

Geowiss. Mitt. 1
1973, 189 - 204

DAS SPANNUNGSFELD DER ERDE

von

E. Brückl

(Vortrag gehalten am 16. Mai 1973 im
Rahmen des Kolloquiums der Assistenten
der Studienrichtung Vermessungswesen)

Dipl.Ing.Dr. Ewald Brückl, Hochschulassistent am Institut für
Geophysik, Technische Hochschule in Wien 1040, Gußhausstraße
27 - 29.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Spannungsfeld der Erde werden wir in mannigfaltiger Weise konfrontiert. Aktuelle Auswirkungen sind die Erdbeben, Hebungen, Senkungen und Verschiebungen von Erdkrustenteilen und der Gebirgsdruck in künstlich geschaffenen unterirdischen Hohlräumen. Sichtbare Spuren des Spannungsfeldes treten uns in den Verfaltungen der Gesteinsschichten und in den Klüften entgegen. Zeugen für die Wirksamkeit des Spannungsfeldes globalen Ausmaßes sind die kontinentalen Gebirge, die Grabenbrüche und die mittelozeanischen Schwellen.

Bis heute können Spannungen im Gebirge nur durch den Umweg über Verformungsmessungen bestimmt werden. Bei den am häufigsten angewandten Meßmethoden wird die elastische Entspannung an Bohrkernen gemessen. Als erstes gesichertes Ergebnis zeigten diese Messungen hohe horizontale Spannungen in kontinentalen Plattformen.

Bei der Interpretation des Spannungsfeldes der Erde gelangt man zu einer Einteilung in gravitative Spannungen, tektonische Spannungen und Restspannungen. Die gravitativen Spannungen würden für sich allein wirkend eine hydrostatische Druckverteilung herbeiführen. Die tektonischen Spannungen sind für Gebirgsbildung und Kontinentaldrift verantwortlich und sie schöpfen ihre Energie aus dem Wärmereservoir des Erdinneren. Restspannungen sind von früheren tektonischen oder gravitativen Belastungen im Gestein gespeicherte Spannungen.

DEFINITION DES SPANNUNGSFELDES

Bevor wir über das Spannungsfeld der Erde sprechen wollen wir uns den physikalischen Begriff "Spannungen" genauer vor Augen führen.

Eine Spannung ist definiert als eine Kraft pro Flächeneinheit. Die Kraft, die auf eine Fläche wirkt, kann in eine Normal- und in zwei aufeinander senkrecht stehende Tangentialkomponenten zerlegt werden. Entsprechend dieser Zerlegung sprechen wir auch von Normal- und Tangentialspannungen. Bei den Normalspannungen kann es sich um Zug- oder Druckspannungen handeln, die Tangentialspannungen werden gelegentlich auch als Scher- oder Schubspannungen bezeichnet.

Durch eine Normalspannung und zwei Tangentialspannungen können wir die Spannungen, die auf eine Fläche mit einer beliebigen Flächennormalen wirken, beschreiben. Um den gesamten Spannungszustand zu beschreiben ordnen wir jeder durch die drei Raumrichtungen als Flächennormalen gekennzeichneten Fläche eine Normal- und zwei zu den beiden übrigen Koordinatenachsen parallele Tangentialspannungen zu. Diese neun Größen bilden den Spannungstensor.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Das Symbol σ bedeutet eine Normalspannung, der Index ihre Richtung. Das Symbol τ wird für die Tangentialspannungen verwendet, der erste Index gibt die Richtung der Flächennormale an, entlang der die Tangentialspannungen in der durch den zweiten Index gegebenen Richtung wirken.

Aus den Gleichgewichtsbedingungen für die Drehmomente folgt

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \end{aligned}$$

Der Spannungstensor ist somit symmetrisch und es sind nur 6 unabhängige Größen zu seiner Beschreibung notwendig.

Besonders anschaulich wird der Spannungstensor durch die Transformation auf das Hauptachsensystem. In dieser Darstellung verschwinden sämtliche Tangentialspannungen und der gesamte Spannungszustand wird durch die Normalspannungen in Richtung der drei aufeinander senkrecht stehenden Hauptachsen beschrieben.

Bisher haben wir die Spannungen in einem Punkt des Mediums besprochen. Betrachten wir den Spannungstensor als Funktion des Ortes, dann sprechen wir vom Spannungsfeld.

AKTUELLE WIRKUNGEN DES SPANNUNGSFELDES

Am 16. April 1972 um 10¹⁰h erschütterte das wahrscheinlich stärkste Erdbeben dieses Jahrhunderts den Osten von Österreich. Das Epizentrum lag im Raum von Seebenstein und Pitten, südlich von Wiener-Neustadt. In einem Gebiet von 100 km² Ausdehnung erreichte die Bebenintensität den Grad 7 nach der Mercalli-Sieberg Skala. Zwei alte Gebäude stürzten ein, Kirchtürme wurden beschädigt, Steinmauern erlitten klaffende Risse, Giebel und Schornsteine fielen auf die Straße. In den Wohnungen öffneten sich Kastentüren, Geschirr und Gläser zerbrachen in den Schränken, Vasen und Bücher stürzten von den Regalen.

Noch in der 60 km entfernten Bundeshauptstadt konnte eine Bebenintensität vom Grade 6 beobachtet werden. Die auffälligsten Schäden waren der Absturz einer Ballustrade vom Universitätsgebäude und das Abbrechen des Turmkreuzes von der St. Brigitta-Kirche. Die Bodenerschütterungen lösten unter den Menschen teilweise eine panikartige Flucht aus den Wohnhäusern und Kirchen aus. Das Ausmaß der Bodenbewegungen wurde von den Seismographen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik auf der Hohen Warte gemessen. Der größte Ausschlag des Fundamentes aus seiner Ruhelage betrug dort 2,43 mm.

Die Fühlbarkeitsgrenze des Bebens lag im Süd-Westen bei Klagenfurt und Villach, im Westen bei Zell am See. Besonders stark war die Ausbreitung des Bebens nach Norden. Neben vielen Meldungen aus der

Tschechoslowakei langten über 2000 Wahrnehmungsmeldungen aus der DDR und im besonderen aus Dresden ein.

Mit dem Erlebnis eines Erdbebens werden wir Zeugen der ständigen Wirksamkeit des Spannungsfeldes der Erde. Der Zusammenhang zwischen Erdbeben und Spannungsfeld soll kurz erläutert werden.

Ein Beben kann als Bruchvorgang in den obersten Schichten der Erde gedeutet werden. Um einen Bruch hervorzurufen, müssen Kräfte im Erdinneren wirksam sein, die die Gesteinsmassen einer Belastung aussetzen und Spannungen hervorrufen. Diese Spannungen deformieren die Gesteine bis deren Festigkeit überschritten wird. Es kommt zum Bruch und die aufgespeicherte Energie wird in Form seismischer Wellen abgestrahlt. Diese Wellen werden bei ausreichender Energie als Erdbeben an der Erdoberfläche wahrgenommen.

Wegen des soeben beschriebenen engen Zusammenhanges von Erdbeben und Spannungsfeld erhalten wir aus dem Studium der Erdbeben wertvolle Aufschlüsse über das Spannungsfeld der Erde. Von besonderem Interesse sind dabei die Verteilung der Erdbebenherde, das Ausmaß der freiwerdenden Energie und die Abstrahlcharakteristik der seismischen Energie.

Vom täglichen Leben des Menschen unbemerkt, aber mit den verfeinerten Methoden des Geodäten messbar, sind langsame Hebungen und Senkungen von Erdkrustenteilen, die das Ausmaß ganzer Länder oder sogar Subkontinente erfassen. Im Durchschnitt werden Bewegungsraten von 5 mm pro Jahr beobachtet. Die größten Hebungsbeträge werden in Skandinavien und Nordamerika mit 10 mm pro Jahr gemessen. Teile von Frankreich weisen den größten Absenkungsbetrag mit 26 mm pro Jahr auf. In Österreich ergab der Vergleich zwischen mehrmals im Tauern-tunnel durchgeführten Nivellements eine Hebung des Südportales gegenüber dem Nordportal um 7,8 mm in den letzten 20 Jahren.

Nicht nur Hebungen und Senkungen sondern auch horizontale Verschiebungen können durch geodätische Meßmethoden erfaßt werden. Ein besonders interessantes Gebiet ist hierbei der Bereich um die San Andreas Verwerfung in Kalifornien. Die San Andreas Verwerfung trennt mit einer Länge von über 1000 km die nordamerikanische Platte von der pazifischen. Beim Erdbeben von San Franzisko im Jahre 1906 verschoben sich die gegenüberliegenden Krustenteile entlang einer

Strecke von 400 km bis zu 6 m. Diesem und ähnlichen bei Erdbeben auftretenden Rucken überlagert sich eine kontinuierliche Kriechbewegung von etwa 5 cm/Jahr.

Ein weiterer aktiver Bereich ist die Mittelatlantische Schwelle. In Island, einer auf dieser Schwelle gelegenen Insel wurden Dehnungsbeträge von 1 cm/Jahr gemessen.

Dem Tunnelbauer und Bergmann sind die Wirkungen des Spannungsfeldes der Erde unter dem Namen Gebirgsdruck aufs engste vertraut. Beim Bau von Stollen, Schächten und Kavernen treten durch die technischen Eingriffe Spannungsumlagerungen im angrenzenden Fels auf. Das Gebirge drängt von allen Seiten in den künstlich geschaffenen Hohlraum. Es entsteht eine Auflockerungszone und es müssen geeignete technische Maßnahmen getroffen werden, dem natürlichen Streben des Gebirges, den Hohlraum wieder zu schließen, entgegenzuwirken. Für die richtige Anwendung dieser Maßnahmen ist dabei die Kenntnis des Verhältnisses von Seitendruck zu Vertikaldruck besonders wichtig.

Neben diesem allmählichen Hereindrängen des Gebirges in den künstlichen Hohlraum kommt es auch zu plötzlichen Entladungen der durch den technischen Eingriff induzierten Spannungen. Es sind dies die Bergschläge, bei denen, oft durch einen Knall begleitet, Felsplatten in den unterirdischen Hohlraum hereinbrechen. Ein Bergschlag kann als ein Erdbeben im kleinen aufgefaßt werden.

SICHTBARE SPUREN DES SPANNUNGSFELDES DER ERDE

Die sichtbaren Spuren des Spannungsfeldes der Erde finden wir in den Verformungen der Gesteinsschichten. Obwohl in der Natur alle Übergänge beobachtet werden können, wollen wir eine Einteilung in bildsame und in brechende Verformung vornehmen.

Am augenscheinlichsten zeigen sich uns die bildsamen Verformungen in der Ausbildung von Flexuren und Falten. Beim näheren Studium der Falten gelangt man zu einer Einteilung in verschiedene Falten-typen, die durch bestimmte geometrische Eigenschaften gekennzeichnet sind. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen einige Beispiele hiervon.

Um die Ausbildungsform der Falten mit dem Spannungsfeld, durch das sie entstanden sind in Beziehung zu setzen, wurden sowohl rechnerische, als auch experimentelle Untersuchungen vorgenommen. Als einfachstes Modell für die rechnerische Erklärung von Faltenbildungen kann die elastische Platte, die in ein visköses Medium eingebettet ist, angesehen werden. Dieses Modell ergibt eine durch Beobachtungen bestätigte Beziehung zwischen der Mächtigkeit der gefalteten Schicht und der Wellenlänge der Falten. Eine Erweiterung erfuhr diese Theorie durch die Betrachtung von Schichten mit stark unterschiedlicher Viskosität und schließlich durch die Untersuchung eines anisotropen viskösen Mediums.

Während die rechnerischen Ansätze zumeist auf kleine Verformungen begrenzt bleiben, eröffnen Modellversuche die Möglichkeit, die speziellen Ausbildungsformen der Falten in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften und den aufgebrachten Spannungen zu studieren. Hierbei ist eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Modell und Natur erzielt worden.

Zeugen der brechenden Verformung, die die Erdkruste erlitten hat und noch immer erleidet finden wir in den Klüften. Ihr Größenbereich reicht von feinen Rissen im Gestein, die nur bei näherem Hinsehen erkennbar sind und deren Abstand voneinander manchmal weniger als einen Zentimeter beträgt, bis zu großen Störungen des Gesteinsverbandes, die auf Luftbildern oder Satellitenbildern erkennbar sind. Beispiele von Klüften sind in Abb. 3 gezeigt. Alle diese Klüfte, Versetzungen, Verwerfungen und Störungen sind als Brüche des Gesteins oder ganzer Erdkrustenteile unter der Belastung des Spannungsfeldes zu verstehen. Ihr Entstehen kann zumeist durch die Mohr'sche Bruchtheorie beschrieben werden. Diese Theorie stellt eine Verbindung zwischen den räumlichen Winkeln zweier zur gleichen Zeit entstandener konjugierter Kluftscharen und der Orientierung der Hauptachsen des sie erzeugenden Spannungsfeldes her. Sie hat in vielen Laboratoriumsuntersuchungen ihre Bestätigung gefunden.

So klar die Bruchbedingungen im ungestörten Gestein bereits formuliert sind, so schwierig wird die Analyse der Vielfalt von Klüften, die durch fortschreitende Deformation und die Beanspruchung durch verschiedene Spannungsfelder entstehen.

Sichtbare Spuren des Spannungsfeldes der Erde globalen Ausmaßes finden wir in den Grabenbrüchen, den kontinentalen Faltengebirgen und den mittelozeanischen Schwellen. Ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen diesen Strukturen liefert das Konzept der Plattentektonik. Die Vorstellungen der Plattentektonik entstanden aus der Erkenntnis, daß sich die tektonische Aktivität auf diese relativ schmalen Strukturen beschränkt. Auf diese Bereiche konzentrieren sich auch fast ausschließlich die seismische und vulkanische Aktivität. Man nimmt an, daß diese aktiven Gürtel durch Relativbewegungen von verhältnismäßig wenigen, großen starren Erdkrustenteilen verursacht werden. Das Beobachtungsmaterial, das zum Konzept der Plattentektonik führte, lieferte das Studium der Erdbeben, die Paläomagnetik, Tiefseebohrungen und geologische und klimatische Korrelationen über Kontinente hinweg, wie sie bereits ALFRED WEGENER vorgenommen hat.

MESSUNGEN DES SPANNUNGSFELDES

Wir haben bis jetzt eine Fülle von Naturerscheinungen kennengelernt, aus denen wir Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Spannungsfeldes der Erde ziehen können. Kein einziges Phänomen aber erlaubt uns eine direkte Bestimmung der Größen, die das Spannungsfeld charakterisieren. Es besteht somit der Wunsch, das Spannungsfeld direkt durch Messung zu bestimmen. Zwei prinzipielle Erschwernisse gegenüber der Messung anderer geophysikalischer Felder, wie etwa dem Schwerfeld oder dem Magnetfeld, treten uns bei der Messung des Spannungsfeldes entgegen. Erstens müssen wir in einem Punkt der Erdkruste zur vollen Bestimmung des Spannungsfeldes sechs unabhängige Größen messen. Zum zweiten sind die Spannungen an das sie beherbergende Medium gebunden und können im Außenraum nicht beobachtet werden. Wir müssen uns zur Messung also in das Innere des Gebirges begeben.

In den letzten 15 Jahren wurden Verfahren entwickelt, die die Messung des Spannungsfeldes in Bohrlöchern möglich machten. Die Messungen beruhten auf dem Prinzip, daß Spannungen in dem von ihnen erfaßten Stoffen Verformungen hervorrufen. Wird eine unter Spannung stehende Gesteinsprobe durch eine Kernbohrung aus dem Gebirgsver-

band herausgelöst, wo wird sie vom Einfluß des Spannungsfeldes befreit und hat das Bestreben, die erlittenen Deformationen wieder rückgängig zu machen. Die bei der Entspannung auftretenden Dehnungen können gemessen werden und daraus kann auf die im Gesteinsverband herrschenden Spannungen geschlossen werden. Von großer Bedeutung bei diesem Meßverfahren ist aber die Kenntnis des Formänderungsverhaltens der Gesteine. Je nach Ausmaß und Geschwindigkeit der Beanspruchung zeigen die Gesteine elastisches, plastisches oder auch visköses Verhalten und wir nennen die Summe dieser Eigenschaften die Rheologie der Gesteine.

Der Meßvorgang der Spannungen zeigt uns also, daß wir zur Erforschung des Spannungsfeldes der Erde auch die Rheologie der Gesteine und des Gebirges erforschen müssen. Kenntnis vom Spannungsfeld der Erde können wir nur durch den Umweg über die Rheologie erlangen. Dieses Prinzip gilt auch für die Interpretation aller auf das Spannungsfeld zurückführbaren Erscheinungen.

Im Rahmen des Internationalen Geodynamik Projektes werden vom Institut für Geophysik der Technischen Hochschule in Wien Spannungsmessungen durchgeführt. Die dabei angewandte "Doorstoppermethode" soll nun näher beschrieben werden.

Von einem Stollen aus wird mit Diamantbohrkronen ein Loch gebohrt, das bis über den das Spannungsfeld verfälschenden Einfluß des Stollens hinaus reicht. In der gewünschten Tiefe wird der Bohrlochgrund mit entsprechenden Kronen geglättet. Sodann wird mit einem Einbauwerkzeug die Meßzelle - der "Doorstopper" - in das Bohrloch eingebracht und am geglätteten Bohrlochgrund angeklebt. Während dieses Vorganges ist der "Doorstopper" über eine Steckverbindung und ein Kabel mit einer Meßbrücke verbunden. Nach Erhärten des Klebers wird für die drei in der Meßzelle enthaltenen Dehnungsmeßstreifen ein Nullabgleich durchgeführt. Die Steckverbindung zum "Doorstopper" wird gelöst und Einbauwerkzeug und Kabel werden abgezogen. Danach beginnt das Überkernen. Hierbei wird der Kern, an dem der "Doorstopper" klebt, aus der Einspannung im Gebirge herausgelöst und es tritt eine Entspannung ein. Mit Hilfe des Kernrohres wird der Kern aus dem Bohrloch herausgeholt. Die Steckverbindung zur Meßbrücke wird wiederhergestellt und der Betrag der durch die Entspannung erfolgten Dehnung

des Kernes wird gemessen. Mit Hilfe der gesondert zu bestimmenden elastischen Konstanten können aus diesen Dehnungen die Spannungen berechnet werden. Zur vollständigen Bestimmung des Spannungstensors sind Messungen in drei verschieden orientierten Bohrlöchern notwendig. In Abbildung 4 sind Bohrkern, "Doorstopper"-Meßzelle und Einbauwerkzeug gezeigt.

ERGEBNISSE DER SPANNUNGSMESSUNGEN

Messungen des Spannungsfeldes sind bisher vor allem in Skandinavien, Nordamerika, Südafrika und in der Sowietunion durchgeführt worden. Das Ziel der Messungen war zumeist die Klärung bergmännischer und felsbaulicher Fragen. Betrachtet man jedoch die Gesamtheit dieser Messungen aus geophysikalischer Sicht, so zeigt sich als erstes gesichertes Ergebnis die Existenz unerwartet hoher horizontaler Druckspannungen in alten kontinentalen Plattformen. Diese betragen an der Oberfläche im Mittel 90 kp/cm^2 und sie nehmen mit der Tiefe stärker zu, als man es auf Grund der Überlagerung annehmen würde. Die Hauptachsen des Spannungstensors sind entweder senkrecht oder parallel zur Erdoberfläche orientiert. Dies besagt, daß in vertikalen Ebenen keine vertikalen Tangentialspannungen und in horizontalen Ebenen überhaupt keine Tangentialspannungen vorhanden sind. Da die beiden horizontalen Hauptspannungen oft jedoch sehr unterschiedlich sind, treten oft sehr große horizontale Tangentialspannungen in vertikalen Ebenen auf.

Gegen die Erdoberfläche geneigte Hauptspannungsachsen findet man in den Randgebieten der kontinentalen Plattformen. Entgegen geologisch begründeten Erwartungen wurden auch in Island und im Bereich des Ostafrikanischen Grabensystems horizontale Druckspannungen gemessen.

Trotz der vielen, bereits vorliegenden Messungen bedarf es noch vieler weiterer Arbeit, um zu einem globalen Überblick über aktuelle Spannungen in der Erdkruste zu gelangen. Eine Favorisierung der Kontraktionstheorie der Erde auf Grund der vorliegenden Daten scheint noch verfrüht.

INTERPRETATION DES SPANNUNGSFELDES

Die schwierigste, aber auch interessanteste Frage ist jene nach der Herkunft und dem Entstehen des Spannungsfeldes der Erde.

Eine erste Ursache finden wir im Schwerfeld der Erde. Die Schwerkraft greift in jedem Massenpunkt der Erde an und ihre Wirkungslinie bestimmt die Lotrichtung. Sie ist im wesentlichen für den Überlagerungsdruck in den Stollen der Bergwerke verantwortlich. Würde von heute an nur mehr die Schwerkraft auf die Erde einwirken, so würde sich ähnlich wie in den Ozeanen auch in der Erdkruste ein hydrostatisches Gleichgewicht ausbilden. Die Zeit, bis dieser Zustand erreicht wäre, würde nur von der Fließbereitschaft des Gebirges, also seiner Rheologie, abhängen. Der auf die Schwerkraft zurückführbare Anteil des Spannungsfeldes der Erde ist somit sicherlich von großer Bedeutung. Er hat eine ordnende und Unterschiede ausgleichende Funktion. Die Mannigfaltigkeit der an der Erdoberfläche beobachtbaren Erscheinungen kann er aber nicht erklären.

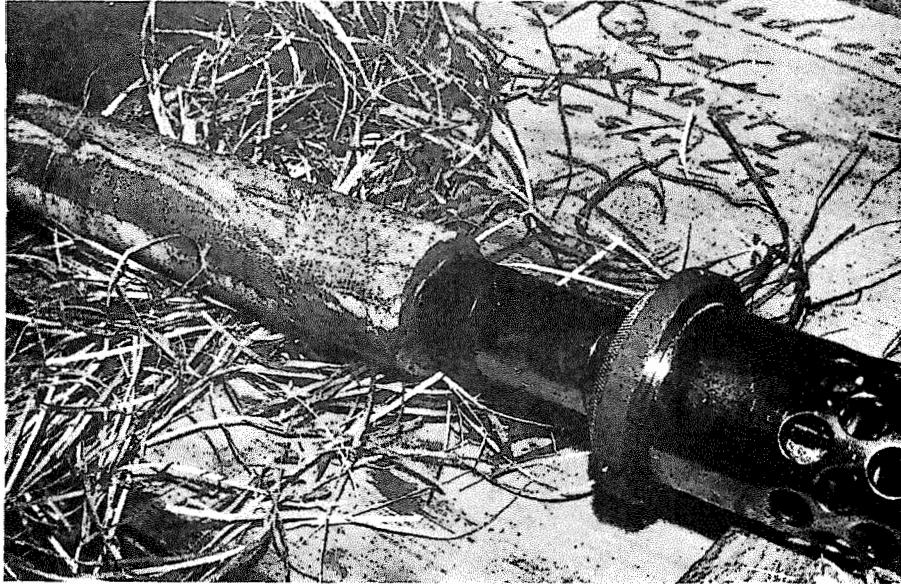
Wollen wir die geologischen Ereignisse wie die Gebirgsbildungen, das Aufreißen von Gräben und das Auseinanderfließen der ozeanischen Kruste verstehen, so müssen wir das Wirken tektonischer Kräfte annehmen. Das Energiereservoir für diese Kräfte bildet die Wärme, die im Erdinneren gespeichert ist. Der Mechanismus, wie die Erde Wärme in Bewegung umsetzt, ist bis heute unbekannt und bildet den Ansatzpunkt für viele Hypothesen. Wie diese Kräfte und das aus ihnen folgende tektonische Spannungsfeld auch zustandekommen mögen, ihre Wirkungen in der geologischen Vergangenheit sind uns allen sichtbar und es besteht kein Grund, an ihrem Weiterwirken in der Gegenwart zu zweifeln.

Neben den gravitativen und den tektonischen Spannungen haben wir aber noch eine dritte Komponente des Spannungsfeldes der Erde. Es sind dies die Restspannungen. Sind im Wechsel des geologischen Geschehens Gebirgsmassen einmal gravitativen oder tektonischen Spannungen ausgesetzt und hernach wieder entlastet worden, so vermag das Gebirge die ihm aufgeprägten Spannungen nicht zur Gänze und sofort abzubauen. Es bleiben die Restspannungen im Gesteinsverband zurück. Dieser Spannungsanteil ist wieder ganz wesentlich durch die Rheolo-

gie des Gebirges bestimmt. Die Restspannungen sind sozusagen der im Gedächtnis des Gebirges zurückgebliebene Anteil früher einmal wirksam gewesener gravitativer oder tektonischer Spannungen.

Abbildung 4

Bohrkern, "Doorstopper" und Einbauwerkzeug

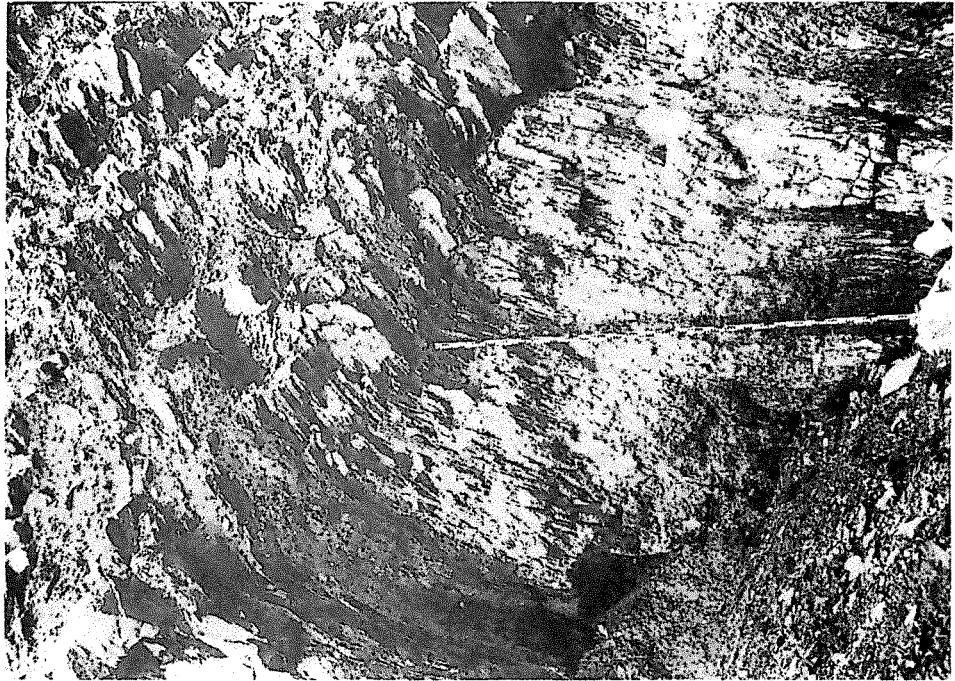


Bohrkern mit angeklebtem "Doorstopper"



Abbildung 2

Hakenwerfen



Komplexe Verfaltung

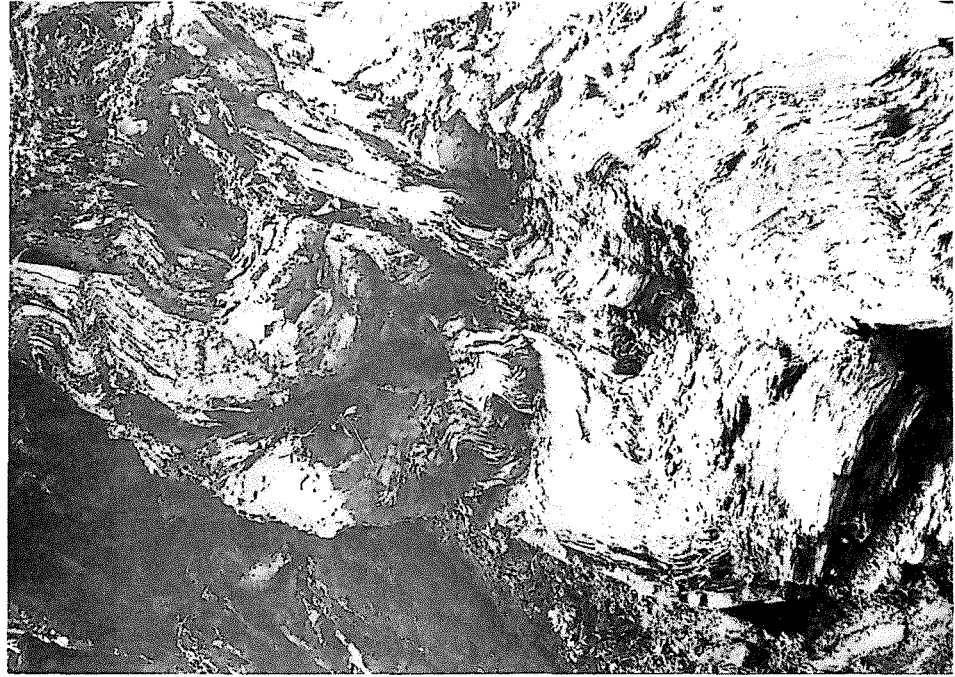


Abbildung 3

Konjugierte Klüfte



Durch Hangbewegungen zerlegter Kluftkörperverband



Abbildung 1

Konzentrische Falte



Zickzackfalte

