

In situ Spannungsmessungen an der
Periadriatischen Naht in der Ebriachklamm
bei Eisenkappel (Kärnten, Österreich)

von

F. KOHLBECK*, G. RIEHL-HERWIRSCH**,
K.-H. ROCH* und A. E. SCHEIDEGGER*

8 Abb., 1 Tab.

Anschrift der Verfasser:

* Institut für Geophysik
Technische Universität Wien
Gusshausstraße 27–29,
A-1040 Wien

** Institut für Geologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13,
A-1040 Wien

Inhalt

Zusammenfassung	140
Abstract	140
Résumé	141
1. Einleitung	141
2. Situierung, Morphologie	142
3. Geologie	142
4. Meßverfahren	145
5. In situ Spannungsmessungen	146
6. Gesteinsphysikalische Untersuchungen	146
6.1 Einachsige Druckversuche	146
6.2 Versuche mit der Radialpresse	147
6.3 Dichte der Proben	147
7. Berechnung des Spannungstensors	147
8. Kluftrmessungen	148
9. Schlußfolgerungen	148
Dank	151
Anhang	151

Zusammenfassung

In situ Spannungsmessungen nach dem doorstopper-Verfahren wurden im Bereich der Periadriatischen Naht in einer schmalen vertikalen Einschaltung von Diabas, welcher beidseitig an Schiefer weit geringerer Festigkeit angrenzt, durchgeführt. Für die Hauptspannungen wurden die Werte $\sigma_1 = 2$, $\sigma_2 = 6$ und $\sigma_3 = 9$ MPa gefunden, σ_1 ist 30° zur Vertikalen geneigt und entspricht der Wirkung der überlagerten Gesteinsmassen. σ_2 und σ_3 liegen ungefähr horizontal. Die Richtung von σ_3 beträgt NNW. In Anbetracht der geringen, nicht stark unterschiedlichen Werte von σ_2 und σ_3 kann jedoch kaum von einer Vorzugsrichtung gesprochen werden. Mittlere Horizontalspannung und Vertikalspannung stehen im Verhältnis 2:1. Dieser Wert steht im Einklang mit den Werten, die weltweit in Oberflächennähe gefunden wurden.

Abstract

In situ stress measurements in the vicinity of the Periadriatic Lineament
in the Ebriach gorge near Eisenkappel (Carinthia, Austria)

Doorstopper-type in-situ stress measurements were made in the Ebriach gorge near Eisenkappel in Carinthia, Austria. This location was in the vicinity of the Periadriatic Lineament in a small diabase dyke which is bounded on both sides by slates of much smaller rigidity. For the principal stresses, values of $\sigma_1 = 2$, $\sigma_2 = 6$ and $\sigma_3 = 9$ MPa were found. σ_3 has an inclination of 30° towards the vertical and corresponds to the action of the superjacent rock masses. σ_2 and σ_3 are approximately horizontal. The direction of σ_3 is NNW. However, in view of the closeness of the values of σ_2 and σ_3 , one can hardly speak of a preferred orientation. The average values of the horizontal and vertical stresses are in the ratio of 2 : 1. This ratio is in conformity with those found on a world-wide basis near the surface of the Earth.

Résumé

Determinations sur place des contraintes tectoniques dans les environs de la suture Périadriatique dans la gorge de l'Ebriach près d'Eisenkappel (Carinthie, Autriche)

Des déterminations des contraintes furent faites sur place (methode „door-stopper“) dans les environs de la suture Périadriatique, dans un filon étroit de diabase qui est abordé aux cotes par des schistes de petite rigidité. Pour les contraintes principales on trouve $\sigma_1 = 2$, $\sigma_2 = 6$ et $\sigma_3 = 9$ MPa. Ici, σ_1 est inclinée à 30° vers la verticale et correspond à l'effet de la superposition des masses rocheuses. σ_2 et σ_3 sont à peu près horizontales. La direction de σ_3 est NNW. Cependant, en regardant les petites valeurs de σ_2 et σ_3 qui ne diffèrent pas beaucoup entre elles, on voit qu'on ne peut pas parler avec certitude d'une direction préférée. La valeur de la contrainte horizontale moyenne et de la contrainte verticale sont dans le rapport 2:1. Ce rapport est conforme à celui que l'on trouve autre part dans le monde.

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit Studien über das neotektonische Spannungsfeld unternahm das Institut für Geophysik auf Anregung des Institutes für Geologie der Technischen Universität Wien in-situ Spannungsmessungen in der Ebriachklamm in der Nähe von Eisenkappel. Diese Meßstelle wurde gewählt, weil sie sich in unmittelbarer Nähe der Periadriatischen Naht befindet, welche für die Tektonik der Ostalpen von großer Bedeutung ist.

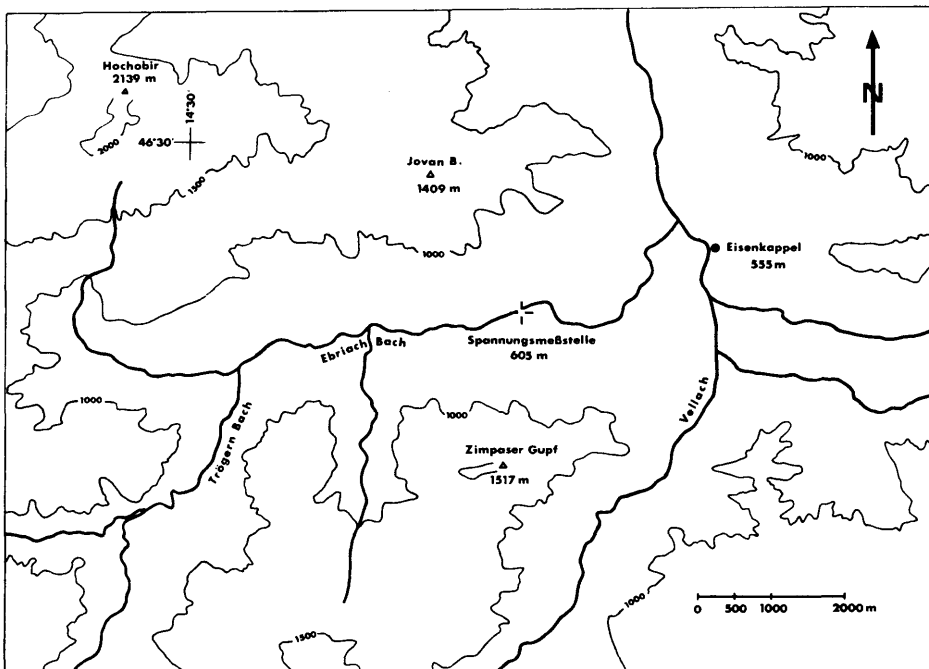


Abb. 1: Situierung und Geologie der Meßstelle.

Die gewählte Bohrstelle (Situierung siehe Abb. 1) befindet sich über Tag. Dies brachte, gegenüber anderen in-situ Spannungsmessungen des Institutes für Geophysik, Schwierigkeiten mit sich. So ergaben sich eine Reihe technischer Probleme wegen Hochwasser des Ebriachbaches, einer tiefen Auflockerungszone und Wasserführung der Bohrlöcher. Weiters war eine Komponente des räumlichen Spannungstensors mit den vorhandenen Mitteln meßtechnisch nicht bestimmbar und mußte aus topographischen Überlegungen abgeschätzt werden. Es konnte jedoch eine signifikante tektonische Spannungskomponente nachgewiesen werden.

2. Situierung, Morphologie

Die Situierung der Spannungsmeßstelle ist in Abb. 1 gezeigt. Man befindet sich hier inmitten des Karawankenzuges, wo die Zone der "Periadriatischen Naht" in einer E-W gerichteten Talfurche durchzieht.

Das Tschernitz- und das Ebriachtal verlaufen parallel zu dieser Naht. Im Bereich der Täler, an den Hängen, treten zahlreiche Massenbewegungen auf. Im Ebriachtal kommen Ergußgesteine (Pillow-Lava: Abb. 2), wie im nächsten Abschnitt noch genauer beschrieben, zum Vorschein. Quertäler münden in die Längstäler im allgemeinen durch eine Klamm (z. B. Trögernklamm, Abb. 3). Die Talschlüsse der Quertäler bilden riesige ausgeräumte Kessel (Trögerntal, Vellacher Kotschna).

Die Meßstelle wurde im Talboden der Ebriachklamm angelegt. Es konnte dadurch erwartet werden, daß sich der Überlagerungsdruck nicht so einseitig, wie in den bisherigen Unter-Tage-Messungen des Institutes für Geophysik (BRÜCKL, ROCH & SCHEIDEGGER 1975; CARNIEL & ROCH 1976) bemerkbar machen wird, da das Gelände in der Nachbarschaft der Meßstelle bedeutend geringere Höhenunterschiede aufwies als bei den früheren Meßstellen.

3. Geologie

Wie die Übersichtsskizze Abb. 1 zeigt, liegt die momentan in Angriff genommene Meßstelle in der Ebriachklamm W der Ortschaft Eisenkappel und damit im N der Periadriatischen Naht. Die „Naht“ wird S der Klammstrecke durch den „Granitzug“ von Eisenkappel markiert. Die Altersstellung und Position dieses mechanisch hier vollkommen zerstörten Granits wird von EXNER (1971 und 1976) ausführlich besprochen und als tektonische Lamelle beschrieben, die N vergent in den alpinen Bauplan der Karawanken eingeschichtet ist. EXNER spricht auch von einer Mylonitisierung an den Rändern sowie im Inneren der Granitlamelle, die er auf alpidische Einengung zurückführt. Die Folge der Tonschiefer mit Grauwackenlagen mit den Diabas-Splitteinschaltungen (1–4 des Profils Abb. 6) beschrieb zuletzt LÖSCHKE in zahlreichen Teilarbeiten (LÖSCHKE 1970, 1972, 1973). Hier finden wir in einer Ton-Silitfolge Ergüsse von Pillow Laven sedimentär eingelagert. Neben dieser Pillow Folge, die eindeutig die submarine Platznahme belegt, sind Tuffe bis Tuffite sowie sekundär eingedrungene Lagergänge eingeschaltet. Die Altersstellung dieser Vulkanitfolge ist nicht durch Fossilien belegt. Die fazielle Ausbildung und Position der basischen Vulkanitfolge läßt eine der Magdalensbergfolge analoge Alterseinstufung in das Oberste Caradoc (RIEHL-HERWIRSCH 1970), im Sinne des Profils FRITSCH (1965), also als normale paläozoische Unterlage des N alpinen Obirzuges, zu. Eine absolute Altersbestimmung von JÄGER in LÖSCHKE (1973) in das Oberkarbon ist wohl eher als das Alter einer schwachen Metamorphose anzunehmen. Damit von LÖSCHKE verglichene Al-



Abb. 2: Ergußgesteine mit Pillow-Lava



Abb. 3: Trögernklamm

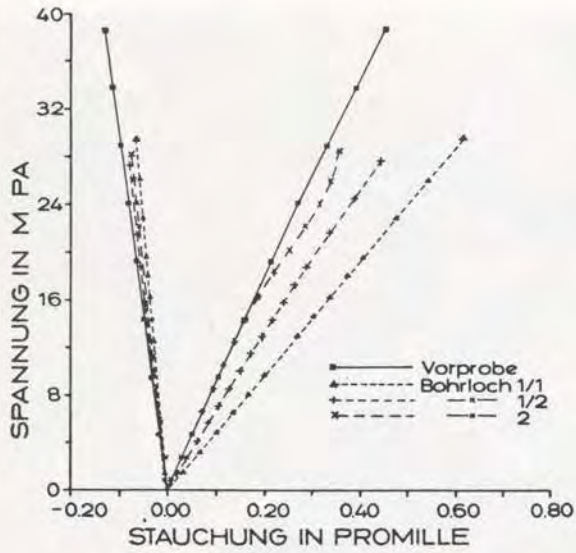


Abb. 4: Spannungs-Verformungsdiagramm der Diabas-Proben im einachsigen Druckversuch. Längsstauchungen positiv, Querverformungen negativ.



Abb. 5: Aufschluß im Bereich des Trögernbaches

tersangaben von VAI (1971) müßten ebenfalls überprüft werden.

Abb. 2 zeigt die hervorragend ausgebildete Pillow Lava sowie die relativ ungestörte mehr oder minder homogene Gesteinsbeschaffenheit, welche ein eigenständiges mechanisches Verhalten des Erstarrungsgesteinszuges gegenüber den schiefrig ausgebildeten Tonschiefer-Silit-Folgen in N und S erwarten ließ. Der Diabaskörper ist in der vorliegenden Position der einzige massive Komplex, der die Möglichkeit von Spannungsübertragung bietet, die in den Schiefen nicht gegeben wäre. Die vorliegende Meßstelle (Profil Abb. 6) liegt, wie schon im vorhergehenden Abschnitt gesagt wurde, in der steil eingeschnittenen Kerbe der Ebriachklamm. Die zu beiden Seiten aufragenden Wände zeigen die hohe Gesteinsfestigkeit der „Diabas-Zone“, die wie ein harter Kern in der geschieferten „Abfolge“ liegt.

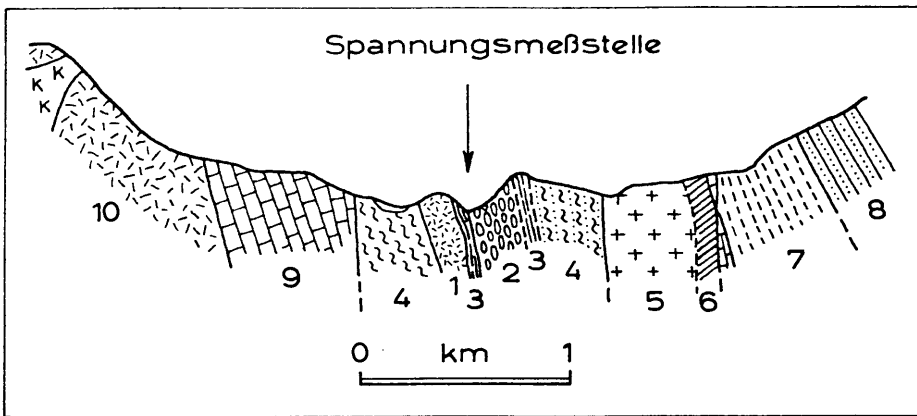


Abb. 6: Geologisches Profil durch Meßstelle. 1: Diabase und Spilite (Lagergänge und Differentiate). 2: Diabas-Spilit Pillowlava. 3: Tuffe und Tuffite. 4: Tonschiefer bis Grauwacken. 5: Granit (stark tektonisch beansprucht). 6: Kontakthof des Granites. 7: Karbonschiefer mit Kalkeinschaltungen. 8: „Grödener Schichten“, vorwiegend rote sandig-tonige Abfolge. 9: Muschelkalk. 10: Hauptdolomit (Kalk). – Profil von G. RIEHL-HERWIRSCH nach Unterlagen von BAUER (1970), LOESCHKE (1970, 1972, 1973) und eigenen Beobachtungen.

4. Meßverfahren

Die Durchführung der Spannungsmessungen erfolgte mit dem „doorstopper“-Verfahren nach LEEMAN (1971). Bei diesem Verfahren wird zuerst ein Bohrloch bis zu einer Teufe hergestellt, bei der möglichst keine oberflächliche Auflockerung des Gebirges vorliegt. Der Bohrlochgrund wird sodann senkrecht zur Bohrlochachse eben poliert und eine Dehnmeßzelle aufgeklebt. Durch Überbohren dieser wird ein Bohrkern mit der stirnseitig aufgebrauchten Meßzelle entnommen. Während des Bohrvorganges entlastet sich der Kern und die dadurch entstandene Verformung kann mit der Meßzelle registriert werden. Die zu den gemessenen Verformungen maßgeblichen Spannungen müssen in zusätzlichen Laborversuchen bestimmt werden. Üblicherweise werden dabei Messungen mit einer eigens für das doorstopper-Verfahren entwickelten Radialpresse (LEEMAN 1971) oder einachsige Druckversuche ausgeführt.

Die Anwendung der Radialpresse bei gleichzeitiger Verformungsmessung an der Meßzelle gestattet die Rekonstruktion des stirnseitigen Spannungszustandes vor der

Entlastung für jeden einzelnen Bohrkern. Bei gering inhomogenem und wenig anisotropem Gestein ist für die Spannungsberechnung die Ermittlung des Elastizitätsmoduls E und der Querdehnung ν aus einachsigen Druckversuchen ausreichend. Für die Bestimmung des dreidimensionalen Spannungszustandes sind insgesamt 3 Bohrungen notwendig.

5. In situ Spannungsmessungen

Es wurden insgesamt zwei Bohrlöcher mit 76 mm Lochdurchmesser angelegt. Die Achsrichtung, gemessen von N nach E, und die Fallwinkel betragen: für Bohrloch 1: $152^\circ/03^\circ$, für Bohrloch 2: $120^\circ/05^\circ$. Die Bohrlöcher münden liegen ca. 2 m über der Talsohle und haben einen gegenseitigen Abstand von 2,70 m.

Die Meßeinrichtung zur Erfassung der Widerstandsänderungen der Dehnmeßzelle bestand aus einer 5 kHz Trägerfrequenzbrücke mit einer automatischen Umschaltung der Kanäle und digitaler Anzeige des Meßwertes. Die kleinste ablesbare Einheit entsprach einer Verformung von $0,4 \mu\text{m/m}$. Die Genauigkeit der Messung war durch Änderungen der Kabelkapazitäten, durch Fehler in der Umschalteinrichtung und durch Temperatureinflüsse auf ca. $20 \mu\text{m/m}$ begrenzt.

Die beengte Lage der Bohrstelle im Bett des zeitweise Hochwasser führenden Wildbaches sowie niedrige Temperaturen von 8°C und Kluftwasser in den Bohrlöchern brachten eine Reihe technischer Probleme. Insbesondere ergaben sich Schwierigkeiten bei der Klebung der Meß-Zelle. So mußten sowohl Meßzelle als auch die dazugehörige Setzeinrichtung vor Kluftwasser geschützt werden. Wegen der schwankenden Außentemperaturen und der konstant niedrigen Temperaturen im Bohrloch bestand die Gefahr des Beschlagens der Klebeseite während des Einbringens. Langsames Aushärten des zur Verfügung stehenden Klebers bei 8°C ergab lange Wartezeiten. Nicht zuletzt brachte die hohe Klüftigkeit des Diabas eine große Zahl von Ausfällen. Von 13 Versuchen in Bohrloch 1 waren 8, von 15 Versuchen in Bohrloch 2 waren 5 erfolgreich. Die Messungen wurden in einem Bereich von 10 m bis 16 m Teufe durchgeführt.

6. Gesteinsphysikalische Untersuchungen

6.1 Einachsige Druckversuche

An insgesamt vier Proben wurden einachsige Druckversuche in einer 2 MPa-Pressen durchgeführt. Die Messung der Verformung erfolgte in Umfangsrichtung mit jeweils zwei Dehnmeßstreifen von 60 mm Meßgitterlänge, in Längsrichtung mit zwei elektronischen Setzdehnungsmessern von 100 mm Meßlänge. Die Lastaufbringung erfolgte in Stufen ausgehend von einer Vorlast auf die Hauptlast und anschließender Entlastung auf Vorlast. Die Hauptlast wurde nach jeder Entlastung erhöht. Außer dem Spannungs-Verformungsverlauf wurden somit die elastischen und die bleibenden Verformungen erfaßt. Weiters wurden die Entlastungsmoduli in Abhängigkeit von der jeweiligen Laststufe ermittelt. Abb. 4 zeigt den Verlauf der Spannungen in Abhängigkeit von den Gesamtstauchungen, wobei die Querdehnungen als negative Stauchungen eingetragen sind.

Die „Vorprobe“ entstammt einem abgeschliffenen Stein des Bachbettes und diente als Vorerkundung zu den in situ Messungen. Probe 1/1 wies nach Versuchsende eine gering geöffnete Kluft auf und wurde nicht für die weitere Auswertung verwendet. Probe 1/2 stammt aus 15,1 m Teufe des Bohrloches I, Probe 2 aus 16 m Teufe des Bohrloches II.

6.2 Versuche mit der Radialpresse

Die Druckversuche in der Radialpresse erreichen nicht die Genauigkeit der einachsigen Versuche. Insbesondere ergeben sich Fehler, wenn die Druckmanschette der Presse nicht genau mit der Stirnseite der Probe abschließt (siehe RIBACCHI 1977).

Im vorliegenden Fall zeigten die Meßwerte weitgehende Homogenität und Isotropie des Gesteins. Es war daher nicht zweckmäßig, für jede Probe gesondert elastische Konstanten zu bestimmen. Wegen der größeren Genauigkeit wurden daher die Werte aus den einachsigen Versuchen für die weiteren Rechnungen verwendet.

6.3 Dichte der Proben

Die Proben der einachsigen Druck-Versuche wurden zur Bestimmung der Dichte herangezogen. Das Volumen wurde durch Ausmessen von Höhe und Durchmesser mit Schiebelehre auf 0,1 mm, das Gewicht auf 0,5 g genau gemessen. Es ergaben sich folgende Werte:

Probenbezeichnung	Dichte in kg/m ³
Vorprobe	2850
Probe 1/1	3070
Probe 1/2	2960
Probe 2	3030

7. Berechnung des Spannungstensors

Für die Berechnung des Spannungstensors wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Im gesamten Meßbereich besteht der gleiche Spannungszustand
2. Die Bohrkerne verhalten sich elastisch isotrop
3. Die Kerne eines Bohrlochs haben gleichen Elastizitätsmodul E und Querszahl ν
4. Alle Koordinatensysteme sind orthogonale Rechtssysteme. Zu jedem Bohrloch wird ein lokales Koordinatensystem mit Achse 1 horizontal, Achse 2 annähernd vertikal aufwärts, Achse 3 in Richtung der Bohrlochachse, vom Bohrlochgrund zum Bohrlochmund positiv gerechnet, angenommen. Die Gebirgsspannung wird in einem zentralen Koordinatensystem angegeben, welches parallel zum lokalen Koordinatensystem des Bohrloches 1 liegt.
5. Zwischen den Spannungen σ'_{ik} am Bohrlochgrund und den Spannungen σ_{ik} im ungestörten Bereich, beide im lokalen Koordinatensystem angegeben, gelten die Beziehungen (VAN HEERDEN 1968)

$$\begin{aligned} \sigma_{11}' &= a\sigma_{11} + b\sigma_{22} + c\sigma_{33} \\ \sigma_{22}' &= a\sigma_{22} + b\sigma_{11} + c\sigma_{33} \\ \sigma_{12}' &= a\sigma_{12} \end{aligned} \tag{1}$$

Für a, b, c wurden nach (VAN HEERDEN 1968) folgende Werte angenommen

$$a = 1,25 \qquad b = 0 \qquad c = -0,75(0,645 + \nu) \tag{2}$$

Mit den Annahmen 1–5 findet man folgenden Zusammenhang zwischen den gemessenen Verformungen ϵ an der Stirnseite des Bohrkerns und den unbekanntenen Komponenten τ_{ik} des Spannungstensors im zentralen Koordinatensystem (Herleitung siehe Anhang).

$$\begin{aligned} \epsilon(\ell, \alpha) \cdot E(\ell) &= \sum_{i,k} B(\ell, \alpha)_{ik} \tau_{ik} \\ \epsilon(\ell, \nu) &= \text{Verformung im Bohrloch Nr. } \ell \text{ in Richtung } \alpha \end{aligned} \tag{3}$$

$E(\ell)$ = Elastizitätsmodul in Bohrloch ℓ

$B(\ell, \alpha)_{ik}$ = Koeffizienten die von der Querdehnung ν , den Konstanten a, c , dem Koordinatensystem des Bohrloches ℓ und der Verformungsrichtung α abhängen.

Gleichungssystem (3) enthält somit für jeden Dehnmeßstreifen in Richtung α in jedem Bohrloch eine Gleichung für die 6 unbekanntenen Komponenten τ_{ik} des Spannungstensors. Das System ist im Sinne der Ausgleichsrechnung eindeutig lösbar, wenn der Rang von B sechs ist. Im vorliegenden Fall wurden nur zwei Bohrlöcher gebohrt und der Rang von B ist lediglich 5, wodurch die Komponente τ_{13} des Spannungstensors unbestimmt bleibt.

Die Meßstelle befindet sich nahe der Oberfläche des Gesteinskörpers. An der Oberfläche herrscht ein ebener Spannungszustand mit verschwindenden Komponenten senkrecht zur Oberfläche. Im Bereich der Meßstelle ist demzufolge noch eine Ausrichtung des Spannungsellipsoids parallel zum Verlauf der Ebriachklamm zu erwarten. Es wurde daher für τ_{13} als plausibler Wert $\tau_{13} = 0$ angenommen und durch Hinzufügen einer Gleichung

$$0 = 1000 \cdot \tau_{13}$$

zu System (3) rechnerisch berücksichtigt.

Die Rechnungen wurden mit einem eigens erstellten Computerprogramm durchgeführt. Die Ausgleichung erfolgte so, daß ein Minimum der Summe der Fehlerquadrate der Werte $\epsilon \cdot E$ in Gleichung (3) angestrebt wurde. Aus den Komponenten des Spannungstensors wurden noch Größe und Richtung der Hauptspannungen berechnet. Mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes konnte noch eine Abschätzung der Fehler der Spannungen gewonnen werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 enthalten.

8. Klufmessungen

Zur weiteren Beurteilung des Spannungszustandes im Bereiche der Ebriach-Klamm wurden noch Klufmessungen durchgeführt. Die Interpretation von Scherklüften im Sinne der Mohr-Coulomb'schen Bruchtheorie gestattet die Ermittlung der Richtung der Hauptnormalspannungen, die zum Bruch des Gesteins geführt haben. Es wurden an vier Aufschlüssen insgesamt 97 Klufmessungen durchgeführt. Drei der Aufschlüsse lagen im Nahbereich der Spannungsmeßstelle in 20, 50 und 200 m Entfernung. Der vierte Aufschluß lag etwa 5 km entfernt im Einschnitt des Trögernbaches (siehe Abb. 1 und Abb. 5). Die Auswertung der Klufmessungen erfolgte mit einem Rechenprogramm (KOHLBECK & SCHEIDEGGER 1977).

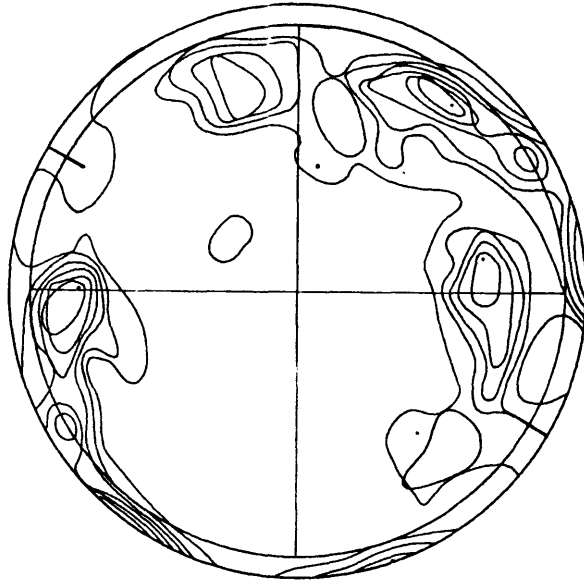
Die Verteilung der Klüftepole der einzelnen Aufschlüsse zeigte ein weitgehend einheitliches Bild. In Abb. 7 ist die Dichteverteilung aller Aufschlüsse in Lambert'scher Projektion dargestellt. Der innere Kreis hat Polhöhe 0° , der äußere -10° . Richtung und Neigung der Polmaxima betragen $87^\circ \pm 17^\circ/8^\circ \pm 16^\circ$ sowie $350^\circ \pm 10^\circ/21^\circ \pm 10^\circ$. Der Fehler bezieht sich auf einen 90% Vertrauensbereich. Aus den Richtungen der Polmaxima resultieren als Winkelhalbierende die Richtungen der Hauptnormalspannungen zu $40^\circ/21^\circ$ und $307^\circ/9^\circ$.

9. Schlußfolgerungen

Aus den Ergebnissen der Messungen geht hervor, daß die Hauptnormalspannungen insbesondere hinsichtlich der Richtungen der kleinsten und größten Hauptnormalspannungen aus den in situ Messungen nicht genau bestimmt werden konnten. Es zeigt sich jedoch, daß die kleinsten Normalspannungen annähernd vertikal gerichtet in der

EISENKAPPEL u. UMGEBUNG

N



Lambert Projektion

Abb. 7: Poldichtediagramm der Klüfte in der Umgebung von Eisenkappel.

Größenordnung der geringen Überlagerung sind. In Richtung des Verlaufes des Ebriachbaches, also parallel zur Nahtzone konnte eine signifikante Horizontalkomponente des Spannungstensors von ca. 6 MPa nachgewiesen werden. Diese Spannung liegt deutlich über dem Wert der Vertikalkomponente und ist somit nicht auf das Gewicht der Überlagerung der benachbarten Höhen zurückzuführen. Hinsichtlich der Orientierung des Spannungstensors ist zu sagen, daß der lokale Tensor infolge der Topographie Hauptrichtungen annähernd parallel und normal zur Ebriachklamm besitzen muß. Die Richtung der regionalen größten Druckspannung ist jedoch aus Erdbebenherdlösungen (MÜLLER 1977) als NW-SE zu erkennen. Diese Richtung entspricht auch dem Ergebnis unserer Klüftmessungen. Nimmt man nämlich an, daß das vorhandene Klüftsystem eine Folge von Spannungszuständen ist, die in diesem Krustenabschnitt im Verlauf der geologischen Entwicklung wiederholt aufgetreten sind, so liegen die Richtungen der resultierenden Hauptnormalspannungen in einem Winkel von annähernd 45° zur Periadriatischen Naht. Diese Ergebnisse beinhalten die größten Schubspannungen in Richtung der Störung. Diese Tatsache könnte dahingehend gedeutet werden, daß sich die Periadriatische Naht im Bereich der Ebriachklamm gegenwärtig in einer Phase mäßiger Spannungsakkumulierung befindet. Abb. 8 zeigt die Richtungen der lokalen Hauptspannungen sowie die regionalen Hauptklüftrichtungen. Aus den weltweit durchgeführten Spannungsmessungen geht andererseits hervor, daß in Oberflächennähe, das ist in Tiefen kleiner 500 m, die mittlere Horizontalkomponente des

Spannungstensors zumeist größer ist als die Vertikalkomponente (VAN HEERDEN 1976, RANALLI 1975). Das Verhältnis von mittlerer Horizontalkomponente zur Vertikalkomponente ist im vorliegenden Fall ca. 2 und paßt gut zu den von VAN HEERDEN (1976) für Südafrika angegebenen Werten. Die gefundenen relativ hohen Horizontalspannungen entsprechen daher durchaus den üblichen Spannungsverhältnissen der Erdkruste und müssen daher nicht unbedingt als Zeichen der Aktivität der Periadriatischen Naht gedeutet werden.

Dank

Die gesamten Feldarbeiten wurden durch Zuwendungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften im Rahmen des Internationalen Geodynamik Projektes ermöglicht. Ohne diese, durch den Vorsitzenden des Österreichischen Nationalen Geodynamik Komitees, Herrn Prof. Dr. F. STEINHAUSER, vermittelte Unterstützung, wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich geworden; die Autoren möchten daher Herrn Prof. STEINHAUSER ihren verbindlichsten Dank aussprechen.

Dem Rechenzentrum der Technischen Universität Wien, Abteilung Digitalrechenanlage und Hybridrechenanlage, verdanken die Autoren die kostenlose Durchführung sämtlicher Rechenarbeiten, sowie eine ausgezeichnete Beratung in allen Programmangelegenheiten.

Anhang

Herleitung der Normalgleichungen (3):

Bezeichnet man mit α den Winkel zwischen der Richtung der Verformungsmessung und der x-Achse und mit $\gamma(\ell)_{jk}$ die Komponenten des Verzerrungstensors in Bohrloch ℓ , so gilt für die Verformung:

$$\epsilon(\ell, \alpha) = \gamma(\ell)_{11} \cos^2 \alpha + \gamma(\ell)_{22} \sin^2 \alpha + 2\gamma(\ell)_{12} \sin \alpha \cos \alpha \tag{A 1}$$

das Hook'sche Gesetz für die Spannungen σ' am Bohrgrund lautet:

$$\gamma(\ell)_{11} = \frac{1}{E(\ell)} (\sigma'(\ell)_{11} - \nu \sigma'(\ell)_{22})$$

$$\gamma(\ell)_{22} = \frac{1}{E(\ell)} (\sigma'(\ell)_{22} - \nu \sigma'(\ell)_{11}) \tag{A 2}$$

$$\gamma(\ell)_{12} = \frac{1+\nu}{E(\ell)} \sigma'(\ell)_{12}$$

mit $b=0$ aus Gleichung (2) lautet (1):

$$\begin{aligned} \sigma'(\ell)_{11} &= a \sigma(\ell)_{11} + c \sigma(\ell)_{33} \\ \sigma'(\ell)_{22} &= a \sigma(\ell)_{22} + c \sigma(\ell)_{33} \\ \sigma'(\ell)_{12} &= a \sigma(\ell)_{12} \end{aligned} \tag{A 3}$$

Substitution von (A 3) und (A 2) in (A 1) ergibt:

$$\epsilon(\ell, \alpha) \cdot E(\ell) = A(\ell, \alpha)_{rs} \sigma_{rs} \tag{A 4}$$

mit:

$$\begin{aligned} A(\ell, \alpha)_{11} &= a(\cos^2 \alpha - \nu(\ell) \sin^2 \alpha) & A(\ell, \alpha)_{12} &= a(1+\nu) \sin 2\alpha \\ A(\ell, \alpha)_{22} &= a(\sin^2 \alpha - \nu(\ell) \cos^2 \alpha) & A(\ell, \alpha)_{23} &= A(\ell, \alpha)_{13} = 0 \\ A(\ell, \alpha)_{33} &= c(1-\nu(\ell)) & A(\ell, \alpha)_{jk} &= A(\ell, \alpha)_{ki} \end{aligned}$$

Bezeichnet man mit $a(\ell)_{ri}$ die Koeffizienten der Transformationsmatrix, welche das lokale Koordinatensystem $\vec{g}(\ell)_r$ in das zentrale Koordinatensystem \vec{g}_i überführt, so erhält man:

$$\sigma(\ell)_{rs} = \tau_{ij} a(\ell)_{ri} a(\ell)_{sj} \quad (\text{A } 5)$$

mit $a(\ell)_{ri} = (\vec{g}(\ell)_r \cdot \vec{g}_i)$
wobei τ_{ij} die Komponenten des Spannungstensors im zentralen System sind.
Substitution von (A 5) in (A 4) ergibt Gleichung (3)
mit $B(\ell, \alpha)_{ik} = A(\ell, \alpha)_{rs} \cdot a(\ell)_{ri} \cdot a(\ell)_{sk}$

Tabelle 1

Spannungstensor ermittelt aus den in-situ Messungen. Koordinatenrichtungen x_1 = horizontal, x_2 = vertikal, x_3 = N28°W.

a	Komponenten des Spannungstensors		τ_{11}	τ_{22}	τ_{33}	τ_{12}	τ_{23}	τ_{31}
	Spannungen	MPa	5.0	3.5	8.2	1.5	-1.7	0
	Fehler	MPa	3.2	3.4	7.7	0.8	2.1	0
b	Hauptspannungen		τ_1	τ_2	τ_3			
	Spannungen	MPa	2.2	5.6	8.9			
	Fehler	MPa	2.7	2.6	6.2			
	Richtungsvektoren	x_1	0.457	0.880	0.125			
	der	x_2	-0.855	0.396	0.336			
	Hauptspannungen	x_3	-0.247	0.261	-0.933			

Literatur

- BAUER, F., 1970: Zur Fazies und Tektonik des Nordstammes der Ostkarawanken von der Petzen bis zum Obir. – *Jahrb. geol. B.-A.*, 113, 189–245, Wien.
- BRÜCKL, E., ROCH, K.-H., SCHEIDEGGER, A. E., 1975: Significance of stress measurements in the Hochkönig Massif in Austria. – *Tectonophysics*, 29, 315–322, Amsterdam.
- CARNIEL, P., ROCH, K.-H., 1976: In situ Gebirgsspannungsmessung im Felbertal, Österreich. – *Riv. Ital. Geofisica*, 3, 233–240, Milano.
- EXNER, Ch., 1971: Geologie der Karawankenplutone östlich Eisenkappel, Kärnten. – *Mitt. geol. Ges. Wien*, 64, 1–108, Wien.
- 1976. Die geologische Position der Magmatite des Periadriatischen Lineaments. – *Verh. geol. B.-A.*, 1976, H. 2, 3–64, Wien.
- FRITSCH, W., 1965: Das Kristallin von Mittelkärnten und die Gurktaler Decke. – *Haus der Natur in Salzburg*, 16, H. 3, Abt. 2, 1–27, Salzburg.
- KOHLBECK, F., SCHEIDEGGER, A. E., 1977: On the evaluation of joint orientation measurements. – *Rock Mech.*, 9, 9–25, Wien.
- LEEMAN, E. R., 1971: The CSIR „Doorstopper“ and triaxial rock stress measuring instruments. – *Rock Mech.*, 3, H. 1, 25–50, Wien.
- LOESCHKE, J., 1970: Zur Geologie und Petrographie des Diabaszuges westlich Eisenkappel (Ebriachtal/Karawanken/Österreich). – *Oberrhein. geol. Abh.*, 19, 73–100, Karlsruhe.
- 1972: Zur Petrogenese altpaläozoischer Spilite aus den Ostalpen. – Unveröff.

- Habil.-Schrift, Univ. Tübingen, 99 S.
- 1973: Zur Petrogenese paläozoischer Spilite aus den Ostalpen. – N. Jb. Miner. Abh., 119, 20–56, Stuttgart.
- MÜLLER, G., 1977: Fault-plane solution of the earthquake in Northern Italy 6 May 1976, and implications for the tectonics of the Eastern Alps. – J. Geophys., 42, 343–349, Chicago.
- RANALLI, G., 1975: Geotectonic relevance of rock stress determinations. – Tectonophysics, 29, H. 1–4, 49–58, Amsterdam.
- RIBACCHI, R., 1977: Rock stress measurements in anisotropic rock masses. – Proceedings of the international symposium, field measurements in rock mechanics, 1, 183–196, Rotterdam (Balkema).
- RIEHL-HERWIRSCH, G., 1970: Zur Altersstellung der Magdalensbergserie in Mittelkärnten Österreich. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., 19, 195–214, Wien.
- VAI, B. G., 1971: Ordovicien des Alpes Carniques. – Mem. B. Rech. Geol., 73, 437–448, Paris.
- VAN HEERDEN, W. K., 1976: Practical application of the CSIR triaxial strain cell for rock stress measurements. – Proceedings of the symposium on exploration for Rock Engineering, 1, 189–194, (ed. Breniawsky) Rotterdam (Balkema).