Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 22 (1964)

Artikel: Erdbeben und Gebirgsbildung
Autor: Furrer, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-319520

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: 11.08.2025

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

H. Furrer

Erdbeben und Gebirgsbildung

«In einem gewissen Sinne können alle Erdbeben als Nachbeben der ursprünglichen Geburtskatastrophe der Erde angesehen werden.» B. F. Howell[1]

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	2
II. Haupteigenschaften der Erdbeben	3
1. Focus	3
2. Entladung	4
3. Energiemenge	4
4. Energiespeicherung	4
5. Energieunterschiede	4
6. Tiefe der Foci und Stärke der Beben	5
7. Bruchbildungen und Zerstörungen	5
8. Schocksystem	5
9. Isoseismalkurven	6
10. Verbindung mit Vulkanausbrüchen	6
11. Lichterscheinungen und magnetische Feldänderungen	7
12. Verteilung der Foci	7
III. Ursachen der Erdbeben	8
1. Vertikalverschiebung	8
2. Horizontalverschiebung	9
3. Beziehung zur Isostasie	10
4. Faltung	12
5. Bruchtektonik	13
6. Erklärbarkeit der Eigenschaften der Erdbeben durch die Theorie der tektomechanischen Ursachen	20
IV. Postulat	23

[1] 1959, S. 86.

Seite

V. Die Annahme von Explosionen als Ursache der Erdbeben 23

VI. Die Explosions-Hypothese in bezug auf die Gebirgsbildung 23
1. Wirkung der Erschütterungen 24
2. Hitzewirkung 24

VII. Magmatektonischer Mechanismus der Gebirgsbildung 26
1. Senkungsphase 28
2. Isostatische Hebung 32
3. Erosion 34

VIII. Die Haupteigenschaften von Kettengebirgen 40

IX. Vermutungen 43

I. Einleitung

Das Problem der Erdbeben ist bis heute vor allem von Geophysikern behandelt worden. Der Zusammenhang von Erdbeben und Gebirgsbildung ist aber offensichtlich, so daß einige Betrachtungen vom Gesichtspunkte eines Geologen aus erlaubt sein dürften.

Das Erdbeben vom Januar 1946 mit Epizentrum zwischen Leuk und Sierre im Kanton Wallis hatte vor allem das Gebiet der inzwischen veröffentlichten geologischen Karte Blatt Gemmi betroffen. Bei der geologischen Kartierung von Blatt Gemmi für die Schweizerische Geologische Kommission konnte ich im folgenden Sommer keine Anzeichen tektonischer Verschiebungen finden, sondern nur oberflächliche Erscheinungen wie Bergstürze, Erdrutsche, Steinschlag und Störungen einzelner Quellen.

Auf ein Gesuch des Verfassers hin überprüfte die Schweizerische Geodäsie gewisse Vermessungspunkte zwischen Lenk und Montana. Es wurden dabei keine Veränderungen festgestellt.

Am 10. Juni 1956 erfolgte ein starkes Erdbeben in Zentral-Afghanistan mit Epizentrum in Kerman westlich Doab. Diese Gegend ist geologisch unserem Juragebirge sehr ähnlich und befindet sich an der Nordabdachung des Hindukushgebirges. Unmittelbar nach der Erschütterung hatte der Verfasser Gelegenheit, dieses Gebiet zu untersuchen, ohne aber Anzeichen von tektonischen Veränderungen zu finden. Es wurden Bergstürze, Stauseebildungen, Steinschlag, zerstörte Dörfer und eine gewaltige Staubentwicklung angetroffen. Die afghanische Regierung stellte damals

auch die Frage nach der Ursache des Erdbebens, und seitdem wurde von uns das Problem näher verfolgt.

Bekanntlich wurden in andern Erdbebengebieten im Gefolge von Erdstößen oft tektonische Verschiebungen festgestellt. Deshalb kann die Ursache von Erdbeben nur unter Berücksichtigung weltweiter Beobachtungen erörtert werden.

Eine Durchsicht der vielfältigen Literatur über Erdbeben läßt erkennen, wie schwierig es ist, die Ursache der seismischen Erschütterungen klarzustellen. Wir suchen vergeblich nach eindeutigen Beweisen der geltenden Anschauungen. Wenn wir in unvoreingenommener und konsequenter Weise argumentieren, so stoßen wir auf Unsicherheiten und Widersprüche, welche sich noch verdichten, je mehr neues Tatsachenmaterial hinzukommt.

Die Erforschung der Ursache der Erdbeben erscheint aber für die Auffassung der Gebirgsbildung von wesentlicher Bedeutung. Deshalb sei hier der Versuch unternommen, mehr von der feldgeologischen als von der theoretischen Seite aus die Möglichkeiten einer Neuorientierung darzulegen.

Ein großer Teil der hier angeführten Daten stammt aus BENJAMIN F. HOWELL, jr., «Introduction to Geophysics 1959» [2]. Dieses Buch enthält eine ausgezeichnete Zusammenfassung der modernen Daten und Anschauungen über den Stoff und ist vor allem wertvoll wegen der offenen Aussprache auch über die Tatsachen, welche im Widerspruch zu den heute herrschenden Auffassungen stehen.

II. Haupteigenschaften der Erdbeben

Es soll hier in kurzer Form eine Rekapitulation der wichtigsten heute bekannten Eigenschaften der Erdbeben gegeben werden, da sie für das weitere Vorgehen der Darlegungen wesentlich ist.

1. Focus

Jedes Erdbeben besitzt einen praktisch punktförmigen Focus, auch Hypozentrum genannt. Dieser Focus ist der Ausgangspunkt der seismi-

[2] Die folgenden Fußnoten mit 1959 beziehen sich auf dieses Werk.

schen Energieentfaltung. Von ihm ausgehend breitet sich die Energie in allen Richtungen aus.

2. Entladung

Ein Erdbeben erscheint immer als kurzer Schlag oder als Folge von Schlägen mit Nachvibrationen. Einzelne Erdbeben wurden als einziger kurzer Schlag registriert. Das Erdbeben ist das erdgeschichtliche Ereignis von Bedeutung, das weitaus die kürzeste Zeitdauer aufweist.

3. Energiemenge

Die Energiemengen, welche bei mittleren oder starken Erdbeben frei werden, sind von außerordentlichem Ausmaß. Die stärkeren Beben übersteigen momentan bei weitem alle Energieäußerungen, welche wir auf der Erde kennen. Dies setzt auch voraus, daß entsprechende Energiereserven vorhanden sind. Bei einem mittleren Erdbeben werden rund 10^{19} erg frei. Beim stärksten je gemessenen Erdbeben, demjenigen von Columbia 1906, wurden $2 \cdot 10^{25}$ erg frei. Zum Vergleich sei erwähnt, daß die Explosion von konventionellem Sprengstoff in Oppau 1921 ungefähr $6 \cdot 10^{19}$ erg erzeugte; als Grundvibration wurden $5 \cdot 10^{16}$ erg in ganz Europa registriert. Eine stärkere Atombombe dürfte Erschütterungen von Stärke eines mittleren Erdbebens erzeugen können.

4. Energiespeicherung

Die Momentanauslösung großer Energiemengen setzt weiterhin die Möglichkeit der Energiespeicherung voraus. Es muß dies ein System der Energiespeicherung sein, welches ganz dicht arbeitet. Die Energie muß durch ein hartes Auslösungssystem aufgehalten werden, um im gegebenen Zeitpunkt die ganze Menge der gespeicherten Energie entbinden zu können.

5. Energieunterschiede

Um die Größenordnungen der Unterschiede in den Energieentfaltungen der verschiedenen Erdbeben darzulegen, erwähnen wir:

Ein schwaches, aber noch registrierbares Erdbeben (Mikrobeben) entfaltet eine Energiemenge von 10^{6} erg, ein mittleres 10^{19} erg, ein starkes bis über 10^{25} erg. Wir machen hier auf die riesigen Energieunterschiede, welche in das Trillionenfache gehen, aufmerksam.

6. *Tiefe der Foci und Stärke der Beben*

Die Tiefe der Foci bewegt sich zwischen 10 und 700 km unter der Erdoberfläche. Die Stärke scheint mit der Vertikalstreuung in keinem offensichtlichen Zusammenhang zu stehen, indem praktisch jede Stärke in jeder Tiefe auftreten kann bis 700 km. Schwache Beben scheinen eher weniger tiefe Foci zu besitzen. Jedenfalls ist kein Anhaltspunkt zu finden, daß größere Beben an die starreren Oberflächenregionen gebunden wären.

7. *Bruchbildungen und Zerstörungen*

Bekanntlich sind die starken Erdbeben begleitet von Bruchbildungen im Gestein, Verschiebungen und anderen Oberflächenstörungen und Zerstörungen über weite Gebiete. Dies veranschaulicht die großen momentan frei werdenden Energiemengen. Auf Grund dieser Zerstörungswirkung können die Isoseismalkurven aufgezeichnet werden, welche Linien gleicher Zerstörungsintensität darstellen. Viele Erdbeben zeigen aber keine tektonischen Verschiebungen, selbst wenn sie Stärken über 7 erreichen. Die tektonischen Verschiebungen übersteigen auch in den äußersten Fällen horizontal nie 10 m; vertikal wurden einmal in Kanada an einer Stelle 14 m festgestellt. Die Verschiebungen halten sich aber immer an bereits bestehende tektonische Linien. In Alluvialgebieten erfolgen Störungen oft längs Flußläufen oder anderen bestehenden morphologischen Linien.

8. *Schocksystem*

Die Energieentfaltungen äußern sich bei Erdbeben als Schock. Es kommen Beben vor mit schwächerem Vorschock und starkem Hauptschock und nachkommenden Nachschocks. Viele starke Beben waren aber auch ohne Vorschock. Das Beben von S. Francisco 1906 hatte keinen Vorschock. Das Beben in Chile von 1922 wurde nur als ein einziger Schlag registriert und hatte weder Vor- noch Nachschocks. Nachschocks sind viel häufiger als Vorschocks. Ganze Reihen von Mikrobeben können an Erdbeben anschließen. Mikrobeben zeigen eine gewisse Kontinuität, wogegen eigentliche, stärkere Erdbeben immer nach einem scharfen, schockartigen Beginn nach kurzer Zeit, einigen Sekunden oder höchstens Minuten, abklingen. Das Abklingen selbst kann in gewissen Fällen Tage dauern. Erdbeben sind aber in ihrer Haupterscheinung rasch vorüber-

gehende Energieäußerungen. Nachschocks und Mikrobeben können den Hauptschlägen in Schwärmen folgen, wobei Frequenz wie Stärke ungefähr hyperbolisch abnehmen. Die Schwärme treten in der gleichen Region auf wie die Hauptschläge.

Es ist sehr selten, daß innert einigen Monaten oder sogar Jahren mehr als ein größerer Schock in der gleichen Lokalität auftritt. Vorschocks sind kleinere Erdbeben, welche oft innerhalb eines Monats vor dem Hauptschock auftreten können.

9. Isoseismalkurven

Bei tiefen Beben liegen die Isoseismalkurven weit auseinander und die Zerstörungen sind relativ zur Energieentfaltung schwächer. Flachbeben zeigen enge Kurven, also ist die relativ intensive Zerstörung auf engem Raum beschränkt. Dies weist auf ein punktförmiges Hypozentrum hin. Wenn der Untergrund homogen ist, haben die Isoseismalkurven die Gestalt von Kreisen. Sie erhalten auch Kreisgestalt durch einen Gesteinsgrund, der in diffuser Weise geklüftet ist, d. h. wenn keine besondere tektonische Verwerfungstendenz besteht. Die Isoseismalkurven zeigen im allgemeinen eine mehr oder weniger ovale Form, deren Hauptachse parallel zur Hauptverwerfungsrichtung verläuft, da die Vibrationen quer zur Verwerfungstendenz stark absorbiert werden, während sie sich parallel dazu am besten fortpflanzen können. Je stärker die Tendenz der Verwerfungen ist und je älter, tiefer und abgenutzter die Brüche sind, um so langgestreckter werden sich die Isoseismalkurven bei einem Erdbebenschock gestalten. Immerhin sind in allen bekannten Fällen entweder annähernd kreisförmige oder elliptische Formen der Isoseismalkurven festzustellen (1959, S. 96). Das Zentrum dieser Kurven liegt gewöhnlich auf oder nahe dem instrumental festgestellten Epizentrum.

Zum Beispiel waren die Isoseismalkurven des Erdbebens von Tokio 1930 kreisförmig, da die Verwerfungen keine gemeinsame Richtung hatten.

10. Verbindung mit Vulkanausbrüchen

In gewissen Zonen sind Erdbeben von Vulkanausbrüchen begleitet. Diese Beben sind gekennzeichnet durch äußerste Heftigkeit direkt am Herd, aber auch durch sehr rasche Abnahme der Intensität mit wachsender Entfernung. Es sind also immer außerordentlich flache Beben. Wir erinnern dabei an die Explosionsausbrüche des Krakatau im Jahre 1883

und vom Mont Pelé 1902. Beobachtungen flacher Beben werden vor allem in den flegräischen Feldern und auf der Insel Ischia gemacht.

11. Lichterscheinungen und magnetische Feldänderungen

Bei starken, flachen Beben konnten gelegentlich Lichterscheinungen beobachtet werden.

Beim japanischen Erdbeben von 1930 wurden eigenartige Lichter in der Nähe des Epizentrums beobachtet. Ihre Form und Farbe waren veränderlich. An gewissen Orten wurde gemeldet, sie seien so hell gewesen, daß Gegenstände beleuchtet erschienen. Die Farbe der Lichter war blau bis rotgelb. Sie erschienen als einzelne Feuerbälle oder von einem Punkte ausstrahlend. Auch magnetische Feldänderungen wurden beobachtet[3].

12. Verteilung der Foci

Die Verteilung der Erdbebenfoci ist im großen gesehen zonar, weist aber eine starke Streuung auf. Sie geht aus dem Schnitt nach H. BENIOFF hervor (Fig. 3 und 4). Sie ist nicht mit einer ursächlichen Hauptverwerfungslinie zu vereinbaren. Das Bild der Verteilung zeigt, daß nie eine direkte Überlagerung der Foci festgestellt wird, sondern nur Häufungen mit zonarem Charakter, sowohl vertikal als auch horizontal. Als Haupterdbebenzonen der Erde sind zwei große halbkreisförmige Gürtel zu nennen: der eine um den Pazifischen Ozean und der andere Alpen—Himalaya—Westindien. Ausnahmen sind die Beben von New Madrid und Charleston. Rund die Hälfte der Erdbeben wurden aus dem Alpen—Himalaya-Bogen gemeldet. Dagegen wurden nach GUTENBERG und RICHTER 80 % der seismischen Energie im Pazifischen Bogen ausgelöst. Besonders zu beachten ist die Schrägstellung der Zonen der Tiefe nach. Zum Beispiel bei Chile haben flache Erdbeben ihre Epizentren westlich der Küste, mitteltiefe Foci befinden sich an der Küste und tiefe Foci unter der argentinischen Ebene. Sehr ähnlich liegen die Zonen in anderen Orogen-Gebieten wie Japan, Kermadec-Tonga usw. (vgl. Fig. 3 und 4).

[3] 1959, S. 110.

III. Ursachen der Erdbeben

Nach dem Artikel über Geologie in der Ausgabe 1960 der Encyclopaedia Britannica (1960) erzeugen Abrutsche an aktiven Verwerfungen Erdbeben. Der San Andreas Fault wird als Beweis der tektonischen Ursache von Erdbeben angeführt (1960, S. 120).

Bei der Durchsicht der einschlägigen Literatur fallen einige Unstimmigkeiten auf. Wir finden häufig indirekte Zweifel an der Richtigkeit der Theorie der tektonisch erzeugten Erdbeben, wie wir im folgenden noch darlegen werden. Deutlich widersprechende Äußerungen sind ebenfalls vorhanden. Jedenfalls können wir nirgends ein Argument finden, das imstande wäre, die Theorie der tektomechanischen Ursache der größeren Erdbeben befriedigend zu stützen.

Bevor wir weitere Ausführungen auf Grund der bestehenden Fachliteratur darlegen, möchten wir eine uns wesentlich erscheinende tektomechanisch-geologische Betrachtungsweise folgen lassen.

1. Vertikalverschiebung

Gehen wir vom Grundsatz aus, der besagt: die bei einem tektonischen Erdbeben ausgelöste Energiemenge kann nicht größer sein, als der Aufprall eines frei fallenden Gesteinskomplexes auf seine ganze Unterfläche ausmacht.

Wir nehmen einen kompakten, harten, elastischen Gesteinswürfel mit der Kantenlänge von 100 m an und lassen ihn absolut frei um 1 m auf eine hart elastisch reagierende Unterlage herunterfallen. Er darf überdies beim Aufprall nicht in Brüche gehen. Dieser Vorgang wird eine Erschütterungsenergie von $2 \cdot 10^{17}$ erg erzeugen, was erst der fünfzigste Teil der Energiemenge eines mittleren Bebens ist. Ein solcher Gesteinskomplex von der Abmessung $1000 \times 2000 \times 500$ m ergäbe bei einer Fallhöhe von 1 m rund $2 \cdot 10^{20}$ erg. Berechnen wir den Gesteinskomplex und die Fallhöhe, die es braucht, um ein Erdbeben von rund $3 \cdot 10^{25}$ erg hervorzurufen, müßte man einen kompakten Komplex von rund $250 \times 30 \times 2$ km um 10 m fallen lassen.

Abschwächende geologische Faktoren sind:

a) Es gibt keinen kompakten Komplex von dieser Größe. Er wird aus vielen verschiedenartigen Gesteinen bestehen mit Schichtnähten, Mergelzwischenlagen, Glimmer und anderen Diskontinuitäten.

b) Vor allem aber ist es die Klüftung, welche verbietet, daß der Komplex als ganze Einheit sich bewegen kann. Der Komplex wird in ein ganzes System von Paketen und Einzelstücken aufgeteilt sein. Beim San Andreas-Fault in Kalifornien bewegten sich die Gesteinskomplexe beiderseits der Verwerfung nicht als starre Blöcke. Es wird zwischen den einzelnen Teilkomplexen eine hohe Reibung auftreten. Durch diese Aufteilung liegt der Aufschlag der ganzen Masse auf ihre Unterlage in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde außerhalb jeder Möglichkeit.

c) Weiter setzt diese Berechnung einen totalen Hohlraum von der Höhe von 1 bis 10 m voraus. Solche Hohlräume gibt es aber nicht. Gesteinsfreie Räume sind entweder mit Wasser, Erdöl oder mit Gas gefüllt. In wenigen Sekunden könnte keines dieser Füllmedien ausgetrieben werden. Der Gesteinskomplex oder die einzelnen Pakete werden darauf abgestellt wie auf ein Kissen, das sich vielleicht langsam zusammendrücken läßt, aber jede größere Schockwirkung verunmöglicht.

Die gewaltige Energie von 10^{19} bis 10^{25} erg muß bis zum Augenblick der Auslösung vom Gestein mechanisch gespeichert werden. Dies müßte durch Auflage auf eine Kante, durch Pressung und plötzliches Nachlassen geschehen. Die Druckfestigkeit der Gesteine genügt aber für diesen Vorgang bei weitem nicht.

d) Die plastische Deformierbarkeit der Gesteine in größeren Tiefen spricht an sich schon gegen die Möglichkeit der Schockwirkung durch Bruch und ist eine weitere Gesteinseigenschaft, welche speziell die Energiespeicherung auf mechanischem Wege ausschließt. Zur mechanischen Energiespeicherung wird die Möglichkeit der Abstützung großer Gesteinskomplexe auf relativ sehr kleine Zonen erforderlich sein. Das Gestein wird aber gerade in den Tiefen unter 20 km in solchen Druckzonen unelastisch deformiert, gefaltet und nicht gebrochen, da es sich plastisch verhält.

2. *Horizontalverschiebung*

Wir gehen wiederum vom Satz aus: Die bei einem tektonischen Erdbeben schlagartig ausgelöste Energiemenge kann nicht höher sein, als die Überwindung des Scherwiderstandes eines kompakten Gesteinskörpers ausmacht; dieser ist proportional zur Querschnittsfläche der zu brechenden Masse.

Gewisse Quarzite haben Scherfestigkeiten bis 3000 kg/cm². Wenn wir einen Querschnitt von 1 cm² Quarzit mit einer Kraft von 3000 kg absche-

ren, so entsteht eine Erschütterung von 10^7 erg, vorausgesetzt, daß das Widerlager nicht weicht. Im Augenblick des Bruches nimmt die Kraft ab und gleichzeitig setzt der Reibungswiderstand ein. Die maximale Schockenergie ist also beim Aufprall des verschobenen Gesteinskörpers auf das Widerlager nach einer kurzen Verschiebungsstrecke, welche nahe der elastischen Gesteinsverformung liegt, zu erwarten. Ein Querschnitt von 1 m^2 desselben kompakten Quarzites ergibt dann beim Bruch 10^{12} erg, 1000 $m^2 \rightarrow 10^{15}$ erg, 1 $km^2 \rightarrow 10^{21}$ erg, und wenn wir die maximale Energiemenge von 10^{26} erg erreichen wollten, müßte ein Quarzit mit einem Querschnitt von rund 1000 km^2 gebrochen werden.

Die Schockenergie abschwächenden Faktoren sind:

a) Es gibt keinen kompakten Gesteinskomplex von so großen Querschnittflächen. Wir können sagen, daß es auch keinen ungeklüfteten und in der Textur undifferenzierten Gesteinskomplex gibt, der einen Querschnitt von mehr als 1 km^2 aufweist. Klüftung und texturelle Differenziation verunmöglichen auch hier eine Kräfteballung von der Größenordnung nur eines mittleren Erdbebens.

b) Die Reibung und das Ausweichen der angrenzenden Gesteine sind schwer zu fassende, aber sicher stark Schock vermindernde Faktoren.

Eine namhafte Energiespeicherung ist deshalb auch auf dem Wege der Abscherung undenkbar.

Schlußfolgerung:

Geologisch sind die dem Gestein zugemuteten Eigenschaften, wie sie für die tektomechanische Ursache eines Erdbebens nötig wären, so unrealistisch, daß die Vertikal- oder Horizontalverlagerung auch nicht für die Erklärung von Erdbeben mittlerer Größe herangezogen werden dürfen.

3. Beziehung zur Isostasie

Die isostatischen Vorgänge sind heute schon so weit erforscht, daß an ihnen nicht gezweifelt werden kann.

Es ist durch die Arbeiten von Ewing bekannt geworden, daß die Westküste der Vereinigten Staaten von Nordamerika sich senkt, und zwar wegen der wachsenden Last der sich anhäufenden Sedimente. Die Gebirge werden durch Abtragung erleichtert und isostatisch gehoben. Die Hebung macht aber nicht so viel aus wie der Abtrag, was zur Folge hat, daß zuletzt die ganze Kontinentalplatte unter dem Meeresspiegel liegt.

Durch Bohrungen wurde die Anwesenheit von Landablagerungen unter dem heutigen Meeresboden bewiesen. Man weiß ferner, daß sich Mississippi- und Nildelta ebenfalls im Maße der Ablagerung stetig senken. Norwegen hebt sich in dem Maße, wie die Abschmelzung seiner Eiskalotte fortschreitet. Wie die Isostasie in kleineren Maßstäben wirkt, bleibt, besonders im Alpengebiet, noch näher zu untersuchen.

Sicher ist, daß die isostatischen Bewegungen in der Erdkruste stetig und nicht ruckweise vor sich gehen. Abströmung bzw. Zuströmung subkontinentaler Teile muß angenommen werden, um die isostatischen Angleichungen und Normalisierungsbewegungen zu ermöglichen (1959, S. 235—37).

Die Isostasie setzt eine oberste Erdkruste von wesentlicher Plastizität voraus. Diese Plastizität in größeren Gesteinsmassen beruht bekanntlich nicht nur im Kleinbereich auf der Verschiebbarkeit zum Beispiel der Kalcit- und Glimmerspaltflächen usw., sondern noch mehr im Großbereich auf der Klüftung, Clivage und allgemein der relativ leichten Verscherbarkeit der Gesteinslagen gegeneinander durch Texturdifferenziation. Die Plastizität ist im Groß- und Kleinbereich außerordentlich erleichtert durch die Stratifizierung und Härtedifferenziation der Gesteine. Bei der tektonischen Erzeugung mittlerer Erdbeben könnte es sich nachgewiesenermaßen nur um Massen von der Größe ganzer Gebirgsketten handeln. In diesen Dimensionen verhält sich die Erdkruste plastisch. Das Phänomen der Isostasie beweist diese Plastizität und spricht somit gegen die Möglichkeit, daß stärkere Erdbebenstöße auf tektonisch-mechanischem Wege entstanden sein könnten.

Im Buch von HOWELL werden die Aspekte der erwiesenen Plastizität der Erdkruste erörtert. Er sagt: «... in den Tiefen, wo der Fels plastisch ist, werden die Spannungen ausgeglichen durch Fließbewegung. Nur wenn sich die Spannungen rasch aufbauen oder der Felsen spröde-hart ist, können tektonische Beben auftreten»[4]. Was bedeutet für den Geologen aber «rasch» oder «spröde-hart»?

An einer andern Stelle schreibt HOWELL aber auch: «Die Bewegungen, welche den Streß erzeugten, fanden lange vor dem Erdbeben statt»[5]. Für einen Zusammenhang zwischen Isostasie und Erdbeben sprechen keine Argumente oder Beobachtungen.

[4] 1959, S. 247.
[5] 1959, S. 255.

4. Faltung

Die Gesteinsfaltung ist wohl einer der bedeutendsten und klarsten Beweise der Plastizität der Erdkruste. Diese so allgemeine Erscheinung ist nicht vereinbar mit einer Starrheit der Erdkruste, wie sie für tektonisch erzeugte Erdbebenerschütterungen erforderlich wäre. Die Tatsache der Faltung an sich spricht auch schon gegen die Möglichkeit der Erzeugung stärkerer Erdbeben durch tektonische Vorgänge.

Wir dürfen nicht von der Art der Fortpflanzung der seismischen Wellen auf Starrheit des Gesteins im Sinne der Unplastizität schließen. Auch Flüssigkeiten reagieren sehr hart und elastisch auf den seismischen Schlag, trotzdem dürfen wir daraus nicht schließen, daß sie deswegen nicht beweglich seien. Im Kleinbereich und in der schlagartig kurzen Zeitdauer eines Erdbebens reagiert ein Gestein hart und elastisch, und gegenüber einem konstanten, lang andauernden Streßdruck verhält sich das gleiche Gestein als große Masse ausgesprochen unelastisch-plastisch und ergibt Deformation als Faltung oder Verlagerung an bestehenden Bruchflächen. Die Plastizität ist natürlich von der Dichte und dem allseitigen Druck unabhängig. Dagegen muß die Plastizität stark zunehmen bei steigender Wärme. Bei 700 km Tiefe können wir eine Temperatur von 1800 ° C annehmen (siehe Fig. 2). Wenn wir den Wassergehalt des Magmas in Betracht ziehen, so müssen wir auch Schmelzfluß in dieser Tiefe erwarten.

Wir möchten diese Verhältnisse am besten durch ein Zitat HOWELLS belegen[6]: «Sogar diejenigen, welche es als unmöglich erachten, daß der Mantel der Erde flüssig sein könnte, sprechen von der Erde, sie reagiere wie eine Flüssigkeit. Die Antwort darauf ist, daß bei zeitlich sehr kurzer Einwirkung von Kräften die Erde als starrer Körper reagiert; bei lang andauernden Streßdrucken aber verhält sie sich wie eine Flüssigkeit». Wir möchten nicht einmal so weit gehen, sondern nur sagen, daß die Erdkruste bei lang andauernden Spannungsdrucken in großen Massen plastisch deformierbar ist. Sie braucht deshalb noch lange nicht viskos oder gar flüssig zu sein. Durch erhöhte Temperatur in einigen 100 km Tiefe ist aber bereits ein Übergang zur Viskosität anzunehmen und von da an sind Bruchbildungen, wie wir sie an der Oberfläche beobachten, ausgeschlossen. Die Faltung gibt den normalen Ausgleich auf Streßdruck. Wir zitieren nochmals HOWELL: «So wie der Druck zunimmt, nimmt die

[6] 1959, S. 238.

Bruchfestigkeit zu, und bei den Temperaturen und Drucken, wie sie in den tieferen Regionen der Kruste oder des Mantels der Erde herrschen, ist Festigkeit allgemein geringer als die Bruchfestigkeit, so daß sich das Gestein plastisch verhält» [7].

HOWELL sagt weiter darüber: «Wenn die Elastizitätsgrenze überschritten ist, so braucht ein Körper nicht immer zu brechen. Er kann eine dauernde Formänderung erfahren zu seiner elastischen Deformation ohne irgendwo zu brechen». Das würde Deformation ohne Erzeugung von Erdbeben bedeuten. «Unelastisches Nachgeben, in dem kein Auseinanderbrechen auf versteckten Flächen stattfindet, nennt man plastisches Fließen» [8]. In diesem Falle entsteht die Faltung, wie HOWELL sagt: «Die Tatsache der gefalteten Gebirge legt nahe, daß die Gesteine in einem beträchtlichen Maße durch plastischen Fluß nachgeben zusätzlich zum beobachteten Bruch» [9].

HOWELL äußert sich über einen Modellversuch wie folgt: «Die mechanischen Eigenschaften des Modells müssen solche Werte haben, daß sich das kleine Modell genau so verhält wie sein großes natürliches Gegenstück (HUBBERT 1937). Dies erfordert die Anwendung von weichem, plastischem Material» [10]. Also nicht von starrem Stahl! Dies ist indirekt wieder eine Bestätigung, daß sich ein im Kleinbereich (zeitlich und volumenmäßig) starr verhaltendes Gestein im Großbereich plastisch verhält. Und die Erdbebenenergien könnten sich tektomechanisch nur im Großbereich bilden, also in einer plastischen Masse.

5. *Bruchtektonik*

Die Bruchtektonik könnte als allgemein auftretendes geologisches Phänomen für die Stützung der Theorie der großen tektonischen Erdbeben in Frage kommen. Gerade sie erscheint aber nach unserer Anschauung nicht als Ursache, sondern als unmittelbare Folge von Erdbebenerschütterungen. Die in Betracht fallenden Querschnitte der gebrochenen Gesteine reichen zur Erklärung der Energiemengen mittlerer Erdbeben nicht aus (siehe Abschnitt III, 2). Wir können uns vorstellen, daß ein Erdbebenschock bestehende Spannungen in der Erdkruste durch Erzeugung von Gesteinsrissen löst. Die Spannungstendenz

7 1959, S. 247.
8 1959, S. 244.
9 1959, S. 280.
10 1959, S. 317.

führt dabei zu einer Scharung von Rissen. Später wieder aufbauende isovergente Spannungsdrucke vergrößern die Sprunghöhen und Verschiebungen. Weitere Erdbeben können den Vorgang der Verschiebungen auf den bestehenden kleineren Brüchen vergrößern und vertiefen und Scharungen der Inizialbrüche zu größeren Verwerfungen und Verwerfungszonen zusammenlegen. HOWELL schreibt: «Wahrscheinlich sind die meisten der unzähligen beobachteten Brüche in Gesteinen durch Erdbebentätigkeit erzeugt» [11]. Nach unserer Auffassung sind die Erdbeben die Urheber der Bruchtektonik. Ohne sie würden sich die Spannungen und Streßdrucke nur in Form von Faltung, Stauchung oder Auseinanderziehen ausgleichen.

Die S. Andreas-Verwerfung kann an der Oberfläche auf 1000 km verfolgt werden. Beim Beben von 1906 war die Horizontalverschiebung 7 m und konnte mit Unterbrüchen auf einer Länge von 432 km beobachtet werden. Die unmittelbar vom Erdbeben von 1906 herrührenden Deformationen waren nicht der ganzen Länge nach kontinuierlich. Vertikale Verschiebungen waren selten, ausgenommen im Norden von S. Francisco, wo sie den relativ geringen Betrag von 0,9 m ausmachten. Sie waren aber nicht gleichgerichtet. Die Masse südwestlich der Verwerfung wurde an mehreren Stellen gehoben. Weniger häufig wurden Hebungen an der Gegenseite festgestellt. Gewöhnlich reichte die gehobene Partie nicht weiter als wenige hundert Meter entlang der Verwerfung.

Die oberflächliche Erscheinung war gewöhnlich nicht ein einfacher Bruch, sondern eher eine gestörte Zone von weniger als 1 m Breite. Ein Kamm von 1 bis 3 m Breite und bis 45 cm Höhe war der gewöhnlichste Typus der Veränderungen. An andern Stellen dagegen bezeichnete ein flacher Graben mit unebenen, niedrigen Seitenwänden die Bewegungszone. Wieder an anderen Stellen war der Boden von einem System ungefähr paralleler Spaltung durchzogen, welche in einem Winkel von durchschnittlich 45 ° zur Hauptverwerfung standen. Wesentlich ist die Feststellung, daß die Verlagerung nicht ein einfacher Bruch, sondern über 10 verschiedene Bruchstellen verteilt war. Frühere Verwerfungen, wohl über 20 Millionen Jahre alt, sind verantwortlich für Totalverschiebungen von mehreren Meilen. Durch Messungen ist erwiesen, daß dort ständig und anscheinend kontinuierlich Verschiebungen vor sich gehen (etwa 3 cm pro Jahr), Verschiebungen, welche ganz offensichtlich keine Erdbeben erzeugen. Dies zeigt, daß die Spannungsdrucke an bestehenden

[11] 1959, S. 107.

Verwerfungen ständige und rucklose Verschiebungen von Gesteinskomplexen nach sich ziehen.

Auch im Ölfeld von Buena Vista in Kalifornien wurden Bruchbildungen festgestellt, die keine Erdbeben erzeugten. Es wurden dort gegenwärtig vor sich gehende Verschiebungen an bereits bestehenden Verwerfungen beobachtet und beschrieben (KOCH 1933, Analysis and effects of current movement on an active fault in Buena Vista Hills oil field: Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 17: 694—712).

Die Scherzone entlang dem W-Fuß der Anden ist nicht eine einzige Verwerfung, denn ihre Spuren folgen der unregelmäßig verlaufenden Küstenlinie, dem Kontinentalrand. Die Erdbebenzone hat dort eine Länge von 4500 km. Die Aufzeichnungen zeigen einen regelmäßigen Spannungsausgleich.

Das außerordentlich starke und unvermittelt schlagartige Erdbeben von S. Francisco konnte natürlich den bestehenden Streßdruck plötzlich entspannen durch Verschiebung an der Hauptverwerfung um den relativ kleinen Betrag von stellenweise 7 m im Maximum. Die Vertikalverschiebungen waren der Hauptverwerfung nach verschieden; oft war die eine Seite gesenkt oder gehoben, oft die andere gehoben. Eine einheitliche Bewegung der beiden Seiten der Hauptverwerfung war nicht vorhanden.

Nach HOWELL handelt es sich bei den größeren tektonischen Erdbeben um scharfen Bruch («crack») der Gesteine. Am Beispiel des S. Andreas-Fault kann es sich aber offensichtlich nicht im wesentlichen um neuen Bruch handeln. Der hohe Streßwiderstand des frischen, ungebrochenen Gesteins im Kleinbereich kann hier, wie auch bei allen größeren Erdbeben, nicht in Betracht fallen für die Schockerzeugung auf mechanisch-tektonischem Wege. Es ist geologisch undenkbar, daß längs eines seit langem bestehenden Bruches Streßwiderstände für Energiespeicherung auftreten können, welche höher wären als die Streßwiderstände im kompakten, ungebrochenen Felsen und damit ein Erdbeben mit der Energieentfaltung von der Größenordnung von 10^{25} erg erzeugen könnten.

Ebenfalls ist eine derartige vollständige mineralische Verheilung und Verkittung der Verwerfungen in den Zeitspannen zwischen zwei Erdbeben nicht in der Art möglich, daß die Naht wie ein festes Gestein wirken könnte. Dazu ist die Zeitspanne viel zu kurz, und übrigens wurden auch in der Zwischenzeit langsame Bewegungen festgestellt.

In der Encyclopaedia Britannica ist denn auch zu lesen: «Es ist schwierig, in den historischen Aufzeichnungen 20 Erdbeben zu finden, in denen glatt gebrochene Oberflächenfaltung beobachtet wurde, die von einer

genügenden Größe gewesen wären, um eine vernünftige Ursache für eine Erschütterung anzuzeigen. Viele Brüche erwiesen sich als durch Erschütterung entstanden[12].

Es wurde vom Erdbeben 1899 in Alaska überliefert, daß die Küste um 14 m gehoben worden sei. Dies kann durch Auslösung eines latenten isostatischen Druckes oder aber durch Unterwasserabrutsch und Verkantung der betreffenden Küstenpartie erfolgt sein.

Die Hauptstütze der Theorie der tektomechanischen Erdbebenerzeugung sind die Ovalformen der Isoseismalkurven. In der Encyclopaedia Britannica wird ausgeführt, daß die Isoseismalkurven häufig ovale Form aufweisen, welche eine linear gelagerte Kraftquelle oder eine senkrechte Fläche beweisen sollen: «Diese Zentral-Ovale sind häufig längs einer bekannten Verwerfung gelegen und bestätigen die Theorie, daß die Verwerfungen die Quelle von Erdbeben darstellen». Tatsächlich zeigen nur einige der größeren Erdbeben ovalförmige Isoseismalkurven längs bekannten Verwerfungen. Bei andern ist dies klar nicht der Fall. Weiter lesen wir denn auch in der Encyclopaedia Britannica die Bemerkung: «Das Erdbeben von Tokio (1930) war deutlich zentrisch und die Verwerfungen hatten verschiedene Richtungen»[13]

Die ovale Form der Isoseismalkurven muß entstehen, wenn von unten her ursprünglich zentrische Wellen ein stark gerichtetes Verwerfungssystem in der obersten Erdkruste durchlaufen. In Richtung der Verwerfungen breiten sich die Wellen besser aus als quer dazu. Die Abschirmung an den Diskontinuitätsflächen von starken Verwerfungen ist so bedeutend, daß die isoseismalen Zerstörungslinien rechtwinklig zu ihnen stark zusammengedrängt werden und Energie refraktiert und absorbiert wird. Gerade diese Absorption verursacht die starke mechanische Inanspruchnahme der Bruchflächen und der angrenzenden Gesteinskomplexe. In einem Gebiet von so deutlich isovergenter Verwerfungsstruktur wie am S. Andreas-Fault muß deshalb eine langgezogene Form der Isoseismalkurven entstehen, ohne daß man daraus schließen dürfte, die Verwerfung sei die Ursache des Bebens gewesen.

Die Bruchtektonik als Ursache von Erdbeben ist in großen Tiefen von einigen 100 km noch viel weniger erklärbar als in höheren Erdkrustenteilen. Eine Erhöhung der Plastizität bei zunehmender Tiefe ist als sicher anzunehmen. Mit zunehmender Tiefe und steigendem Druck muß das

[12] 1960, S. 846c.
[13] 1960, S. 848c.

Gestein im Sinne großer Zeitspannen allmählich in den hydrostatischen Zustand übergehen. Dies wird in den Tiefenzonen, in den Zonen der metamorphen Gesteine, durch deren Verformungstendenzen veranschaulicht. Mehr und mehr gegen größere orogenetische Tiefen zu treten Bruchbildungen zurück. Statt dessen sind bruchlose, lang ausgezogene Muldenschenkel, Tauchfalten, Einwicklungen, Deckenverschleppungen in bis heute unbekannte Tiefen die Regel. Die Encyclopaedia schreibt dazu: «Es ist schwierig, sich gewöhnliche Bruchbildung in großen Tiefen vorzustellen, obschon die Seismogramme solcher Erschütterungen eine Quelle ähnlich der flachen Erdbeben nahelegen durch die geographische Verteilung von Kompressionen und Ausdehnungen in der ersten Welle auf dem Seismogramm»[14]. Man vergleiche dazu Abschnitt III 4 (Faltung).

Charles Davison schloß aus den großen gleichzeitigen Zerstörungen von Lissabon, Fez und Algier 1755, daß mehr als eine Energiequelle vorhanden war. Jedenfalls ist dieser Zusammenhang, da diese Städte geographisch so weit auseinander liegen, unmöglich durch Tektomechanik zu erklären. Es ist eher anzunehmen, daß entweder der Focus sehr tief lag und es sich somit um ein Erdbeben höchster Energieentfaltung handelt, um an der Oberfläche noch über solche Zerstörungskräfte zu verfügen, oder es waren zwei oder mehrere Foci vorhanden, welche sich gegenseitig beeinflußt hätten.

Als rein theoretische Überlegung müßte vom Standpunkt der tektomechanischen Erzeugung der Erdbeben Spannung im Gestein gleich Stärke des Erdbebens sein. Dies ist aber eine reine Annahme ohne irgendeine Stützung durch Beobachtungstatsache. Eigentlich handelt es sich nicht um Spannung, sondern um gespeicherte Energie. Tatsächlich ist die Spannung proportional zur Dauer der Verlagerungszeit. Beide Daten sind sehr schwierig zu kontrollieren. Benioff (1955) hat gezeigt, daß diese Daten nicht mit der Stärke der Erdbeben übereinstimmen. Starke Erdbeben hatten oft gar keine Verschiebungswirkung auf das Gestein.

Es wurde festgestellt, daß Verschiebungen an Verwerfungen ständig in der gleichen Richtung vor sich gehen, entsprechend dem latenten Streßdruck. Das Erdbeben rüttelt die Gesteinsmassen ruckweise in Streßdruckrichtung weiter. Der Vorgang ist wie ein Einrütteln. Nach Abschluß des Erdbebenstoßes in Japan 1930 ging die Bewegung mit abnehmender Geschwindigkeit weiter, unter Erzeugung von Mikrobeben.

[14] 1960, S. 845.

Zehn Monate nach dem Beben war die Bewegungsgeschwindigkeit noch 0,001 mm pro Tag. Oft wurden auch Bewegungen gleichzeitig an verschiedenen Brüchen festgestellt. Oder die Bruchbildung erfolgte auf einem bestehenden Seitenast eines Bruches und anderswo erschien ein neuer Zweig.

Die Verwerfungen folgen im allgemeinen dem Fuß der Berge, wobei einige mit den alten Brüchen zusammenfallen und andere nicht. Im großen und ganzen erhalten wir das Bild einer regellosen Vielfalt der Bewegungen, das nach dem schon bestehenden Bruchsystem gestaltet ist. Es ist das Bild der Erschütterungswirkung auf die bestehende Bruchtektonik in den obersten Erdkrustenteilen und der Oberflächenwirkungen wie Bergstürze, Bruch von Gesteinen, Einstürze, Senkungen, Abrutsche und Spalten in Lockergesteinen, vor allem auch Rutsche am Meeresgrund.

HOWELL schreibt: «In gewissen Fällen hat Verschiebung stattgefunden an der Verwerfung während der Zeit des Erdbebens. Der Zusammenhang zwischen Bruchbildung und Erdbeben ist so gut, daß man glaubt, daß die große Mehrheit der Erdbeben irgendwo von Bruchbildung begleitet ist, gewöhnlich tief unter der Oberfläche der Erde» [15]. So tief können wir aber keine Bruchbildung feststellen. Wir glauben nicht, daß diese Formulierung geeignet ist, die Theorie der tektomechanischen Ursache der Erdbeben zu stützen.

Die Rebound-Theorie beruht auf der Auffassung der Erzeugung von Erdbebenerschütterungen durch tektomechanische Energiespeicherung. Dies scheint uns eine für wirkliche geologische Verhältnisse schwer anwendbare Theorie zu sein, denn auch HOWELL flechtet nach der Besprechung der Bruchfestigkeit der Gesteine den Satz ein: «Dies gilt nur, wenn sicher ist, daß keine natürlichen Diskontinuitäten im Gestein vorhanden sind» [16]. Das heißt, es dürfen dazu keine Klüfte, Brüche, Clivage und keine wesentlichen Texturdifferenziationen und Schichtungen vorhanden sein. Unsere ganzen hier dargelegten Betrachtungen über die Tektomechanik beruhen aber gerade auf diesen geologischen Tatsachen der mechanischen Wirkung der verschiedenen Diskontinuitäten in größeren Gesteinskomplexen. HOWELL fährt dann auch fort: «Gesteinskomplexe sind allgemein von geringer Scherfestigkeit verglichen mit andern Typen von Spannungsfestigkeiten. Dies dürfte sein, weil fast alle Ge-

[15] 1959, S. 112.
[16] 1959, S. 242.

steine und besonders Sedimente Diskontinuitäten haben, durch die das Gestein nicht fest zusammenhängend ist und entlang denen Trennungen durch Spannung leicht vonstatten gehen. Aus diesem Grunde sind sinngemäße Zahlen der Scherfestigkeit von Gesteinskomplexen schwer zu erhalten» [17].

Der hydrostatische Druck im Gestein erhöht theoretisch die Scherfestigkeit, aber er verunmöglicht die Schockwirkung bei einem eventuellen Bruch, da er keinen Beschleunigungsweg freiläßt. Die elastische Starrheit der Tiefenzonen, wie sie aus den seismischen Messungen hervorgeht, kommt für Bruchbildung nicht zur Geltung, da diese nur entstehen kann, wo Druckgefälle zwischen abgegrenzten Gesteinskomplexen besteht. In Tiefenzonen kann aber kein scharf begrenztes Druckgefälle bestehen, da sich das Gestein gegen die Tiefe zu rasch dem allseitigen Druckzustand nähert und diesen schon bei 100 km erreicht haben muß.

Howell sagt dann weiter: «... Auf der andern Seite macht es die allgemeine Existenz einer höheren Ordnung von isostatischem Gleichgewicht sicher, daß das Gestein des Mantels der Erde, wenigstens dasjenige in der Ausgleichs-Tiefe (Asthenosphäre) eher plastisch ist als starr» [18].

Nach Gutenberg (1951c) bestehen Gezeitendeformationen in der obersten Erdkruste, welche bis zu 0,05 Bogensekunden Kippbewegungen ausmachen. Dies erweist von einer andern Seite, daß die Erdkruste sich ständig verbiegt, ohne Erdbeben zu erzeugen.

An einer andern Stelle schreibt Howell: «Unter Kontinenten bei Temperaturen und Drucken, wie sie in Tiefen von wenigen 10 km bestehen, beweist die Isostasie, daß die Festigkeit der Gesteine relativ klein sein muß» [19].

Figur 2 zeigt die möglichen Temperaturen in Erdtiefen bis 800 km. Dabei ist zu bedenken, daß je nach Wassergehalt der Schmelzpunkt der Gesteine noch wesentlich herabgesetzt sein kann. Wir können danach schon bei 100 km Tiefe wenigstens teilweise geschmolzenes Gestein annehmen und die Erdbeben-Foci liegen zum Teil noch 600 km tiefer.

Die Mikrobeben können tektonische Beben sein. Sie unterscheiden sich von gewöhnlichen Beben, die um ein Billionenfaches stärker sind, durch ihre Kontinuität, was dem System der Tektomechanik entsprechen dürfte. Große Beben sind von Mikrobeben zu unterscheiden durch

[17] 1959, S. 242.
[18] 1959, S. 247.
[19] 1959, S. 282.

ihren starken Schock, den scharfen Anfang und dem entschiedenen Ende und überhaupt durch die kurze Dauer des Ausschwingens der seismischen Wellenbewegung. Es ist wahrscheinlich, daß nach größeren Erdbeben eine kürzere oder längere Periode von Mikrobeben anschließt, d. h. durch aufgebauten Streßdruck vorbereitete tektomechanische Bewegungen ablaufen, welche durch den Hauptschock in Gang gebracht worden sind.

Auf Grund dieser Betrachtungen glauben wir, daß vor allem die Erdbeben die Inizialklüftung erzeugen, und daß diese in der Folge von Streßdrucken zur eigentlichen Bruchtektonik ausgebaut werden.

6. Erklärbarkeit der Eigenschaften der Erdbeben durch die Theorie der tektomechanischen Ursachen

Im Abschnitt II wurden die wichtigsten Charakteristika der Erdbeben in 12 Punkten genannt, um in der Folge der weiteren Betrachtungen die nötigen Vergleiche anstellen zu können.

Punkt 1, wonach jedes Erdbeben einen praktisch punktförmigen Focus besitzt, ist durch tektomechanische Vorgänge nicht erklärbar. Die an der Verschiebung beteiligten Gesteinsmassen müssen große Ausmaße haben, um die Energiemengen von 10^{20} bis 10^{26} zu erzeugen. Entladung der ganzen Energiemenge in einem Punkte ist auf diesem Wege undenkbar. Es gibt gewisse Vorstellungen, nach denen die Energie in einem bestimmten Punkte beginnt und sich dann über eine große Fläche ausbreitet. In einigen Erdbeben kann diese Auffassung eine gewisse Berechtigung haben, indem das rasch aufeinanderfolgende Aneinanderreihen mehrere Foci den Eindruck eines solchen Ausbreitens und Wanderns der Energiequelle hervorrufen kann. Genaue Feststellungen bestehen darüber aber nicht. In großen Erdbeben ist oft deutlich nur ein einziger Schlag mit seinem Ausschwingen registriert worden.

Howell schreibt: «Wenn ein Erdbeben stattfindet, gibt es eine plötzliche, scharfe Erschütterung des Grundes. Wie das Gestein von einer Lage zur andern springt, werden Teile der Erdkruste mit aufeinanderfolgenden wachsenden Distanzen vom Focus weitergezogen» [20].

Punkt 2 besagt, daß ein Erdbeben immer eine Momentanentladung, ein kurzer Schlag oder eine Reihe von Schlägen und deren Nachvibra-

[20] 1959, S. 147.

tionen von Mikrobeben ist. Viele bekannte, starke Beben sind nur als ein Schlag registriert worden, bei dem die ganze Energie momentan entladen wurde (vor allem Chile 1922 und S. Franzisco 1906). Die Erzeugung einer solchen momentanen Energieentladung auf tektomechanischem Wege ist nicht denkbar, da die Druckfestigkeiten des Gesteins eine so dicht arbeitende Energiespeicherung in diesen Größenordnungen nicht erlauben. Das tektomechanische Prinzip bringt bei der Bewegung größerer Massen Verzögerungen mit sich, welche nicht dem Hauptschlag des Erdbebens, wohl aber den nachfolgenden Mikrobeben entsprechen kann.

Punkt 3 betrifft die freiwerdenden Energiemengen. Diese sind nach den Berechnungen der Grenzmöglichkeiten Abschnitt III 1 und 2 durch die Tektomechanik nicht erreichbar.

Punkt 4: Die große Energiespeicherung ist nach unseren Betrachtungen eine der Tatsachen, welche am stärksten gegen die Möglichkeit von tektomechanisch ausgelösten, großen und mittleren Erdbeben spricht. Die beteiligten Gesteinsmassen sind so groß, daß die Druckfestigkeit und vor allem die Zusammenhangskraft der Komplexe nie ausreicht, um so große Energiemengen zu speichern und ihre plötzliche Auslösung zu gewährleisten. Die hohe relative Plastizität großer Gesteinskomplexe verunmöglicht tektomechanische Energiespeicherung dieser Größenordnung.

Punkt 5, Energieunterschiede, welche in das Billionen- und Drillionenfache gehen, sind vernünftigerweise nicht als erzeugt durch ein und dasselbe System wie die Tektomechanik anzunehmen. Die Tektomechanik kann bestimmt zur Erklärung kleinerer Energiemengen (bis 10^{15} erg) herangezogen werden, besonders wenn sie im Gefolge von stärkeren Erdbeben als Mikrobeben auftreten. Für Beben von großen Energiemengen dürfen wir nicht einfach die gleiche Ursache annehmen wie für Mikrobeben.

Punkt 6: Die große Tiefe der Foci verunmöglicht eine Erklärung der Erdbeben durch Tektomechanik. Die Energiespeicherung ist in diesen Tiefen mit der sicher wesentlich erhöhten Plastizität der Gesteine ganz unmöglich (vgl. Abschnitt III 4 und 5).

Punkt 7: Die Bruchbildungen und Zerstörungen sind als Folge der Erschütterungen erklärbar.

Punkt 8 betrifft das Schocksystem. Es ist, besonders was lange Schockserien anbelangt, schwer vereinbar mit der tektomechanischen Ursache. Die Spannungen bauen in der Erdkruste nur relativ geringe Energie-

beträge auf, da die Speicherung wegen der Plastizität größerer Gesteinskomplexe gewisse Grenzen nicht überschreiten kann. Es ist deshalb nicht einzusehen, wie es tektomechanisch möglich sein soll, daß Schwärme von Schocks auftreten könnten, und dann Jahrzehnte oder Jahrhunderte alles ruhig ist, obschon sich die Spannungen im Gestein in kürzerer Zeit wieder aufbauen müssen.

Punkt 9: Das Bild der Isoseismalkurven ist sehr ungleich, in der Regel aber mehr oder weniger zentrisch. Ganz langgestreckte Kurven sind die Ausnahme. Es ist schwer zu erkennen, warum nur einige Beispiele als «Beweis» der tektomechanisch erzeugten Erdbeben herangezogen werden dürfen, während die Mehrzahl der Erdbeben diese Erklärungsmöglichkeiten gar nicht bieten. Die Erklärung der langgestreckten Isoseismalkurven wurde in Abschnitt II 9 besprochen, und es besteht kein Grund, die ovale Form als Beweis der tektomechanischen Ursache der Erdbeben anzusehen.

Punkt 10: Die Verbindung von Erdbeben mit Vulkanismus deutet nicht speziell auf tektomechanische Ursache. Die Epizentren sind punktförmig und nicht zonar. Es wird hier der Explosionscharakter solcher Erdbeben anerkannt. HOWELL schreibt dazu: «In gewissen Gebieten ist vulkanische Tätigkeit begleitet von Erdbeben oder umgekehrt. Es ist unsicher, was Ursache und was Wirkung ist oder ob beide in Äußerungen irgend einer fundamentaleren, tiefliegenderen Tätigkeit sind» [21].

Die Verbindung von Erdbeben mit vulkanischer Tätigkeit kann in keinen direkt beobachteten Zusammenhang mit der Tektomechanik gebracht werden. Das Auftreten von Vulkanismus und Erdbeben in den gleichen großtektonischen Zonen hat nach unseren Betrachtungen mit Tektomechanik nur indirekt etwas zu tun und soll später erörtert werden.

Punkt 11: Lichterscheinungen und Störungen des magnetischen Feldes sind Erscheinungen, welche in ihrem Wesen noch nicht genügend bekannt sind. Sie scheinen aber mit Tektomechanik nichts gemein zu haben.

Punkt 12: Die Verteilung der Foci sagt einiges aus in bezug auf die Tektomechanik. Die große Streuung der Foci der Tiefe zu, von 50 bis 700 km, erscheint nach den oben gemachten Betrachtungen auf Grund der Plastizität der Gesteine als unvereinbar mit der Annahme der tektomechanischen Ursache der Beben. Gemeinsame tektonische Linien der

[21] 1959, S. 111.

Foci sind nicht vorhanden. Die Streuung ist in jeder Richtung beträchtlich.

IV. Postulat

Ungeachtet der Beantwortung der Frage nach der Ursache der Erdbeben kann nach unseren obigen Überlegungen folgendes Postulat aufgestellt werden:

Tektomechanische Verlagerungen können keine Erdbeben erzeugen, welche die Energiemengen von mittleren und großen Erdbeben erreichen.

Die Energiequellen für mittlere und starke Beben müssen aus einem grundsätzlich anderen System der Energieproduktion, Speicherung und Auslösung stammen als der Tektomechanik. Die Erdbeben sind die Urheber der Initialklüftung und leiten damit die Bruchtektonik ein.

V. Die Annahme von Explosionen als Ursache der Erdbeben

Als Arbeitshypothese können wir das Auftreten von Explosionen in der Erdkruste annehmen, welche die Erdbeben erzeugen.

Vergleich mit den Eigenschaften der Erdbeben

Die Annahme von Explosionen läßt sich wie folgt mit den oben genannten Eigenschaften in Vereinbarung bringen:

Punkt 1: Der praktisch punktförmige Focus ist durch die Explosion begründet.

Punkt 2: Momentanentladung als Schock ist ebenfalls begründet.

Punkt 3: Die großen Energiemengen und Reserven sind durch Explosionen erklärbar.

Punkt 4: Energiespeicherung und Auslösung sind durch Explosion erklärbar.

Punkt 5: Energieunterschiede sind durch Explosion unterschiedlicher Brennstoffmengen erklärbar, wobei Mikrobeben als tektonischen Ursprungs angenommen werden.

Punkt 6: Die Tiefe der Foci bis 700 km ist für die Annahme von Explosionen durch die mineralische Verteilung des Brennstoffes denkbar. Die Plastizität ist hier ohne Bedeutung.

Punkt 7: Daß Erschütterungen von Bruchbildungen und Zerstörungen begleitet sind, spricht nicht gegen die Annahme von Explosionen.

Punkt 8: Das Schocksystem kann in gewissen Fällen als einzelne getrennte Explosionen, welche sich gegenseitig beeinflußt haben, angesehen werden. Die Foci liegen dann räumlich nicht weit auseinander. Das Ausklingen eines Bebens durch immer schwächer werdende Mikrobeben kann als Folge von tektonischen Verlagerungen angesehen werden, welche durch die Haupterschütterung in Gang gekommen sind.

Punkt 9: Das System der Isoseismalkurven spricht nicht gegen Explosionen.

Punkt 10: Erdbeben begleitet von Vulkanausbrüchen. Diese stammen von flachen Beben. In diesen Fällen ist allgemein der Explosionscharakter der vulkanischen Beben erkannt worden. Die Ausbrüche des Krakatau 1883 und Mont Pelé 1902 wurden immer als Explosionen betrachtet.

Punkt 11: Die Lichterscheinungen und magnetischen Feldänderungen sind noch nicht genügend erforscht, könnten aber durch Explosionen eher erklärt werden als durch Tektomechanik.

Punkt 12: Verteilung der Foci.

Wir verweisen auf Fig. 3 und 4. Die zonare, aber doch ziemlich weiträumige Verteilung der Foci steht in keinem Widerspruch zur Annahme von Explosionen als Erdbebenerzeuger.

VI. Die Explosions-Hypothese in bezug auf die Gebirgsbildung

1. Wirkung der Erschütterungen

Es kommen auf der Erde rund 100 000 bis 1 Million Erdbeben pro Jahr vor. Wir können annehmen, daß an die 10 000 Erdbeben pro Jahr auf ein großes Orogen entfallen. Dies ergäbe in 10 Millionen Jahren, der möglichen Dauer einer Paroxalepoche eines Gebirges, total rund eine Billion Erschütterungen. Erdgeschichtlich betrachtet bedeutet dies ein fast ständiges Zittern und Schütteln der Erdkruste in dieser Zone während ihrer Mobilitätszeit.

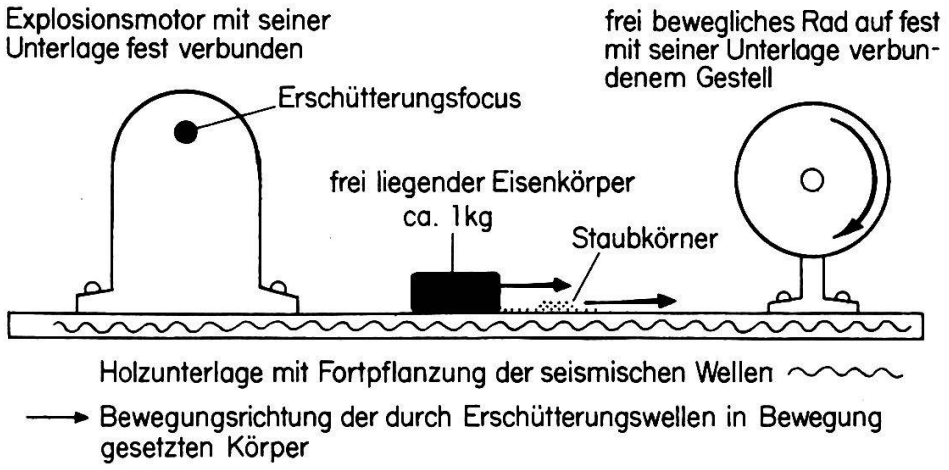


Fig. 1 Schematische Darstellung eines Demonstrationsversuches zur Erläuterung der dynamischen Wirkung von fortgesetzten Erschütterungen, Wirkung von Erdbeben zur Förderung tektonischer Bewegungen und Lösung von Streß-Drucken.

Fig. 1 zeigt einen Versuch, den wir anstellen können, um uns die mögliche Wirkung sukzessiver Erschütterungen auf unter Spannung und einseitigem Druck stehende Gesteinskomplexe, welche auf besonders plastischen Unterlagen ruhen, zu veranschaulichen.

Der Explosionsmotor erzeugt die Erschütterungen. Diese gehen in Form von Erdbebenwellen durch die Holzunterlage, welche eine ganz schwache Neigung (etwa 1 %) gegen das Gewicht g hin aufweist.

Während der Motor läuft, ist folgender Effekt zu beobachten:

Das Gewicht von 1 kg Eisen entfernt sich vom Motor um rund 5 cm pro Minute. Die Staubkörner, deren Massen weniger als ein Millionstel des Eisengewichtes sind, wandern einzeln in der gleichen Richtung mit der gleichen Geschwindigkeit. Die aufgestellte Scheibe rotiert wie der Pfeil andeutet, ein bis zwei Umdrehungen in der Minute. Der Ausbau und die Auswertung solcher Versuche zur Erklärung des Verhaltens von Gesteinskomplexen bei Erdbeben stehen noch aus. Die Vermutung liegt aber nahe, daß Erdbeben, wie der Versuch veranschaulicht, in einem Orogen eine wesentlich mobilisierende Wirkung auf die Gebirgsbildung haben.

Die enge Verwandtschaft von Erdbebenerschütterungen mit künstlichen Explosionen wird durch die Tatsache erhellt, daß kleine künstliche Explosionen die Tendenz haben, einen größeren Prozentsatz Hochfrequenz-Schwingungen im Boden hervorzurufen als starke Explosionen. Das gleiche gilt für Erdbebenerschütterungen.

2. Hitzewirkung

Wir erinnern daran, daß die ursprüngliche Wärme der Erde heute noch nicht mit Gewißheit festzustellen ist. Der ursprüngliche Zusammenschluß der Baustoffe der Erde kann als eine der Möglichkeiten der Wärmeentwicklung angesehen werden. Es steht aber fest, daß diese nicht genügte, um die Erde in ihrer Wärme, wie sie heute ist, zu erhalten. Wenn die Wärme im Erdmantel nicht stetig neu erzeugt würde, so wäre die meiste Wärme durch Strahlung bis heute verloren gegangen. Die zurzeit allgemein feststehende Ansicht nimmt den radioaktiven Zerfall gewisser Elemente als hauptsächlichsten Wärmegenerator der Erde an. Es bestehen Gründe zur Annahme, daß die radioaktiven Stoffe in den äußeren Erdkrustenteilen angereichert sind. Wir haben aber keine direkten Beweise dafür und sind über die mineralische Zusammensetzung der tieferen Regionen nicht orientiert, vor allem aber auch nicht über die Möglichkeiten der mineralischen Konkretionen und zonaren Anreicherungen, sowie Entmischungen bei erhöhten Temperaturen und Drucken und bei magmatischer Mobilität.

Auch die Auskristallisationen können zur Wärmeerzeugung beitragen, vorausgesetzt, daß der Aggregatszustand flüssig ist oder flüssig war.

Wärmeerzeugung durch Friktion im Gestein kann nur unbedeutende Beträge erreichen.

Es wurde neuerdings gefunden, daß Regionen mit rezenter tektonischer und seismischer Tätigkeit gewöhnlich höhere Temperaturgradienten aufweisen als andere. Dies besagt, daß die Gesteinstemperaturen unter diesen Gebieten höher sind als in solchen mit tektonischer und seismischer Ruhe. Die Differenzen in den Temperaturgradienten können in verschiedenen Gebieten bis zum 18fachen betragen. Der Vulkanismus zeigt, daß in seinem Bereich die Erdkruste wärmer ist als gewöhnlich und daß wärmere Gesteine von unten in die Oberflächendecken gepreßt werden.

Wir möchten hier auf Fig. 2 verweisen, wonach die Temperatur bei 700 km Tiefe annähernd 1800 ° C beträgt, eine Temperatur, bei der Schmelzfluß angenommen werden muß, wenn man auch die Anwesenheit von leicht flüchtigen Bestandteilen wie Wasser, Fluor usw. in Rechnung stellt.

Von der Annahme von magmatischen Explosionen ausgehend, wäre die erhöhte Temperaturtönung in den jüngsten Erdbeben- und Vulkangebieten auf die Hitzewirkung dieser tiefliegenden Energieäußerungen

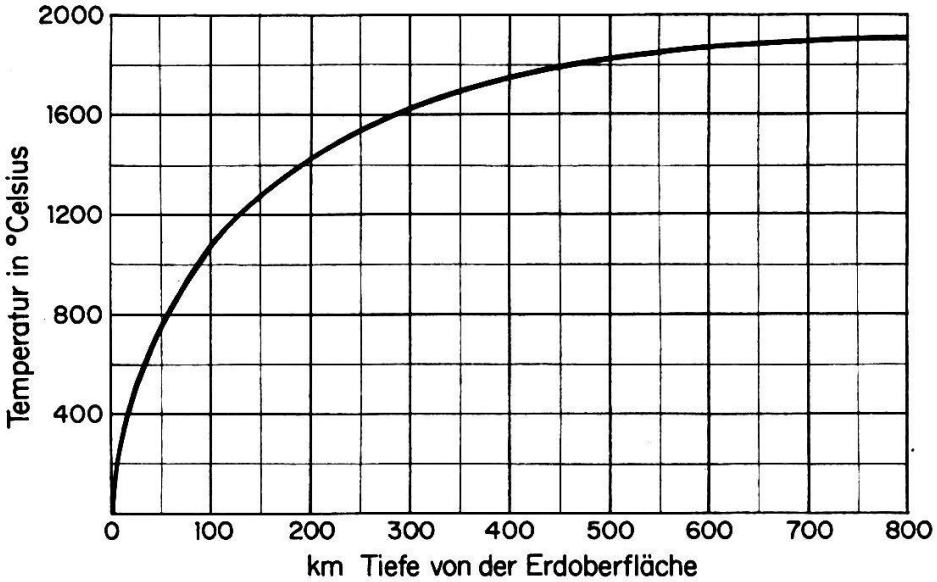


Fig. 2 Diagramm der Erdwärme als Funktion der Tiefe (Nach B. F. Howell 1959)

zurückzuführen. Sie könnten wohl eine der Hauptursachen der Gesteinsaufschmelzungen oder Migmatisationen darstellen. Dadurch können tiefliegende Batholithe verschiedener chemischer Zusammensetzungen entstehen und an der Oberfläche Vulkane bilden, wenn es sich um basische Magmen handelt.

Durch die zonare Häufung solcher Explosionen kann ein Konvektionsstrom und damit eine Pressung der Gesteine gegen die Oberfläche zu entstehen. Da dieser Wärmestrom gegen die Oberfläche zu stetig und langsam vor sich geht — im Gegensatz zur mechanischen Schockwirkung des Bebens — dürfte die Hitzewirkung der Explosionen größtenteils zur Aufschmelzung von Gesteinen dienen. Es werden dann auch Temperaturgradienten entstehen, welche weit über der Norm unaffektierter Gebiete liegen.

Zur Möglichkeit der Bildung von Konvektionsströmen schreibt Howell: «Wenn dieses Material eine genügend tiefe Viskosität hat, so könnte die Hitze, welche durch radioaktiven Abbau in der Tiefe der Erde erzeugt wurde, zu Konvektionsströmen führen. Dies wäre der Fall, ob nun das Material in diesem Zeitpunkt flüssig oder nur plastisch war. Pekeris (1935) hat gezeigt, normale Bedingungen im Gesteinsmantel voraussetzend, daß Konvektionszellen zu erwarten sind» (Fig. 5) [22].

[22] 1959, S. 326.

VII. Magmatektonischer Mechanismus der Gebirgsbildung

Die auffallendste Erscheinung der Gebirgsgürtel ist ihr Zusammenfallen mit Haupterdbebenzonen. Die große Mehrheit der Epizentren liegt in den Gürteln cänozoischer bis rezenter Störungen und zeigen so einen Zusammenhang zwischen Erdbeben und Gebirgsbildung. Auch die Mehrzahl der tätigen Vulkane liegt in seismischen Zonen. Im allgemeinen liegen die Vulkane auf der kontinentalen Seite der Erdbebenzonen, und große Erschütterungen haben oft mitteltiefe Foci. Entlang den Kontinentalrändern finden wir die Tiefseegräben. Die größten und tiefsten Gräben liegen neben den Inselbogen an deren äußerem Rande knapp außerhalb dem Erdbebengürtel. Solche Tröge werden mit Sedimenten gefüllt, ähnlich dem Südfuß des Himalayagebirges oder des Flyschtroges der

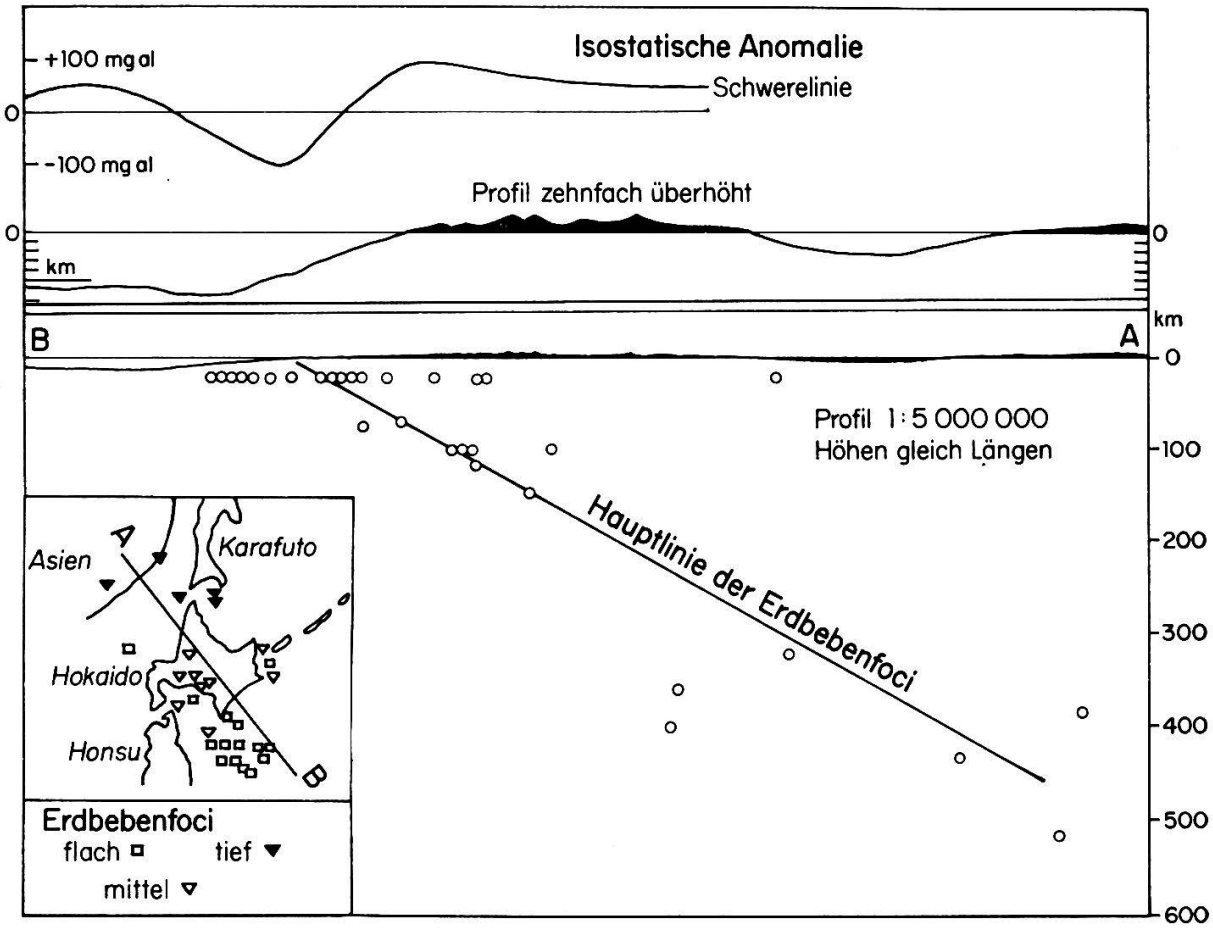


Fig. 3 Profil durch das Nordjapanische Erdbebengebiet mit den Erdbebenfoci oder Hypozentren und Kurve der isostatischen Anomalie
(Umgezeichnet nach GUTENBERG und RICHTER 1941)
O = Erdbebenfocus

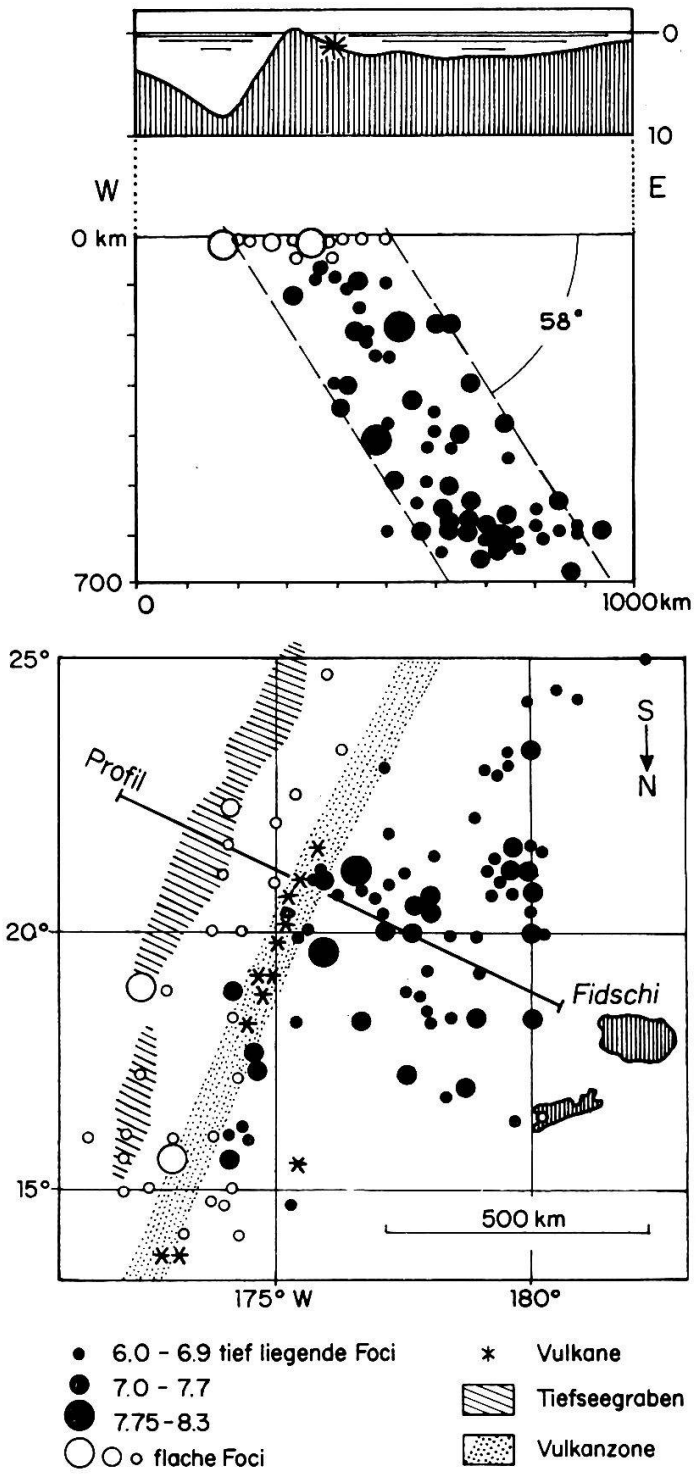


Fig. 4 Profil durch die Region Kermadec-Tonga zwischen Neuseeland und den Fidschi-Inseln
(Umgezeichnet nach H. BENIOFF 1955)

Alpen. Typisch sind die Gräben der Sundainseln, Philippinen, Marianen, Palau, Salomon, Riukiu, Japan-Kurilen, Alëuten, Tonga-Kermadec (siehe Fig. 3 und 4), dann der Atacama- und Puertoricograben und andere.

Eine weitere bedeutungsvolle Eigenschaft der Vorlandgräben ist ihre negative isostatische Anomalie (siehe Fig. 3). In vielen Vorlandsenken, speziell an den hohen Gebirgsketten, hat die isostatische Anpassung die einstigen Anomalien ausgeglichen. Die Tiefseegräben dagegen weisen stark negative Schwereanomalien auf. Besonders deutlich konnte dies beim Sunda-, Tonga-Kermadec-, Japan-Kurilen- und dem Atacamagraben nachgewiesen werden. Zwischen Halmahera und Celebes findet sich der tiefste Wert der Gravitation. Die Zone geringer Gravitation liegt entlang der Böschung vom Archipel zum Tiefseegraben. Speziell im Sundagraben deckt sich das Gravitationstief mit einem Gebirgskamm, der stellenweise als Inseln über den Meeresspiegel reicht. Dort, wo diese Inseln am höchsten sind, veringert sich die Anomalie.

Negative Schwereanomalien liegen am Fuße der Gebirgsketten des Himalaya, in Burma, in Japan, Antillen, Westindien, in Europa im Mittelländischen Becken, im Schwarzen Meer usw.

Diese negativen Schwereanomalien erweisen das Vorhandensein von tiefliegenden, spezifisch leichten Gesteinsmassen. Wir können dieses Phänomen als noch vorhandene und aufbauende Spannung mit vor sich gehender Tiefenverlagerung deuten. In diesen Regionen unter den Tiefseegräben muß eine Akkumulation leichter Oberflächengesteine bestehen, die in vielen Fällen gegenwärtig noch entgegen der isostatischen Angleichungskraft vor sich geht.

Studien an der Oberfläche haben gezeigt, daß neben der Tendenz zu Horizontalverschiebungen auch Vertikalbewegungen bestehen. Es ist auch wahrscheinlich, daß im Graben selbst die Vertikalveränderungen stärker in Erscheinung treten. Dieser Verschiebungstendenz entsprechen die Senken auf der Gegenseite der Vorlandtiefen, zum Beispiel bei Japan das Japanische Meer, bei den Kurilen das Ochotskische Meer, bei den Alëuten das Beringmeer usw. Diese flachen Becken erscheinen als die Gebiete der Massendefekte, der Dehnungsräume, entstanden durch die Lateralbewegung gegen den Tiefseegraben zu. Die positive Anomalie steigt von der flachen Senke gegen das Gebirge langsam an, um steil gegen den Graben abzufallen. Wir können die positive Anomalie mit dem Hochpressen schwerer Gesteinsmassen über den Erdbebenzonen erklären.

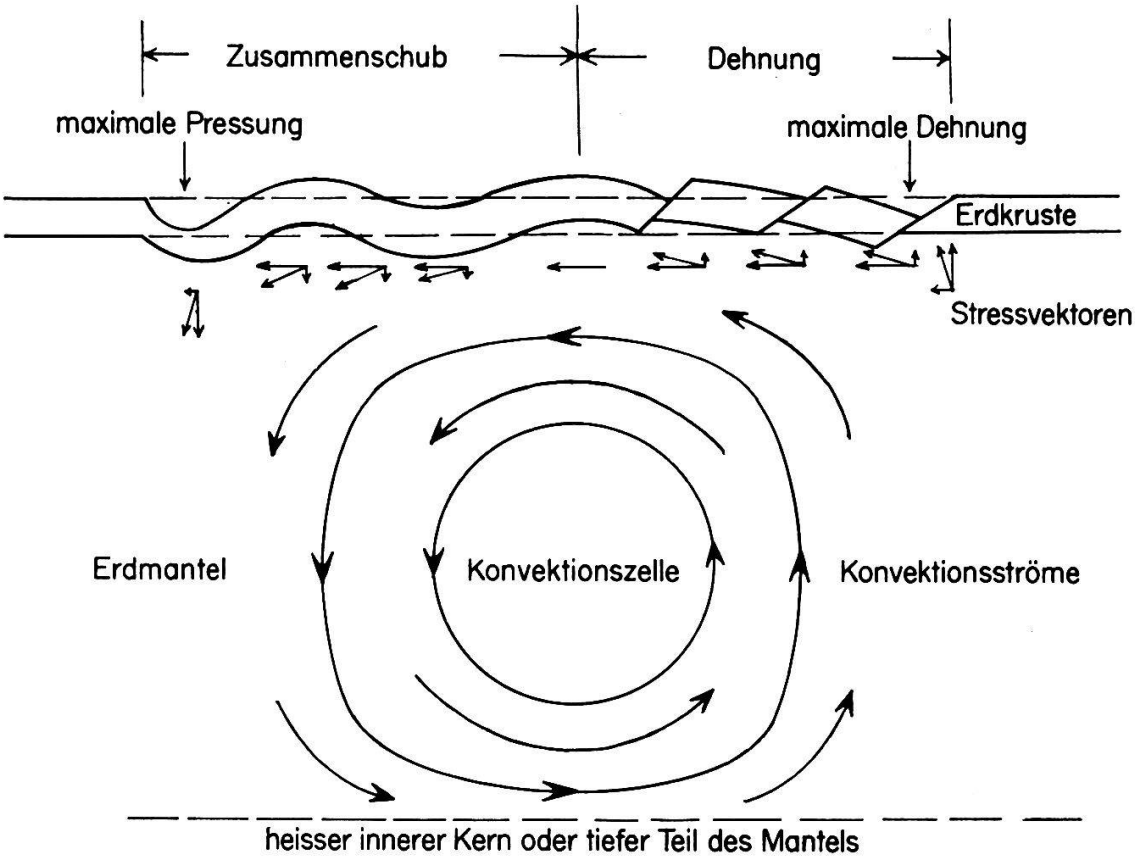


Fig. 5 Schema der mechanischen Wirkung einer Konvektionszelle auf die Erdkruste (Nach B. F. Howell 1959)

Wir möchten darauf hinweisen, daß das Verhältnis von Breite zu Länge eines Gebirgskörpers sich gewöhnlich wie 1 : 8 verhält. Dies ist der Fall bei den Alpen, Kaukasus, Himalaya—Hindukusch; dann ebenfalls bei den noch tief liegenden Gebirgskörpern, den Tiefseegräben wie Kurilen, Riu-Kiu, Philippinen, Marianen, Palau, Salomon und Puerto Rico. Bei den durch Schwellen unterbrochenen Gräben finden wir größere Längen wie bei Kermadec-Tonga und den Alëuten 1 : 10, Atacama 1 : 17 und Sunda 1 : 20. Es scheint sich bei dem Verhältnis 1 : 8 um eine den Kettengebirgen eigene Erscheinung zu handeln, der wir heute noch keine besondere Deutung zu geben vermögen.

Nach der Annahme von Explosionen als Ursache der Erdbeben können die gebirgsbildenden Vorgänge in großen Zügen aus drei Phasen bestehen: Senkung mit Zusammenschub durch Konvektionsstrom, isostatische Hebung und Erosion.

Es soll in der Folge versucht werden, diese Auffassung unter Beiziehung des Beispiels der Alpen zu erläutern. Die Fig. 7 und 8 stellen eine chronologische, hypothetische Abwicklung der Bildung des alpinen Dekkenbaues dar.

1. Senkungsphase

Der alpine Geosynklinalraum war seit der Triasepoche in langsamem Absinken begriffen mit einigen örtlichen und zeitlichen Schwankungen.

Gegen Ende der oberen Kreideformation erfolgte eine Beschleunigung der Senkung, und damit setzte der Zusammenschub im Alpenraum ein, der seinen Paroxismus am Ende des Eocäns erreicht haben dürfte. Die Flyschbildungen fallen in diese Zeitepoche, und wir können die Entstehung einer, wenn auch nicht regelmäßigen, so doch stark ausgeprägten Vertiefung, des Meeresbodens, eines Tiefseegrabens, annnehmen. Vulkanische Tätigkeit mit der Förderung von basischen Magmen stellen wir sowohl nördlich als auch südlich des Tiefseegrabens fest. Saure Magmaaufschmelzungen haben dagegen die Oberfläche nicht erreicht.

Nach unseren früheren Überlegungen müssen wir weiter annehmen, daß der Senkungsvorgang in der alpinen Zone durch den absteigenden Ast der Konvektionszelle eines magmatischen Strömungssystems entstand und daß dieses Strömungssystem durch die Hitzewirkung der zonar gehäuften Explosionen in der Zelle in Gang gebracht und einige Zeit unterhalten wurde (siehe Fig. 5 und 6). Der Sog nach abwärts muß so stark gewesen sein, daß die erst in Falten gelegten, zusammengeschobenen Krustenteile in einem Paroxismus mit ihren Mulden tief nach unten ausgezogen wurden. So gelangten spezifisch leichte Gesteine in tiefe Regionen und erzeugten eine Zone negativer Schwereanomalie.

In diesen Tiefen ging die Gesteinsmetamorphose vor sich (Fig. 7 IIa und b). Diese magmatektonischen Vorgänge erzeugten Über- oder Unterschiebungen. Die Bewegungen wurden durch die häufigen Erdbebenerschütterungen erleichtert. Die Erschütterungen haben auch die ausgesprochene Bruchtektonik in den oberen Deckenteilen, den sogenannten Stirnregionen hervorgerufen, welche allgemein in der Nähe der Oberfläche blieben. Sie wurden deshalb auch nicht der Metamorphose unterworfen.

Es ist anzunehmen, daß die Senkung nicht im ganzen Gebiet gleichmäßig erfolgte. Es können einzelne Deckenkerne frühzeitig abgesunken sein, während andere länger in Höhenlagen stehen blieben, wodurch

starke Böschungen mit Erosion möglich geworden wären. So könnten wir die Einsedimentierung exotischer Blöcke in den Flysch erklären. In den graphischen Darstellungen wurden jedoch diese möglichen, ja wahrscheinlichen Verwicklungen nicht dargestellt.

Das außerordentliche Ausziehen der alpinen Deckenwurzeln nach der Tiefe zu scheint durch das Auftreten von zwei sich gegenüberstehenden Konvektionszellen ermöglicht worden zu sein. Eine solche Anlage der Strömungssysteme mußte eine verstärkte, konzentrierte Sogwirkung zur Folge haben und führte zum ausgesprochenen Tiefenorogen (Fig. 6).

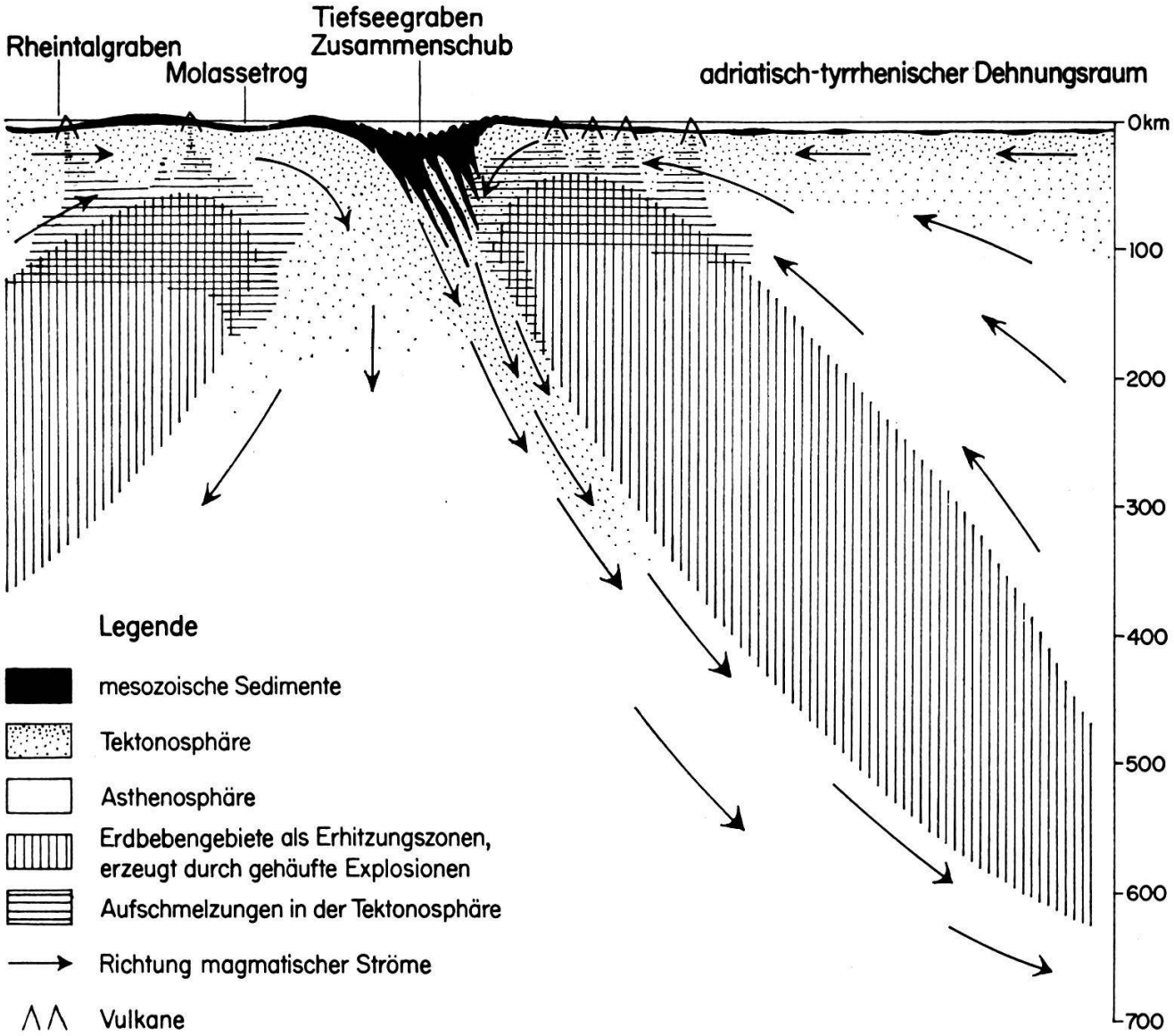


Fig. 6 Hypothetisches Schema der Konvektionsströme im Tiefenparoxismus des Tiefenorogens, magmatektonische Zusammenhänge, wie sie für die Bildung des Alpinen Deckengebirges mit einem Zusammenschub um 300 km angenommen werden können.

Im Falle der Alpen wurde eine Zone von rund 300 km Breite in den Zusammenschub und den Tiefensog einbezogen. Dazu ist zu bemerken, daß der heute erkennbare Deckenbau noch weit größere Abwicklungsräume annehmen ließe, sofern man das starke Ausziehen der Deckenwurzeln nicht genügend berücksichtigt.

Die Abwärtsbewegung im alpinen Raum hatte eine massive Tiefenverfrachtung ursprünglich hoch gelegener Krustenteile zur Folge und mußte so im Rücken der schräg nach NW liegenden Konvektionszelle einen weiten Dehnungsraum öffnen. Es ist anzunehmen, daß der ganze Adriatisch-Ligurische Raum in die Dehnungszone einbezogen wurde und dadurch die italische Halbinsel nach Norden nachrückte, einen Einbruchsraum im Tyrrhenischen Becken zurücklassend.

Ein kleineres Dehnungsgebiet, entstanden durch die Tätigkeit der nördlichen Konvektionszelle, besteht im Rheintalgraben und beim westlichen Alpenbogen in der Saône—Rhone-Senke. Zur kleinen, nördlichen Dehnungszone gehörte auch das Gebiet des schweizerischen Mittellandes. Die Auffaltung des Juragebirges erfolgte erst in Phase 2, der isostatischen Hebung.

2. *Isostatische Hebung*

Nach dem Ausbrennen und Abklingen der Explosionen kommen die Konvektionsströme zum Stillstand. Mit diesem Stillstand tritt die isostatische Hebung des Gebirgskörpers ein. Dieser steigt bis zur maximalen Höhe über Meer, bis zur Normalisierung der Schwereverhältnisse. Eine allgemeine Abkühlung tritt ein, und damit erstarren die Aufschmelzungen zu Batholithen. Die Vulkane erlöschen.

Eine neue Faltung der ausgezogenen Deckenelemente setzt ein. Durch den isostatischen Druck in die Höhe gepreßt, quillt der obere Teil der Masse der Decken über die Ränder des ursprünglichen Troges empor und überbordet durch Gravitationswirkung. Abgerissene Deckenelemente nähern sich durch Gravitationsgleitung ihren heutigen Plätzen. Dies gilt vor allem für die Klippen-, Niesen- und die helvetischen Decken.

Die daraus resultierende Überlastung der äußersten Alpenränder erzeugte isostatische Einsenkungen, welche die Morphologie dieser Gebiete endgültig bestimmte (Alpenrandseen usw.).

Durch die starke Überhöhung und den Gleitdruck entstand in dieser Phase auch die Auffaltung des Juragebirges durch Fernschub auf sedi-

mentären Gleithorizonten. Wir können den Jura somit ein Flachorogen nennen.

Die meist tiefen, metamorphosierten Gesteinskomplexe werden in den zentralen Zonen weit über den Meerespiegel gehoben. Die Gebiete mit positiver Schwereanomalie senken sich zu einem flachen Trog. Die jüngsten sauren Batholithe wurden mit der Deckenmasse gehoben und zum Teil eingefaltet, treten aber, entsprechend ihrer randlichen Lage an der Oberfläche noch nicht in Erscheinung und werden erst durch die Erosion freigelegt.

In der Zeit der paroxalen Hebung werden durch periphere Zugbeanspruchung die Aufbrüche der Haupttäler erfolgt sein, ähnlich wie dies in Fig. 7 IIb und 8 IIb angedeutet ist. Quertäler entstanden über den Wölbungen der Längsachsen, besonders dort, wo horizontale Biegungen die Spannung noch erhöhten. Diese epitektonischen Aufspaltungen konnten schon früh, d. h. noch während der teilweisen Immersion, stellenweise bis auf die Kristallinkerne, erfolgt sein. Daraus wären gewisse Flyschsedimente mit exotischen Blöcken erklärbar. In der paroxalen Hebungsphase setzte eine starke Erosion ein, welche uns die oligozänen Detritussedimente lieferte.

Die erosive Tätigkeit während Phase III 2 kommt in den Profilen 7 IIb und 8 IIb nicht zum Ausdruck, damit die Deckenzusammensetzungen klarer dargestellt werden können.

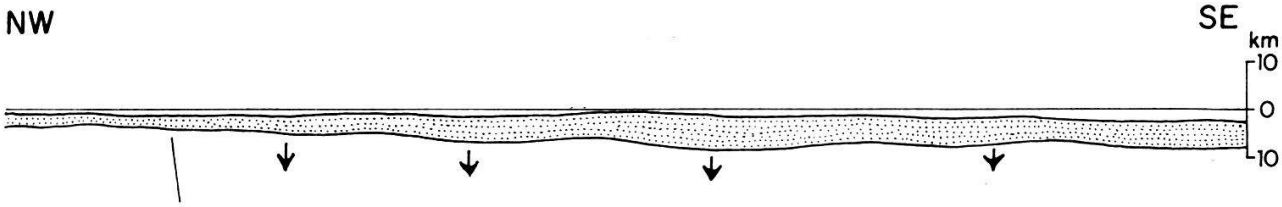
3. Erosion

Die Erosion hat, wie oben erwähnt, schon kräftig während der Hebungsphase eingesetzt und die epitektonisch entstandenen Großtäler eingetieft.

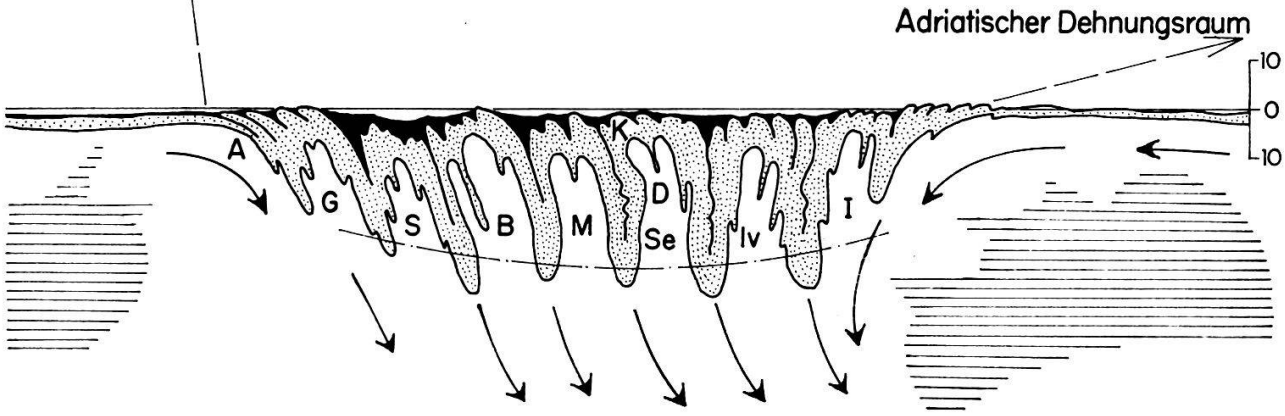
Die Erosionsphase ist gekennzeichnet durch magmatektonische Ruhe. Die Hebung des Gebirgskörpers und die Anortlegung der Gesteinsdekken ist abgeschlossen, die großen Züge der hydrographischen Struktur bestehen, und Nebentäler werden erzeugt und vertieft. Mit dem Abtrag des Gebirges ist eine entsprechende stetige isostatische Hebung des Gebirgskörpers verbunden. Eine entsprechende isostatische Senkung erfolgt in den Ablagerungsgebieten, welche gewöhnlich mit den Dehnungsräumen identisch sind.

Wir gelangen mit dieser zeitlichen Abwicklung zum heutigen alpinen Deckengebirge. Es ist klar, daß die genannten drei Phasen ineinandergreifen und in Wirklichkeit weder örtlich noch zeitlich scharf zu tren-

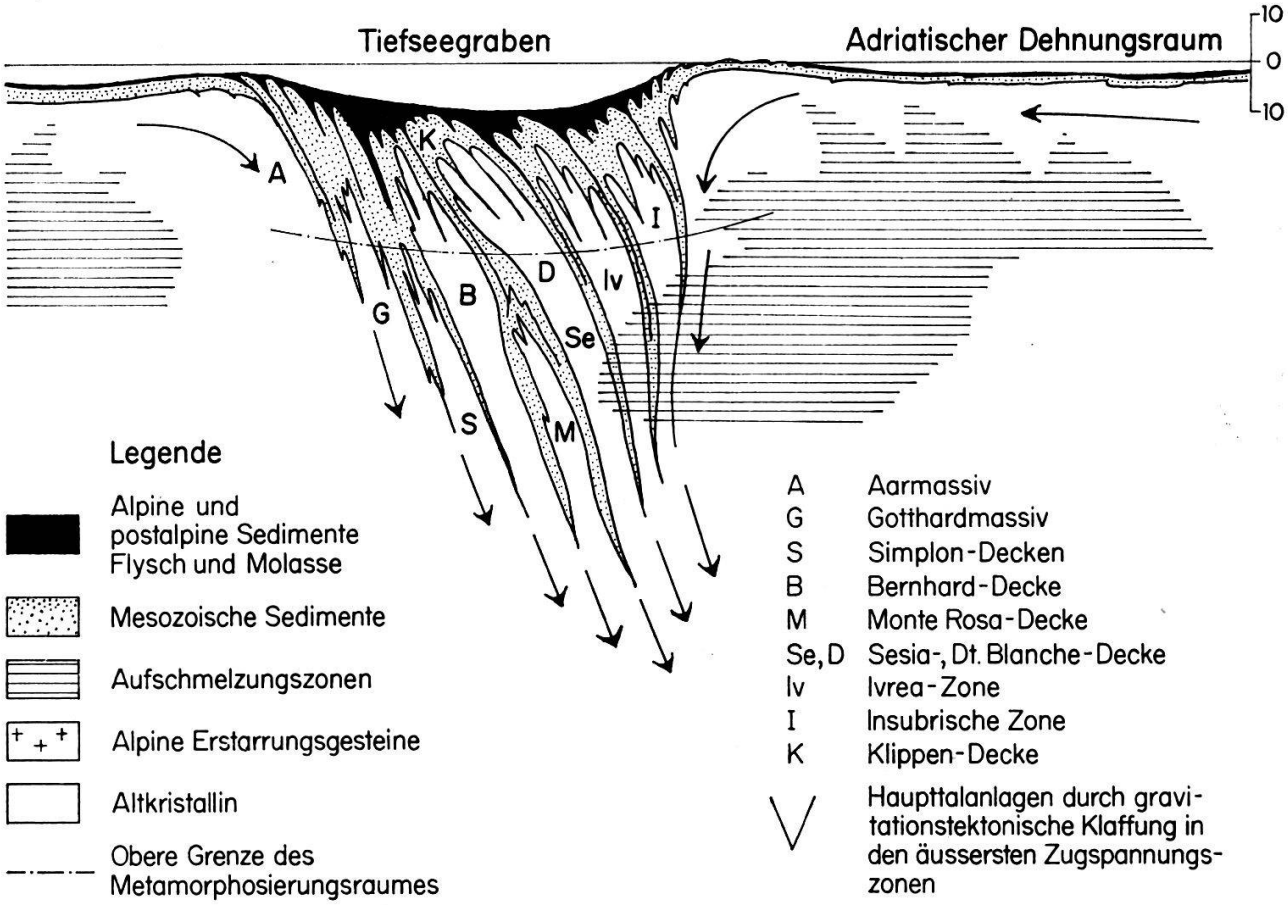
I. Alpiner Geosynklinalraum mit langsamer Senkung, auf 400 km Breite angenommen Jura bis Unterkreide



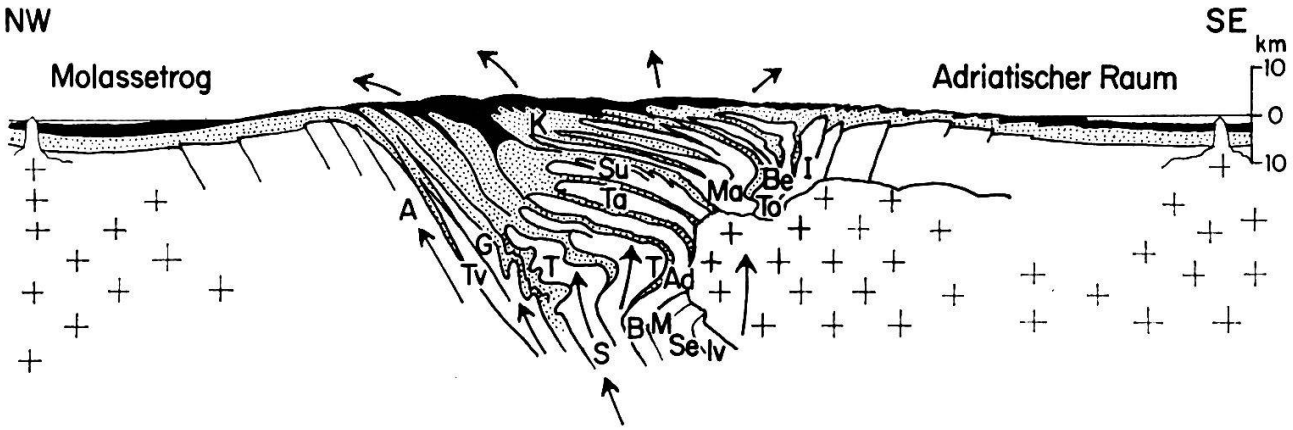
IIa. Senkungsphase mit Zusammenschub Faltung, Oberkreide bis Eocän



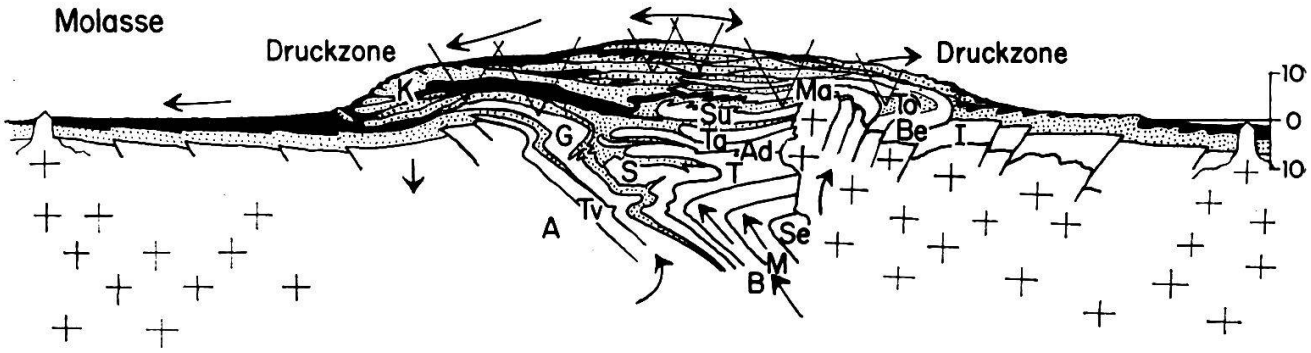
IIb. Tiefenparoxismus, Eocän Zusammenschub um 300 km



IIIa. Isostatische Hebungsphase, Oligocän
Auffüllen des Tiefseegrabens



IIIb. Höhenparoxismus, Miocän
Überquillen und Abgleiten durch Gravitation



IV. Erosionsphase, Pliocän—Holocän

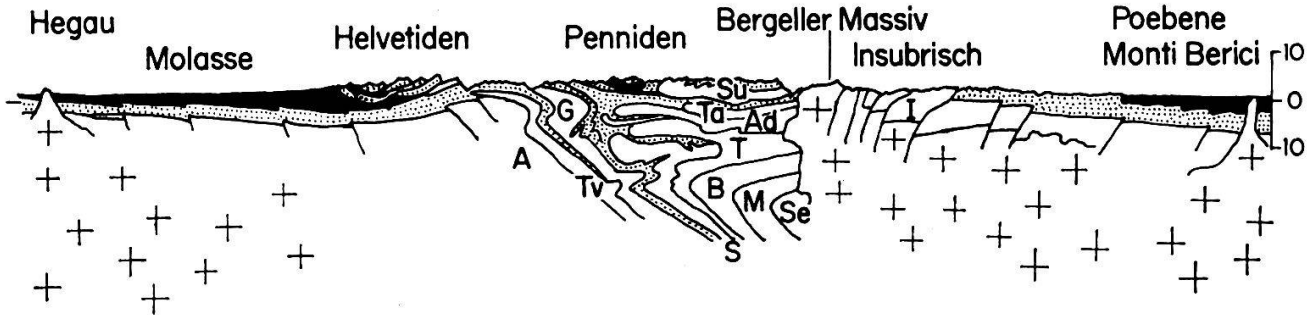
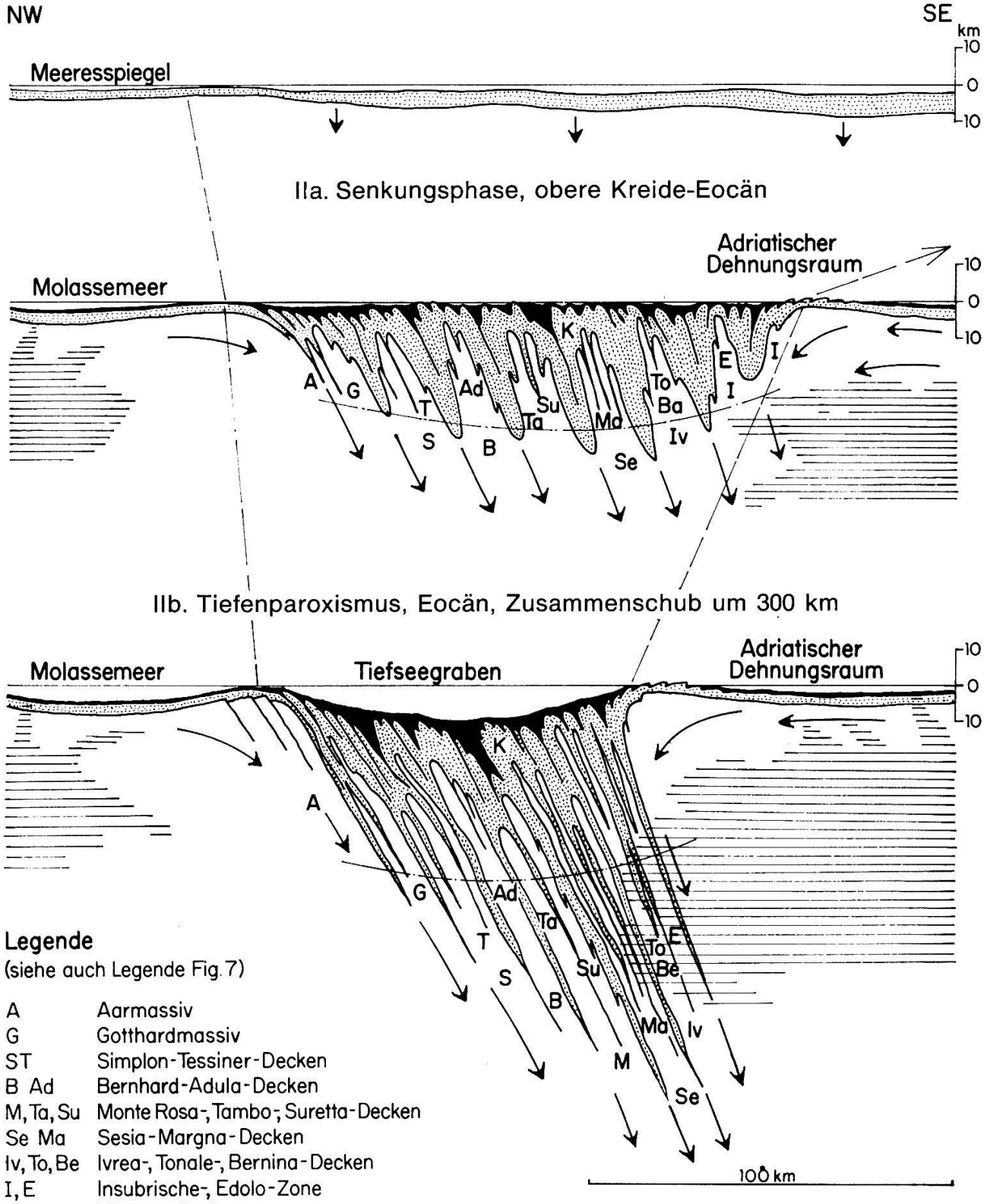


Fig. 7 Sechs hypothetische Querprofile durch die Region der Glarner Alpen—Bergell in chronologischer Folge zur Erklärung der alpinen Tiefenorogenese.

I. Alpiner Geosynklinalraum mit langsamer Senkung während Jura-Unterkreide-Zeit auf 400 km Breite angenommen



Legende
(siehe auch Legende Fig. 7)

A	Aarmassiv
G	Gotthardmassiv
ST	Simplon-Tessiner-Decken
B Ad	Bernhard-Adula-Decken
M, Ta, Su	Monte Rosa-, Tambo-, Suretta-Decken
Se Ma	Sesia-Margna-Decken
Iv, To, Be	Ivrea-, Tonale-, Bernina-Decken
I, E	Insubrische-, Edolo-Zone
K	Klippen-Decke

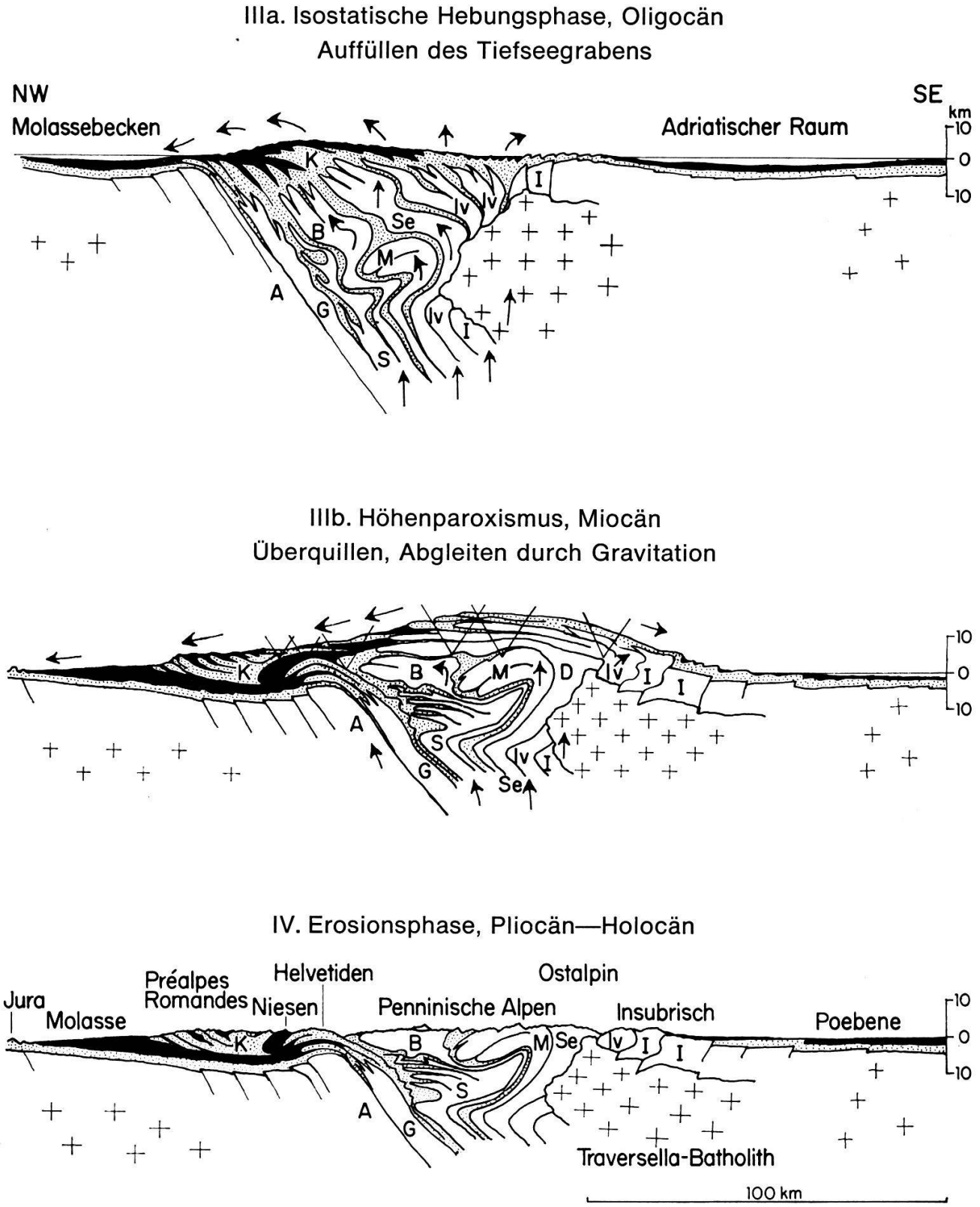


Fig. 8 Sechs hypothetische Querprofile durch die Region Wildstrubel—Monte Rosa in chronologischer Folge zur Erläuterung der alpinen Tiefenorogenese.

nen sind. Unsere hypothetischen Profile sollen nur zeigen, auf welchem Wege wir die außerordentlichen alpinen Deckenkomplikationen verstehen können.

Auch heute noch erkennen wir deutlich den ausgesprochenen Tiefenzug der Struktur des Tiefenorogens. Das eigentliche Gebirge der Zentralalpen sind die Penninischen Alpen. Ihre Wurzeln steigen in unbekannte Tiefen hinab. Sie geben das typische Bild der Magmatektonik. Die Bruchtektonik tritt zurück, dafür sind Faltung und Metamorphose stark ausgeprägt. Die Schalen- und Keilstruktur der herzynischen Massive trägt die Spuren der Abwärtsbewegung und des nachträglichen Hochsteigens. Die helvetischen Decken würden den randlichen, nördlichen Sedimentdecken entsprechen, deren Stirnteile nur wenig in die Tiefe gesogen worden sind und nun als Narben-Decken oben liegen. Dies ist der Fall auch für die sedimentären Stirnteile der penninischen und ostalpinen Decken, Niesen-Klippendecke usw.

VIII. Die Haupteigenschaften von Kettengebirgen

Nach Daly, R. A., 1938, können die Haupteigenschaften von Kettengebirgen auf Grund unserer Auffassung folgendermaßen erklärt werden:

1. Lange, schmale Gürtel der Gebirge wären bedingt durch eine entsprechende Tiefenzone von besonderen Mineralisationen, welche Explosionen ermöglichen.
2. Die Geosynklinale ist die durch Sog entstandene Senke im Tiefenparoxismus, den Tiefseegraben darstellend.
3. Die komprimierten und metamorphosierten Gesteine sind in den tiefen Regionen unter dem Graben entstanden.
4. Der Krustenzusammenschub im rechten Winkel zur Geosynklinale ist bedingt durch den Sog oder das Druckgefälle unter der Geosynklinale. Aus beiden Richtungen werden die angrenzenden Krustenteile gegen das Tief zu gepreßt.
5. Faltung, Wurzeln von leichten Gesteinen und Überschiebungen sind die Folge des Hinunterziehens durch Sogspannung. Die Faltung ist eine gewöhnliche Reaktion eines Gesteins unter einseitiger Druckbeanspruchung. Die ausgezogenen Deckenwurzeln sind die Folge des Abwärtssoges einzelner Gesteinsdecken. Was wir an Überschiebungen beobachten, sind in Wirklichkeit Unterschiebungen und Unterströmungen plastischerer Gesteinsmassen.

6. Die Hebung nach vollendetem Bau des Gebirges ist eine notwendige Folge des Nachlassens der Abwärtspressung. Sobald die isostatische Angleichungskraft größer ist als die Sogpressung, so wird sich der Gebirgskörper heben.
7. Ältere Batholithe liegen meist als mit ihren Sedimentmänteln angesogene, geschobene und später gehobene Komplexe im Zentrum oder am Kontinentalrand des Orogens. Oft kann der Kontinentalrand von Decken durch Gravitationsgleitungen überfahren worden sein, so daß die Batholithe nun durch Erosion freigelegt, im Innern der Ketten zu liegen scheinen.

   Junge, zur Zeit des Orogens entstandene Batholithe liegen meist randlich angeordnet.
8. Gebirgsketten können in Kontinenten oder an deren Rändern auftreten.

Nach unserer Anschauung ist das Auftreten eines Kettengebirges die Folge von entsprechenden Mineralisationen, welche die Erdbebenexplosionen ermöglichen und damit durch Hitze die Konvektionsströme in Gang bringen.

Deshalb können die gleichen Annahmen auch für ozeanische Gebirge gemacht werden.

Die Erscheinungseigenschaften der Batholithe lassen sich nach der hier beschriebenen Anschauungsweise wie folgt erklären:

1. In jungen Gebirgen können die sauren Batholithe nur zu einem geringen Teile an die Oberfläche treten, da die Erosion zu wenig fortgeschritten ist. In älteren Gebirgen ist der Horizontalschnitt der Batholithe bedeutender und kann bis 50 % der Gebirgskette ausmachen. Die Batholithe wären das Produkt der Aufschmelzung durch Hitze und brauchen aus diesem Grunde in ihrer Größe nicht beschränkt zu sein.
2. Die Batholithkörper erscheinen meist parallel zu den Gebirgsketten in die Länge gezogen. Dies ist eine Folge ihrer Mitbeanspruchung im ganzen Bildungsprozeß. Es ist auch eine Folge der zonar angeordneten Explosionsfoci, welche notgedrungen auch dem Gebirge die zonare langgestreckte Anlage verleihen.
3. Die domähnliche Form der Batholithe ist gegeben durch die Hitzeausbreitung; die Aufschmelzung ging radial von Zentren aus. In welcher Art eine Magmazufuhr stattgefunden hat, wissen wir nicht.

4. Die Wurzel oder der Untergrund eines Batholithen wurde nicht gesehen. Er scheint nach unten zu in irgend einer Form mit kristallinen Gesteinen oder Schmelzfluß in Verbindung zu stehen.
5. Intrusionen durchschlagen oft die schon gefalteten Sedimente. Dies kann der Fall sein, wenn Explosionsfoci aus irgend einem Grunde bis unter das Vorlandtief vordringen. Dies kann Batholite in jüngst gefaltete Schichten einschmelzen und würde zugleich das Ende der ersten Phase bedeuten, indem dann die Abstiegsbewegung gebremst und die Aufstiegsphase des Gebirgskörpers eingeleitet wird. Dies würde die Intrusionen nach dem Tiefenparoxismus also während des isostatischen Aufstieges erklären.
6. Die Diskordanz der Batholithränder erklärt sich ebenso wie die eingeschmolzenen Schollen durch das Vordringen des Schmelzflusses mit Wärmenachschub. In gewissen Fällen werden auch Intrusionen entlang Spalten und Schichtfugen beobachtet, besonders bei basischen Schmelzflüssen.
7. Die batholithische Intrusion ersetzt das intrudierte Gestein durch Aufschmelzung.
8. Kontaktmetamorphose ist eine bekannte Folge der Aufschmelzung und Hitzewirkung.
9. Die chemische Zusammensetzung der Batholithgesteine ist ziemlich gleichförmig, obwohl auch hier Differenziationen die Regel sind. Es kann ein Stoffnachschub aus einem großen Reservoir der Tiefe angenommen werden.
10. Die Verschiedenartigkeit der Zusammensetzung macht sich von Ort zu Ort geltend; zum Teil kann dies die Folge der Aufschmelzung des Muttergesteins sein. Es kann auch von einer ursprünglichen Verschiedenheit der magmatischen Masse herrühren.

In diesem Sinne können wir die Alpen als eine Gebirgskette eines ausgesprochenen Tiefenorogens betrachten, welche sich im Stadium der Erosion befindet. Nach Osten zu, über Kaukasus—Hindukusch zum Himalaya, werden die hohen Gebirgsketten jünger. Der ganze Pazifische Raum ist gekennzeichnet durch junge und jüngste Orogene im Stadium 1 oder 2. Das Nord-Süd streichende amerikanische Kettengebirge scheint im Stadium 2 zu stehen, da die Schwereanomalien weniger ausgesprochen sind, das Gebirge schon hoch und der Tiefseegraben nicht mehr durchgehend in gleicher Tiefe vorhanden ist. Erosion und Ablagerung haben schon stark eingesetzt.

Schwankungen in der isostatischen Hebung können besonders in der zweiten Phase starken Einfluß auf die Gebirgsbildung ausüben.

Im übrigen ist zu sagen, daß auch hier eine große Zahl verschiedener Vorgänge und Umstände ineinander verflochten sind, die wir nur schrittweise abklären können und dazu das Sammeln weiteren Tatsachenmaterials abwarten müssen.

IX. Vermutungen

Die Frage nach der Art des Brennstoffes für die seismischen Explosionen möchten wir nicht erörtern und nur folgende Bemerkungen anbringen:

Chemische Reaktionen von zum Beispiel Wasserstoff und Sauerstoff erscheinen möglich. Die außerordentliche Durchdringungsfähigkeit des Wasserstoffs ist bekannt. Die Vulkane stoßen viel Wasser aus, das in magmatischen Schmelzflüssen vorhanden ist. Die Möglichkeit von Knallgasexplosionen in tieferen Regionen scheint zu bestehen, wenn bestimmte Entmischungsbewegungen angenommen werden.

Magmatische Kristallisationsvorgänge wurden schon früher als Ursache von Explosionen angenommen (1959, S. 121).

Wir können auch an nukleare Reaktionen denken. Daß Uraniummineralien in Frage kommen, ist nicht anzunehmen, da das Uranium in höheren Erdkrustenteilen angereichert erscheint. Immerhin können durch spezielle Druck- und Temperaturverhältnisse und subkrustale Strömungen, wie zum Beispiel eine Abwärtsverfrachtung ursprünglicher Oberflächenteile, örtliche Entmischungen und Konzentrationen entstehen. Das Zustandekommen von Kettenreaktionen auf diesem Wege ist aber trotzdem nicht möglich, da dies ja eine ganz spezielle Konzentration von U235 voraussetzen würde.

Eigenartig erscheint, daß die Häufigkeit der chromosphärischen Explosionen auf der Sonne von der gleichen Größenordnung ist wie diejenige der Beben auf der Erde. Zur Frage der Möglichkeit der Umwandlung von Wasserstoff in Helium wissen wir nur soviel, daß sowohl Wasserstoff als auch Helium im Erdinnern vorkommen.

Unsere Kenntnisse über die Zusammensetzung der tiefen Erdkrustenteile und die darin möglichen Vorgänge sind so gering, daß wir auf Mutmaßungen angewiesen sind. Aus dem gleichen Grunde dürfen wir aber auch nicht ungewohnte Annahmen als unmöglich bezeichnen, handelt

es sich doch um Regionen, aus denen wir als einzige Kunde die Erdbebenwellen erhalten. Die nukleare Forschung ist zudem noch keineswegs abgeschlossen, und wir können von ihr in Verbindung mit Tiefenbohrungen noch manche neue Aufklärung erwarten.

LITERATUR

KOCH, T. W. (1933): Analysis and effects of current movement on an active fault in Buena Vista Hills oil field: Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists 17: 694—712.

BIRCH, F. (1942): Handbook of Physical Constants Geol. Soc. Am. Spec. Paper 36.

GRIGGS, D. (1942): Strength and plasticity, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 36, pp. 107—130.

SCHROCK, R. R. (1948): Sequence in layered rocks (Mc Grawe-Hill Book Co., New York).

GUTENBERG, B., RICHTER, C. F. (1949): Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Princeton University Press.

EWING, M. (1950): Crustal structure and surface wave dispersion, Bull. Seis. Soc. Am. 40, pp. 271—280.

BLUMENTHAL, M. (1952): Sur l'inconstance du déjectement tectonique dans la zone orogénique Anatolienne, Intern. Geol. Congress, Report of the eighteen session, Great Britain 1948, Part XIII 1952.

KRAUS, E. (1954): Neue Gedanken zur Entstehung der Alpen, Eclog. geol. Helv., 47, Nr. 1.

BENIOFF, H. (1955): Seismic evidence for crustal structure and tectonic activity, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 62, pp. 61—74.

SONDER, A. (1956): Mechanik der Erde, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

SCHEIDEGGER, A. E. (1958): Principles of Geodynamics, Springer-Verlag, Berlin.

HOWELL, BENJAMIN F. jr. (1959): Introduction to Geophysics, Mc Graw-Hill Book Company, Inc.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA (1960), Vol. 7, Earthquakes, pp. 845—852.

LAUBSCHER, H. P. (1961): Die Mobilisierung klastischer Massen, Eclog. Geol. Helv. 54 Nr. 2, pp. 284—334.