alpenkörpers durch den noch nicht sehr alten Zusammenschub erzeugt worden ist. Daraus folgt, dass die Verdickung einen Anhaltspunkt über das Ausmass des Zusammenschubs geben dürfte. Massgebend für eine derartige Berechnung ist einerseits die salische Krustendicke vor der Faltung, andererseits die Dicke des salischen Wulstes unmittelbar nach der Faltung. Der Inhalt der Schichten im alpinen Faltungsbereiche beweist, dass vor der Faltung das Relief annähernd Schelfcharakter hatte, dass also die salische Kruste schon vor der Faltung mehr oder weniger kontinentalen Charakter hatte und deshalb die salische Krustendicke mit 25—30 km einzusetzen ist.

Nach Erdbebenbeobachtungen, Dichtebetrachtungen u. a. m. ist heute die salische Kruste im Alpenkörper 40—45 km dick. Diesem Werte ist der Erosionsbetrag seit dem Tertiär zuzufügen, welcher eine Grössenordnung von 10—15 km erreichen dürfte. (Nach ALB. HEIM (1922, S. 905) kann der heutige Abtrag mit ca. 1 m pro 2000 Jahre eingesetzt werden.) Demnach hat sich im Alpenbereich die Kruste von 25—30 km auf 50—60 km verdickt, was einen tektonischen Zusammenschub auf die Hälfte oder wenig mehr als die Hälfte der ursprünglichen Breite bedeuten würde. Dies entspräche ungefähr 120—200 km.

Die Grössenordnung der eingesetzten Zahlen ist natürlich nicht sehr scharf definierbar, so dass durch Zusammenstellung extremer Zahlen je nach Absicht eventuell grössere oder kleinere Werte gefunden werden können. Geophysiker,

welche derartige Überlegungen angestellt haben, scheinen einen Zusammenschub auf nur $\frac{2}{3}$ der ursprünglichen Breite vorzuziehen, wie dies z. B. JEFFREYS (1929) getan hat. Mir scheint die Tatsache wichtig, dass sich als allgemeine Grössenordnung bei diesen Berechnungen Zahlen um 100 bis 200 km ergeben, und dass Verschmälerungen auf weniger als z. B. $\frac{1}{3}$ der ursprünglichen Breite nach dieser Methode ganz unwahrscheinlich erscheinen. Man könnte solche Schätzungen nur dann zulassen, wenn man die Methode als solche wissenschaftlich verwirft mit der Begründung, dass der Faltenwulst seit seiner Bildung auch in der Tiefe abgebaut und verflacht worden sei, indem z. B. ein Aufschmelzen und Auseinanderfließen der salischen Verdickungszone in beträchtlichem Ausmasse seit dem Tertiär stattgefunden habe. Dieser Einwand ist aus dem Grunde nicht sehr plausibel, weil ähnlich alte oder ältere Gebirge als die Alpen existieren, in denen sich heute noch eine z. T. bedeutend tiefer reichende salische Wurzel erhalten hat, wie z. B. im Himalaya, in den Rocky Mountains und anderswo.

2. Mechanisch-theoretische Schätzung des Zusammenschubsausmasses.

Das grundlegende Ausgangsproblem einer Geomechanik ist in der Frage nach der Grösse des gebirgsbildenden Druckes enthalten. Ich habe schon früher (1922) die Ansicht ausgesprochen, dass die kristallinen Silikatgesteine, welche die Erdkruste in ihrer Hauptmasse aufbauen, eine beträchtliche Festigkeit besitzen müssen, welche sich auch gegenüber geologischen, also lang dauernden Beanspruchungen, unverändert zu behaupten vermag. Wie neuere Ausführungen zeigen (GUTENBERG 1939, S. 89), setzt sich diese Auffassung bei den Geophysikern mehr und mehr durch. Eingehende Studien der Ergebnisse von Festigkeits- und Plastizitätsexperimenten an Kristallen und Kristallaggregaten haben meine Überzeugung gefestigt, dass die weitgehenden Plastizitätsvorstellungen, welche gewisse Geologen hegen, und nach denen durch geringe Drucke in geologischen Zeiträumen auch die normalerweise absolut starr erscheinenden Silikatgesteine zum Fliessen gebracht werden können, irrig sind. Ebenso steht die Ansicht, dass mit grösserer Erdtiefe die Gesteine zunehmend plastisch werden, in unbedingtem Widerspruch zu den Ergebnissen der neueren Festigkeitsexperimente. Solche Vorstellungen haben nur deshalb aufkommen können, weil bei der Beanspruchung von Kristallaggregaten sehr komplizierte mechanische Erscheinungen auftreten, wobei nach der Theorie des elastischen Diskontinuums, welches für solche Aggregate zutrifft, sich im Kleingefüge beträchtliche Spannungsdifferenzen einstellen, welche durch interkristalline oder intrakristalline Veränderungen kompensiert werden können. Bei oberflächlichen Bedingungen ist die interkristalline Reaktionsweise (=Bewegungen an den Kristallrändern) oft das Massgebende in Bezug auf Festigkeit und scheinbares Fliessen der Gesteine, so dass die intrakristallinen Konstanten (= Reaktionen im Kristallgitter) betreffs Festigkeit und Dauerelastizität oft nur sehr verwischt und getrübt bei den Experimenten zum Ausdruck kommen. Eine oberflächliche Betrachtung der Reaktionsmöglichkeiten von Kristallaggregaten in Bezug auf Festigkeit und Verformung kann deshalb leicht Argumente finden, welche scheinbar gewisse weitgehende Plastizitätsvorstellungen rechtfertigen.

Im Rahmen dieser Abhandlung ist es mir nicht möglich, die theoretischen Grundlagen der Verformung von kristallinen Aggregaten näher zu erörtern, da zu viele Ergebnisse von Experimenten und widersprechende Erscheinungen zu diskutieren wären. Als Grundprinzip kann durch solche Studien erkannt werden, dass mit zunehmendem Tiefendruck die Eigenschaften eines Kristallaggregates

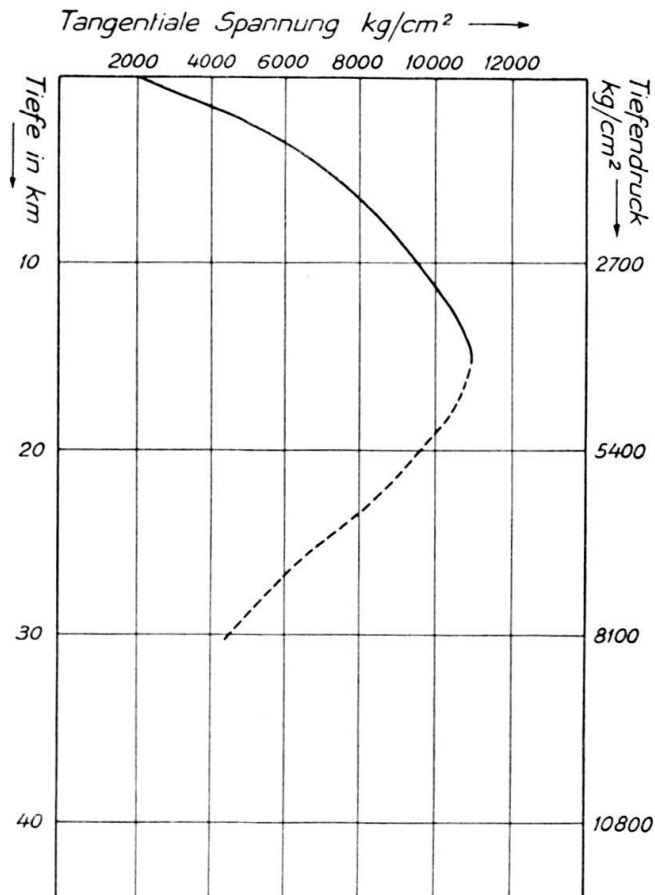
immer mehr sich dem Mittelwert der Eigenschaften annähern, welcher durch die physikalischen Konstanten der Einzelindividuen des Aggregates bestimmt wird. Aus den bestehenden Untersuchungen scheint hervorzugehen, dass dieser Zustand bei hydrostatischen Tiefendrücken von 1000—2000 At. erreicht wird. Das bedeutet, dass in Tiefen, welche 6—8 km übersteigen, die interkristallinen Reaktionsmöglichkeiten des Aggregates auf ein Minimum herabgesunken sind, und dass Festigkeit und Elastizität des betrachteten Körpers weitgehend durch die intrakristallinen Reaktionsfähigkeiten der Kristallindividuen bestimmt werden. Mit andern Worten: in grösseren Erdtiefen werden die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften des Kristallaggregates annähernd identisch mit denjenigen der Einzelkristalle.

Es ist nach der Strukturtheorie der Kristalle kein Zweifel möglich, dass ein Einzelkristall, welcher durch eine mechanische Beanspruchung eine Gitterdeformation erleidet, ungeachtet der Dauer dieser Beanspruchung und selbst nach Milliarden von Jahren bei Wegnahme der Beanspruchung das verzernte Gitter wieder normalisiert, immer vorausgesetzt, dass die Beanspruchung innerhalb der Elastizitätsgrenze des betreffenden Kristalles gelegen ist. Experimente wie auch theoretische Berechnungen der Gitterfestigkeit zeigen, dass bei Silikatkristallen diese Elastizitätsgrenze sehr hoch liegt. Daraus folgt, dass in der Kruste, welche ja fast ausschliesslich aus kristallinen Silikatgesteinen aufgebaut ist, in grösserer Erdtiefe die Gesteine ganz beträchtlichen Dauerbeanspruchungen unendlich lange in elastischem Spannungszustand widerstehen können.

Diese Verhältnisse werden klarer anhand folgender Tatsachen. Ein Quarzit dürfte Festigkeiten um 2000 kg/cm^2 erreichen, bevor er zerbricht. Der einzelne einheitliche Quarzkristall zeigt jedoch eine Druckfestigkeit von $16\text{—}18000 \text{ kg/cm}^2$. Die Festigkeit des Quarzitblockes kann beträchtlich gesteigert werden durch zusätzlichen hydrostatischen Druck. ADAMS & BANCROFT (1917) haben bei ihren Experimenten gezeigt, dass die oberflächliche Festigkeit durch Tiefendruck gewaltig gesteigert wird. Bei Tiefendrücken von 5—10 km erreichten sie Verformungen von quarzreichen Graniten, wobei der Quarz immer noch plastisch reagierte. Schon die Tatsache, dass die Quarzkristalle im Gestein bei diesen Tiefendrücken bei Verformungsspannungen von $6\text{—}10000 \text{ kg/cm}^2$ zum Zerspringen gebracht werden konnten, zeigt, dass sich im Kristallaggregat die homogene Gesamtspannung in differentielle Einzelspannungen auflöst, welche lokal wesentlich grössere Werte erreichen als die mittlere Gesamtspannung, denn die Quarzkörner können einzeln ja erst bei noch wesentlich höheren Drücken zerspringen. Nach den vorliegenden Experimenten kann man schliessen, dass bei zunehmendem Tiefendruck immer höhere einseitige Spannungen erforderlich sind, um die Kataklyse des Quarzes im Kristallaggregat zu erzwingen. Nach den Experimenten sind in 5—10 km Erdtiefe vielleicht $5\text{—}10000 \text{ kg/cm}^2$ Stress erforderlich, um die Quarzkataklyse hervorzurufen. Im zentralen Gotthardmassiv kann man nun beobachten, dass alle Quarze der dortigen Granite durch die alpine Metamorphose in Trümmerquarze aufgelöst worden sind. Die Metamorphose muss sich seinerzeit in mindestens 5—10 km Erdtiefe ereignet haben. Diese Erscheinung stellt also eine Art geologisches Manometer dar, aus welchem wir schliessen können, dass der alpine Stauungsdruck eine Zusammenschubskraft von $5\text{—}10000 \text{ kg/cm}^2$ erreicht haben muss. Damit haben wir eine Zahl für die ungefähre Grössenordnung des gebirgsbildenden Druckes.

Entsprechend den obigen Ausführungen kann man auch Festigkeitsexperimente in ein generelles Festigkeitsprofil der Erdkruste auswerten. Das bestehende Diagramm stützt sich auf die Untersuchungen von ADAMS & BANCROFT

(1917), wobei allerdings die Extremwerte der einseitigen Spannungen etwas verringert wurden, um einem allfälligen schwachen, plastischen Fliessen im Grenzbereich der Festigkeit Rechnung zu tragen. Auf der Ordinate sind die Tiefenstufen in Kilometer aufgezeichnet, auf der Abscisse die Festigkeit in kg/cm^2 , gegenüber geologisch lang andauernden Beanspruchungen. Dabei bezieht sich die Kurve ausschliesslich auf die Festigkeit von kristallinen Silikatgesteinen. Der Verlauf der Kurve bis ungefähr 12–15 km Tiefe ist einigermassen durch Experimente festgelegt. Für grössere Tiefen herrscht weitgehende Unsicherheit, weil einesteils die Experimente fehlen, andernteils die erhöhte Temperatur Be-



Festigkeitskurve der kristallinen Silikatgesteine.

deutung erlangt. Es ist anzunehmen, dass beim Erreichen der bruchlosen Verformungszone, also etwa bei 12–15 km Tiefe, der Festigkeitsanstieg mit zunehmendem Tiefendruck sich verringert und eventuell Null wird. Von der Temperaturerhöhung kann man annehmen, dass sie die Festigkeit herabsetzt, so dass vermutlich in diesen Tiefen das Festigkeitsmaximum in der Kruste erreicht wird. Wie in der Kurve angedeutet ist, fällt nach grösseren Tiefen die Krustenfestigkeit allmählich ab, bis schliesslich die zähflüssige Unterlage der festen Erdkruste erreicht wird. Über den genaueren Verlauf dieses Abfalls und über die Tiefe, bei welcher der Zustand der Zähflüssigkeit erreicht wird, hat man keine sicheren Anhaltspunkte. Das Kurvenbild zeigt, dass die grösste Festigkeit der Kruste vermutlich in 10–20 km Tiefe zu suchen ist, und dass in dieser Zone sehr wohl Dauerspannungen von 8–10000 kg/cm^2 auftreten können.

Die obigen Zahlen geben nun allerdings nicht die maximale Druckfestigkeit an, weil in der Kruste sedimentäre Einlagerungen vorhanden sind, und durch grosse Tangentialschübe unter gewissen Bedingungen Verkrümmungen erzeugt werden, welche zur bekannten Geosynklinalbildung führen. Nach den von mir angestellten Berechnungen scheint es wahrscheinlich, dass bei Druckspannungen, welche zwischen 5000 und 10000 kg/cm² zu suchen sind, Ausknickungsvorgänge nach unten in Geosynklinalbezirken zu erwarten sind, welche Überschiebungsvorgänge einleiten müssen. Damit wird ein Festigkeitszusammenbruch der Erdkruste längs bestimmten Zonen herbeigeführt, wodurch sukzessive Faltungen eingeleitet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass VENING MEINESZ anhand seiner Untersuchungen über die Schweredefizittröge in Hinterindien und den Antillen das Auftreten derartiger Vorgänge postuliert hat (Buckling Hypothesis). Diese Berechnungen zeigen, dass in der Erdkruste Verhältnisse bestehen, welche es verhindern mögen, dass die mittleren Horizontalstresse in ihr die maximal denkbaren Werte erreichen können. Aus den bisher vorliegenden Kenntnissen muss man schliessen, dass die Erdkruste eine maximale Festigkeit aufweist, welche einer mittleren Tangentialspannung zwischen 5000 und 10000 kg/cm² entspricht.

Im Rahmen einer konsequenten mechanischen Theorie ergibt sich in Bezug auf die weitreichenden Deckenüberschiebungen von 100—200 km kein Problem, indem sich anhand von Berechnungen nachweisen lässt, dass tangential Schubkräfte von bereits 2—3000 kg/cm² genügen können, um derartige Schubeffekte auszulösen. Dies bedeutet, dass die Festigkeit der Erdkruste stark herabgesetzt wird, sobald einmal Überschiebungsprozesse eingeleitet sind. Diese letztern müssen deshalb solange weiter gehen, bis die Tangentialspannungen der Kruste nicht mehr ausreichen, im Orogen weitere Deckenzusammenschübe auszulösen, ein Zustand, der nach obigem bei Spannungen von unter ca. 2—3000 kg/cm² erreicht wird.

Geologen und Geophysiker sind sich wohl ziemlich einig in der Ansicht, dass die feste Erdkruste auf einer zähflüssigen Magmaunterlage ruht. Ferner wird von geophysikalischer Seite aus diesem Grunde auch kein Einspruch mehr dagegen erhoben, dass die Erdkruste als Ganzes oder in Teilen auf dieser Unterlage verschiebbar ist. Selbst bei hohen Zähflüssigkeitsgraden der Unterlage ist der Widerstand bei langsamer Verschiebung sehr gering. Ein mittlerer tangentialer Schub von wenigen 100 kg/cm², also weit unter der absoluten Festigkeit der Erdkruste, dürfte genügen, die ganze Kruste über die zähflüssige Unterlage zu bewegen (d. h. also auf einer Schubfläche, welche 40000 km lang ist). Dies bedeutet aber in mechanischem Sinne nichts anderes, als dass Stresse, welche die Grössenordnung von ein paar 100 kg/cm² überschreiten, sich über die ganze Kruste hin auszugleichen trachten. Tangentiale Spannungen von mehreren 1000 kg/cm², wie sie durch die Erscheinungen bei den gebirgsbildenden Prozessen sicher nachgewiesen sind, können deshalb nur in Form einer allgemeinen tangentialen Rindenspannung der Kruste existiert haben.

Es ist nun schon lange bekannt, dass am ehesten eine Erdkontraktion in der Lage ist, eine derartige Spannung in der Kruste zu erzeugen, weshalb diese Erklärung die grösste Wahrscheinlichkeit hat. So gesehen ergibt sich nun eine einfache Berechnung der Grössenordnung der Gebirgszusammenschübe. Die säkulare Erdkontraktion wird einen ständig zunehmenden Tangentialschub in der Kruste erzeugen, welcher so lange durch elastische Kompression kompensiert wird, als die Kruste den entstehenden Spannungen widersteht, d. h. bis zu Beträgen von 5—10000 kg/cm². Dann wird der Faltungsprozess einsetzen, welcher sich in

mehr oder weniger komplizierten Phasen mit Vor- und Nachläufern bei seitlicher Ausweitung zu einem Maximum entwickelt und abstirbt, wenn die verbleibenden Restspannungen nicht mehr genügen, in den orogenen Zonen noch weitere Bewegungen auszulösen, also vermutlich bei Spannungen von der Grössenordnung von 2 bis 3000 kg/cm². Das Ganze führt zu einem im Einzelnen zwar unregelmässigen, im Grossen aber doch rythmisch-periodischen Ablauf der orogenen Prozesse, worüber ich bereits in einer früheren Publikation (1922) das Wesentliche ausgeführt habe. Während der Faltung wird demnach die mittlere Krusten-spannung in einer Grössenordnung von rund 5000 kg/cm² herabgesetzt.

Der mittlere Elastizitätsmodul der Rinde dürfte in kontinentalen Regionen ca. 6—7000, in ozeanischen Gebieten ca. 12000 betragen, wenn man unter diesen Zahlen die Druckentlastung versteht, welche eine elastische Dilatation von 1% hervorzurufen vermag. Der mittlere YOUNG'sche Modul der festen Erdkruste, in der sich die Spannungen aufspeichern, dürfte deshalb annähernd 10000 betragen. Dies ist der Wert für einseitige Kompression-Dilatation, der einer gewissen Korrektur bedarf für eine allseitige horizontale Krustenspannung. Da es sich aber nur um Grössenordnungen handelt, kann dies hier vernachlässigt werden. Man sieht aus diesen Zahlen, dass eine Druckentlastung von der Grössenordnung von 5000 kg/cm² ca. ½% ausmacht. Berechnet auf den Erdumfang ergibt sich für den Zusammenschub, der sich in einer Faltungsphase ereignen kann, die Grössenordnung von ca. 200 km. Da man jedoch weiss, dass die alpine Faltung eine geraume Zeit gedauert hat, können sich die Kontraktionsäquivalente während dieser Zeit ebenfalls noch direkt in Faltung umgesetzt haben, so dass die mechanische Gebirgsbildungstheorie auf 2—300 km als Ausmass des möglichen Zusammenschubs kommt.

In älteren Lehrbüchern, sowie auch noch in den Diskussionen von JEFFREYS findet man Berechnungen über das Ausmass der möglichen Zusammenschübe anhand von thermischen Kontraktionsberechnungen. Ein derartiges Vorgehen hat heute keine Berechtigung mehr, da als sicher angenommen werden kann, dass eine thermische Abkühlung der Erde ohnehin fraglich ist, wenn man die an sich schwer beurteilbaren Möglichkeiten von Wärmeproduktion im Erdkörper (z. B. Radioaktivität) berücksichtigt. Die neuere Entwicklung der intraatomaren Physik und die bekannt gewordenen Verdichtungsmöglichkeiten von Sternen zeigen, dass Verdichtungsmöglichkeiten der Materie und dementsprechend auch Kontraktionsmöglichkeiten der Erde existieren, die man wohl feststellen, aber beim heutigen Wissen nur durch Mutmassungen erklären kann. Deshalb hat der Streit darüber, ob die Erde sich abkühlt oder nicht, und welche Volumänderungen daraus resultieren können, heute nur noch akademische Bedeutung. Das Problem ist heute einzig und allein das, ob Geologie und Geomechanik für eine Erdkontraktion sprechen oder nicht. Die Kontraktionsbeträge können nur durch mechanische Überlegungen wie die vorgängigen, oder durch astronomische Berechnungen, wie diejenigen von MEYERMANN (1928) über die Kontraktionsgeschwindigkeit, oder endlich durch geologische Feststellungen und Messungen eines vorhandenen Rindenüberschusses anhand von Feldbeobachtungen in Gebirgen ermittelt werden. Die mechanische Rechnung ergibt nach obigem eine Radiuskontraktion von ½—¾% in der Zeit zwischen Ausgang des Paläozoikums und Miocän. Die von MEYERMANN berechneten astronomischen Daten lassen auf eine annähernd gleiche Grössenordnung der Kontraktion schliessen.

3. Schätzungen des alpinen Zusammenschubs nach Feldbeobachtungen.

Folgende Schätzungen sind veröffentlicht:

HEIM, ALB., vor der Deckentheorie	120— 150 km	} Kontraktion
HEIM, ALB. u. ARN. 1921, Deckentheorie	200— 300 „	
KOBER, 1933, Deckentheorie	ca. 240 „	
CADISCH, 1934	400— 500 km	} Kontinental- verschiebung
JENNY, H., 1924	400—1200 „	
STAUB, R., 1924	über 1000 „	

Die Tabelle enthüllt eine auffällige Unsicherheit der Schätzungen, welche umso nachdenklicher stimmen muss, als sich diese auf einen vorbildlich durchforschten Gebirgskörper beziehen. Einigkeit besteht nur darüber, dass im Alpenkörper effektiv eine grössere Rindenzusammenschiebung stattgefunden hat, welche eine Grössenordnung von mindestens einigen 100 km erreicht. Man erkennt ferner, dass offensichtlich theoretische Vorstellungen das Schätzungsergebnis massgebend beeinflussen. Die Anhänger des Kontraktionsgedankens errechnen mässigere Zusammenschübe als die Anhänger der Kontinentalverschiebungslehre. Es ist bekannt, dass gerade der Deckenbau der Alpen der Kontinentalverschiebungslehre starken Auftrieb gegeben hat, weil man aus den Deckenstrukturen glaubte, grosse Zusammenschubsbeträge rekonstruieren zu können. Man ist sogar so weit gegangen, dass man die Verschiebungslehre als durch den alpinen Deckenbau erwiesen betrachtete und dementsprechend die Kontraktionstheorie als überholt ansah. Richtiger wäre wohl die Feststellung gewesen, dass nach der Deckentheorie Rekonstruktionen möglich sind, welche sehr grosse Verschiebungsbeträge ergeben. Daneben bestehen aber auch Rekonstruktionsmöglichkeiten, welche geringere Zusammenschübe errechnen lassen. Wenn man sich die Tatsache überlegt, dass vom Alpenkörper nur eine Schicht von wenigen km Dicke genau bekannt ist, und dass ein vollständiges Alpenprofil Aufschluss geben müsste über die Lagerungsverhältnisse in einem 50—60 km dicken Faltungswulst, so sieht man, dass die tatsächlichen Grundlagen zu einer Profilrekonstruktion einen geringen Anteil des zu rekonstruierenden Gesamtgebäudes ausmachen. Die vorgelegten Schätzungen dürfen also mit einer gewissen Skepsis betrachtet werden.

Es kann hier auch der Auffassung entgegengetreten werden, dass man aus der Alpenstruktur rückschliessend den Mechanismus der Gebirgsbildung erfassen könnte. Bildlich gesehen kann man in den komplexen Alpenbau die verschiedensten tektonischen Vorgänge hineinlegen und wird nie zu einem Diskussionschluss kommen, weil eben bildlich gesehen alles möglich ist. Die Gebirgsbildung ist aber ein grossräumig und grossvolumig angelegter mechanischer Prozess, der sich in einem Drucktemperaturfeld abspielt hat, das im Rahmen der klassischen mechanischen Theorie beurteilbar und analysierbar ist. Man bedarf hierzu keiner geologischen Hypothesen, sondern physikalischer und mechanischer Überlegungen, welche ohne mathematische Formeln und einschlägige Berechnungen nicht durchzuführen sind. Nur das, was mechanisch möglich ist, ist auch geologisch und geomechanisch akzeptierbar. Auch wenn man von den Grundvorstellungen wie Kontraktion, subkrustale Strömungen, Abgleitung u. A. m. ganz absieht, erkennt man bei einer Durchsicht der vorgebrachten Alpensynthesen, dass in diese eine grosse Anzahl von Arbeitshypothesen eingehen, welche die Schätzungen der alpinen Stauung weitgehend beeinflussen müssen.

Ohne auf die Einzelheiten des alpinen Baues eingehen zu wollen — denn diese Aufgabe bleibt am besten den kompetenten Kennern der alpinen Tektonik überlassen — müssen sich die generellen Arbeitshypothesen der Alpentektonik in vieler Hinsicht einer geophysikalischen und mechanischen Bewertung unterziehen, welcher der Alpengeologe bei seinen Auswertungen Rechnung zu tragen hat. Ich möchte ein paar Hauptpunkte berühren.

a) Aus der Tatsache, dass die Festigkeit der gesunden Erdkruste wesentlich grösser als die der durchscheerten ist, muss geschlossen werden, dass der alpine Bau aus einer Haupt-Überschiebung hervorgegangen ist, indem nach dem Prinzip der Bewegungskonzentration auf die Stelle des geringsten mechanischen Widerstandes sich die erste vollständige Durchscheerung in sukzessiver Aufschuppung und tektonischer Komplikation zu der alpinen Schlußstruktur entwickelt haben muss. Es ist demnach die Auffassung wahrscheinlich, dass die Hauptzusammenschiebungsbewegung ihren Ausgang in der südlichen Wurzel genommen hat, und dass sich die weiteren Aufschuppungen aus der Entwicklung dieser Grossüberschiebung ableiten. Dabei wurde der geosynklinale Kern (penninischer Schichtkomplex) überfahren und in der weiteren Entwicklung die Schichten des helvetischen Vorbeckens von der Grundlage abgeschuppt. Dies ist eine Deutung, deren Hauptlinien übrigens von der Mehrzahl der Alpengeologen als wahrscheinlich anerkannt wird.

b) Der Geologe trifft als Decken hauptsächlich oberflächlichere Elemente und Schubpakete von Dicken von zusammen 6—12 km. Das Festigkeitsprofil der Erdkruste (s. Figur) zeigt aber, dass die Tektonosphäre unbedingt eine grössere Mächtigkeit besessen haben muss, so dass man sich fragen wird, welche Rolle die tieferen Elemente der Kruste bei der Alpenfaltung gespielt haben. Dabei wird man sich bewusst, dass das, was man im Alpenquerschnitt studiert, vor allem den oberen, bis zu einem gewissen Grade weniger massgebenden Teil der bewegten Kruste darstellt. In diese Zone könnten tiefere Elemente einstossen, welche passive Verfrachtungen und dergleichen mit sich bringen. Eventuell können in den von ARGAND studierten kristallinen penninischen Decken solche Schubelemente der Haupttektonosphäre erkannt werden, die sich in das durch die oberflächliche Überfahrung eingekeilte penninische Schichtpaket eingepresst haben. Es ist klar, dass bei einer solchen Deutung diese penninischen Decken-einpressungen und beobachtbaren Auswälvungen des penninischen Mesozoikums nicht voll als Zusammenschub gedeutet werden können, wenn man die südalpine Hauptüberschiebung (Ostalpine Deckenmasse) in den Stauungsbetrag eingerechnet hat.

c) Bei Zusammenschubsberechnungen spielt die Theorie der Deckenparallelisation von Osten nach Westen und die Vorstellung über das axiale Deckengefälle, welche die Tiefen- und Höhenstruktur nach dem Prinzip von Kulissenprofilen auszuwerten sucht, eine grosse Rolle. Die weitgehende Auswertung von solchen Ansichten hat stark dazu beigetragen, dass gewisse Autoren grosse Zusammenschubswerte errechnet haben. Ohne die Möglichkeit solcher Interpretationen bestreiten zu wollen, muss doch festgestellt werden, dass weitgehenden diesbezüglichen Schlüssen ernste Bedenken entgegenstehen. Nach den Schweremessungen ist nämlich die salische Wurzeldicke des Gebirges in den Ost- und Westalpen ungefähr gleich stark, während nach den Vorstellungen vom axialen Gefälle unter den Ostalpen eine viel grössere Tiefenschuppung anzunehmen wäre, als Dichtebetrachtungen ergeben. Man erhält des-

halb den Eindruck, dass der Tiefenbau von Ost- und Westalpen nach dem geophysikalischen Befunde nicht auf die Art und Weise konstruiert werden kann, wie es nach der Theorie vom axialen Gefälle geschehen ist. Mechanisch wird man viel eher zu der Ansicht neigen, dass zwar der Schuppungsprozess längs der Faltungsfrent in grossen Zügen gewisse Analogien besitzen kann, dass aber die Aufschuppungen im engeren Bereich von lokalen Verhältnissen bestimmt werden, und dass ein mechanischer Zwang zu einer streng parallelen Entwicklung kaum bestanden haben kann. Längszusammenstauungen sind nicht ausgeschlossen (Grenze Ostalpen-Westalpen). Die Kruste ist ja ein Schollenmosaik, in dem sich bei Überschiebungen sehr rasch längs der Front unterschiedliche Schuppungen einstellen können.

d) Die errechenbaren Zusammenschubsbeträge fallen sehr verschieden aus je nach den Vorstellungen, die man über die rückwertigen Verlängerungen der noch vorhandenen Deckenreste hegt. Mechanisch scheint es wahrscheinlicher, dass eine vorwandernde Überschiebung ihre tektonischen Komplikationen und Aufschuppungen nicht in der Wurzelzone, sondern gegen die Stirnregion hin erfährt, welche durch die tektonische Wanderung bereits in ihrer Festigkeit geschwächt ist. Wenn eine wandernde Decke sich mit dem Vorlande verkeilt, so werden sich vor allen Dingen Stirnschuppungen bilden, wobei sich die tiefer liegenden Horizonte festfahren und ihrerseits von den jüngeren, höheren Horizonten überfahren werden. Rekonstruktionen, welche für solche Schubpakete weitreichende rückwärtige Verbindungen annehmen, sind deshalb sehr unwahrscheinlich und man muss sie, wenn nicht absolut zwingende Gründe vorliegen, ablehnen. Solche Stirnlappungsphänomene sind in den helvetischen Decken deutlich angezeigt, indem dort die höheren und weiter nach vorn gewanderten Decken stratigraphisch jüngere Elemente enthalten, als die tieferen, rückwärts gelagerten Deckenreste. DE SITTER hat z. B. (1939), gestützt auf die grundlegenden Untersuchungen im Helvetikum von ARNOLD HEIM, OBERHOLZER u. A. zu zeigen versucht, wie die stratigraphischen Elemente der helvetischen Decken im rekonstruierten Sedimentationsraum z. T. übereinander gelegen haben könnten. Man erkennt anhand solcher Überlegungen, dass der beweisbare minimalste Zusammenschub nur so rekonstruiert werden kann, dass man die Schichten pro gleichaltrigen Horizont abwickelt, und sich auf den grössten so erhaltenen Wert stützt. Dabei dürfen nach Punkt c nur die Verhältnisse berücksichtigt werden, welche man längs einem bestimmten Profil antrifft. Zugaben für Erodirtes, anhand allfällig nachweisbarer Lücken im Faziesübergang, sind auf das strikteste Minimum zu beschränken. Wendet man diese Rekonstruktionsmethode konsequent auf das Helvetikum an, so sollte der älteste überschobene Horizont am vollständigsten erhalten sein, d. h. Verrucano und Sernifit. Derselbe bildet die Unterlage der Hauptüberschiebung (Glärnisch-Decke), deren Überschiebung die Grössenordnung von ca. 30 km hat. Es spricht vieles dafür, dass die restlichen helvetischen Decken zur Hauptsache nur Abschuppungsprodukte vom Rücken der Glärnisch-Decke sind, hervorgerufen von der vorwandernden südalpiner Grossüberschiebung, welche die Hauptabscheerung (Glärnisch-Decke) erzeugte. Stellt man sich den ganzen Prozess mechanisch vor, so scheint es wiederum am wahrscheinlichsten, dass nur eine Hauptabscheerung stattgefunden hat und dass deren aufgelagertes höheres Mesozoikum, das dann im Ablauf des Zusammenschubs sich in Form der höheren helvetischen „Decken“ abschuppte, gar nicht sehr viel länger gewesen sein kann, als die abgerissene Basis. Ein merklich grösserer Abwicklungsbetrag der höheren Zonen kann nur diskutiert werden, wenn er ganz einwandfrei nachgewiesen werden kann.

Generell lässt sich auch für die grosse süd-(resp. ost-)alpine Überschiebungsbewegung feststellen, dass bei ihr die kristallinen Elemente offenbar gegen Süden zurückgeblieben sind und vor allem die höheren Sedimente am weitesten nach Norden vorstossen. Also dürften auch für die Hauptüberschiebung ähnliche Rekonstruktionsprinzipien gelten. Der Spekulation ist dabei aber ein weites Feld eingeräumt, da hier die Erosion vieles zerstört hat.

Prinzipiell sprechen viele Argumente dafür, dass die Schätzung der alpinen Stauung die konservativen Zusammenschubswerten vorzuziehen hat. Es steht fest, dass vom Standpunkt des Feldgeologen die Deckenstruktur recht verschiedene Interpretationen der Schubweite ermöglicht, dass es aber eine minimale Schubweite gibt (vielleicht ca. 200 km), unter welche die Schätzungen des Feldbefundes nicht gehen können. Auch nach den heutigen Kenntnissen muss die HEIM'sche Schätzung von 2—300 km alpinen Zusammenschubs als eine mit dem Feldbefund vereinbare Schätzung angesehen werden. Sie stimmt sehr gut überein mit den vorgelegten ganz anders aufgebauten Schätzungsmethoden nach geophysikalischen, geomechanischen und astronomischen Grundlagen, nach welchen Zusammenschubswerte, welche ca. 400 km übersteigen, kaum errechnet werden können.

Literatur.

- ADAMS, F. D. & BANCROFT, J. A. On the amount of internal friction developed in rocks during deformation and on the relative plasticity of different types of rocks. *Journ. Geology* 25, 1917.
- CADISCH, J. *Geologie der Schweizeralpen*. Zürich 1934.
- GUTENBERG, B. *Internal Constitution of the Earth*, New York 1939.
- HEIM, ALB. *Geologie der Schweiz*, Leipzig 1921—22.
- JEFFREYS, H. *The Earth*, Cambridge 1929.
- JENNY, H. *Die alpine Faltung*, Berlin 1924.
- KOBER, L. *Die Orogentheorie*, Berlin 1933.
- SITTER, L. U. DE, The principle of concentric folding and the dependence of tectonical structure on original sedimentary structure. *Proc. Kon. Nederl. Akad. v. Wetensch.* 42, 1935, 5.
- SONDER, R. A. Die erdgeschichtlichen Diastrophismen im Lichte der Kontraktionstheorie. *Geol. Rundschau*, 13, S. 217, 1922.
- STAUB, R. *Der Bau der Alpen*. *Beitr. geol. Karte der Schweiz*, N. F. 82, 1924.
- VENING MEINESZ, F. A. *Gravity Expeditions at Sea*, Delft 1934.

Manuskript eingegangen den 10. Oktober 1940.
