

**FELSMCHANISCHE METHODEN ZUR UNTERSUCHUNG VON
GEBIRGSSPANNUNGEN**

von

Arno Pahl

Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie;
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 8, Geotechnik
und Sicherheit im Bergbau - Bergschlagforschung, Seminar
in Bad Bleiberg am 7. und 8. Juni 1984, Wien 1985.

FELSMCHANISCHE METHODEN ZUR UNTERSUCHUNG VON GEBIRGSSPANNUNGEN

von Arno Pahl

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die Entwicklung neuer Methoden zur Bestimmung des Spannungszustandes des Gebirges große Fortschritte gemacht. Der primäre sowie der sekundäre Spannungszustand werden in Pfeilern und Streckenstößen untersucht; auch in tiefen Bohrungen konnten Primärspannungen gemessen werden.

1963 berichtete N. HAST über seine Spannungsuntersuchungen am Tempel von Abu Simbel/Ägypten. Pfeiler, die zur Abstützung der Firste erstellt waren, hatten geöffnete Klüfte im oberen Pfeilerbereich, woraus auf eine Hebung der Tempelfirste und hohe Horizontalspannung zu schließen war. Durch Messungen konnte oberflächennah eine Horizontalspannung von 45 kp/cm^2 ($4,5 \text{ MN/m}^2$) (8) nachgewiesen werden.

In Südafrika wurde Mitte der 60iger Jahre der sogenannte "Doorstopper" entwickelt, mit einer Dehnungsmeßstreifenrosette für Messungen in Bohrungen, z.B. in einem Goldbergwerk im Quarzit in 1 770 m Tiefe (1).

Es folgten Forschungsarbeiten, Geräteentwicklungen und Untersuchungen, insbesondere in Nordamerika, Europa und Australien, die bis heute zur Anwendung einer größeren Anzahl von Methoden und Meßsystemen mit teilweise sehr gutem Erfolg geführt haben.

1. Gebirgsspannungen

Wodurch entstehen Spannungen im Gebirge?

Primärspannungen sind im Gebirge vorhanden als

- Gravitative Spannungen in Abhängigkeit von der Überlagerung (lithostatische Spannung)

- Residuelle (tektonisch-fossile) Spannungen durch die Gebirgsbildung, die nach KIENOW (7) eine Horizontalspannung in der Größenordnung von 100 MN/m^2 erfordert und
- Rezente (aktive tektonische) Spannungen, deren Auswirkungen in Verschiebungen und Erdbeben zu sehen sind.

Sekundärspannungen, Spannungsumlagerungen und folglich auch Spannungskonzentration werden im Bergbau sowie im Fels - und Tunnelbau durch technische Eingriffe in das Gebirge verursacht.

Als Gebirgsdruck - Gebirgsspannungen - wirken sich Kräfte aus, die nach dem Ausbrechen von Fels das umgebende Gebirge und den Ausbau, im Bergbau auch den Versatz, beanspruchen. Der primäre Spannungszustand im unverritzten Gebirge wird durch die Größe und das Verhältnis der Hauptspannungen zueinander bestimmt.

Der Ausbruch eines Felshohlraumes stört den vorhandenen primären Spannungszustand und es bildet sich der sekundäre Spannungszustand aus.

2. In situ-Untersuchungen zur Messung von Gebirgsspannungen

In situ-Spannungsmessungen werden durchgeführt, um über den primären und den sekundären Spannungszustand gesicherte Angaben zu erhalten.

Auf der Grundlage der Meßergebnisse können Berechnungen der Standsicherheit durchgeführt und Ausbaumaßnahmen geplant werden. Die meisten Verfahren beruhen auf der Messung in Bohrungen (Abb. 1).

Am bekanntesten ist die "Doorstopper-Methode", die in Südafrika von NMRI-CSIR (National Mechanical Engineering Research Institute-Council for Scientific and Industrial Research) entwickelt wurde:

Auf die geglättete Bohrlochsohle wird eine Dehnungsmeßzelle, der sogenannte Doorstopper mit Dehnungsmeßstreifenrosette geklebt. Für die Klebung wird Kunstharz benutzt, um eine gute Verbindung zum Gebirge herzustellen. Beim Überbohren

des Doorstoppers entspannt sich das Gebirge, d.h. durch die Entlastung treten Dehnungen auf, die von der Meßstreifenrosette aufgenommen werden. Gemessen wird vor und nach dem Überbohren. Aus den Dehnungen werden die Spannungen im allgemeinen unter der Annahme linearelastischer und isotroper Bedingungen zurückgerechnet.

Der Elastizitätsmodul des überbohrten Gebirgsabschnittes muß also bekannt sein oder gemessen werden. Deshalb wird neben dem Entspannungsversuch durch Überbohren ein Bohrlochverformungsversuch zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls durchgeführt. Mit einem Dilatometer werden die Bohrlochverformungen bei bestimmten Laststufen kontrolliert und aus der Arbeitskurve der Elastizitätsmodul bestimmt.

Der überbohrte Kern kann aber auch nach dem Versuch in eine Druckzelle eingebaut werden, um durch Kompensation den ursprünglichen Spannungszustand zu simulieren. Bei der Bewertung der Ergebnisse aus dieser Kompensation muß berücksichtigt werden, daß in der Druckzelle die Hauptspannungen σ_2 und σ_3 nicht getrennt regulierbar sind. Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls kann unter bestimmten Bedingungen auch an dem gewonnenen Kern im einaxialen Druckversuch vorgenommen werden.

Eine Weiterentwicklung des Doorstoppers ist die Triaxialzelle, ebenfalls von NMRI-CSIR.

Während der Doorstopper nur in einer Ebene auf der Bohrlochsohle mißt, wird diese Zelle axial im Bohrloch eingesetzt mit drei Dehnungsmeßstreifenrosetten zur Bohrlochwandung. Der Kontakt zum Gebirge wird durch Kunstharzklebung hergestellt. Vor dem Überbohren wird eine Nullmessung gemacht und nach dem Überbohren folgt das Ablesen der Dehnungen.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der gleichzeitigen Erfassung des räumlichen Spannungszustandes an einem Meßort mit einem Überbohrvorgang. Nachteile können sich aus der Klebung ergeben und der Meßdurchführung, die meistens keine Ablesungen während des Überbohrens zuläßt (4).

Für Überbohrversuche sind von verschiedenen Firmen und Institutionen ähnliche Sonden entwickelt worden. Das Über-

bohrverfahren eignet sich besonders für die Anwendung in kurzen Bohrungen. Mit den von der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) entwickelten Zellen (Abb. 2), die mit induktiven Weggebern des DTW-Systems der Fa. Stitz ausgestattet sind, kann die Verformung des Durchmessers und auch die axiale Längenänderung gemessen werden. Das Herausführen des Meßkabels von den Weggebern in der Bohrung durch das Bohrgestänge und den Spülkopf macht eine kontinuierliche Kontrolle der Dehnung auch während des Überbohrens möglich (10). Aus dem Verlauf des Entspannungsvorganges läßt sich entnehmen, ob Unregelmäßigkeiten durch Klüfte, Zerbrecen des Kerns oder Wassereinflüsse aufgetreten sind.

Das portugiesische Laboratorium für Felsmechanik (LNEC/Laboratorio Nacional de Engenharia Civil) hat für die Ermittlung von Gebirgsspannungen eine spezielle Schlitzsägearparatur und flache Druckkissen (flat jacks) entwickelt. Hier wird zunächst die Entspannung während des Schlitzsägens kontrolliert und anschließend durch flache Druckkissen in den Schlitzten die Ausgangsspannung simuliert.

Dieses Verfahren eignet sich für Untersuchungen in Auffahrungen am Stoß oder in der Sohle. Bei einer Schlitztiefe um 1,5 m lassen sich die Sekundärspannungen in der Hohlraumwandung gut erfassen.

Durch den Einsatz von Bohrlochentspannungsgebern wird bei Versuchen der BGR mit dieser Apparatur in Bohrungen über bzw. unter oder neben den eingebauten Druckkissen die Dehnung durch Entspannung gemessen (3). Abb. 3 a bis c veranschaulichen den Einsatz der Apparatur unter Tage. Das Ergebnis eines Entspannungsversuchs durch Schlitzten und anschließende Wiederbelastung bis zur Kompensation der Dehnung in vertikaler Richtung zeigt die Abb. 4.

Im Großlochbohrverfahren (vgl. Abb. 1) der Fa. Interfels, werden die Dehnungen in einem Großbohrloch direkt hinter der Bohrkronen im Bohrloch von einem Meßstern erfaßt (6). Da die Herstellung von Großlochbohrungen relativ aufwendig ist, kommt dieses Verfahren wenig zur Anwendung.

C. FAIRHURST wandte 1968 das Hydrofracturing-Verfahren (vgl. Abb. 1) für die Bestimmung von Primärspannungen in tiefen Bohrungen an (2). Daraus entwickelte sich eine relativ einfach anzuwendende Methode.

Zwischen Packern wird ein Bohrlochabschnitt hydraulisch bis zur Bildung und Öffnung von Rissen im Gebirge belastet. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie genaue Einmessung des erzeugten Risses, erfolgt die Berechnung der Hauptnormalspannungen nach der Frac-Beziehung, in der die Abhängigkeit des Frac- und des Wiederöffnungsdrucks (shut-in Druck) von der größeren und der kleineren Horizontalspannung sowie der Zugfestigkeit und dem Porenwasserdruck beschrieben ist (11).

Diese Methode wird überwiegend in tiefen vertikalen Bohrungen angewandt.

An zwei Beispielen sollen im folgenden die Spannungsmessungen erläutert werden, und zwar Überbohrversuche in einem tiefen Bergwerk, der Creighton-Mine in Kanada und Spannungsuntersuchungen in einem ehemaligen Gipsbergwerk in Südwestdeutschland.

Die Creighton-Mine der International Nickel Company liegt am südlichen Rand des Sudbury-Plutons in Ontario - an den Versuchsorten im Nebengestein der Vererzungszone stand überwiegend Gabbro an. Die Versuchsorte in Teufen bis zu 2000 m unter Tage zeigten im allgemeinen eine ausreichende Standfestigkeit. Der Ausbau bestand aus Felsnägeln mit rhomboedrigen Stahlmatten von großer Nachgiebigkeit (Abb. 5).

Der Elastizitätsmodul wurde in einer Bohrung mit dem Dilatometer bestimmt. Die Arbeitskurven des Versuches (Abb. 6) zeigen ein hochelastisches Materialverhalten, das der Auswertung zugrunde gelegt wurde. In der Abb. 7 ist dargestellt, wie sich das Gebirge während des Überbohrens senkrecht zur Bohrungsachse entspannt (unterer Teil der Abb. 7) und im Diagramm darüber ist der Entspannungsweg in axialer Richtung aufgetragen.

Die Berechnung der Spannungen aus den Entspannungswegen ergab im Nahbereich der Strecken sehr unterschiedliche Er-

gebnisse, bedingt durch die Sprengarbeiten und Spannungsumlagerungen. In der Abb. 8 sind als Beispiel die gemessenen Vertikal- und Horizontalspannungen, tangential zur Strecke, dargestellt. Mit der Bohrung wurde die Kontaktzone zwischen Gabbro und Granit durchstoßen, in der die Gebirgsspannungen sehr hoch lagen, mit dem Maximum direkt im Kontakt. Im Nahbereich der Strecke trat im Bohrkern mitunter das bekannte "Discing" auf, ein scheibenförmiges Aufplatzen des Bohrkerns, bedingt durch ein Überschreiten der Festigkeit (Abb. 9). Im Überbohrversuch konnte das "Discing" beim Einsatz der axial messenden Zelle mit induktivem Weggeber kontrolliert werden. Abb. 10 zeigt das Ergebnis einer Messung im Discing-Bereich.

Die Entspannung erfolgt schlagartig durch relativ große Entspannungswege. Da das Discing in bestimmten Bohrabschnitten zu beobachten ist, sollte es bei der geologischen Kernbeschreibung mit aufgenommen werden, wie in Abb. 11 gezeigt. Untersuchungen der BGR haben zwar ergeben, daß der Bohrvorgang selbst nicht ohne Einfluß auf das Discing ist. Trotzdem sollte das Discing gute Hinweise auf Zonen mit hohen Gebirgsspannungen geben, insbesondere, wenn Bohrungen mit gleichem Werkzeug, Drehzahl, Andruck und Spülung ausgeführt werden.

Das zweite Beispiel einer Spannungsuntersuchung ist die Lagerkammer im Randbereich eines ehemaligen Gipsabbaugebietes. Das Gipslager des Mittleren Muschelkalks liegt fast horizontal. Der Gips wurde im Kammerpfeilerbau ohne Versatz gewonnen. In der Lagerkammer wurden Ausbauschäden festgestellt, die eine Überbeanspruchung von Abbaupfeilern vermuten ließen. Deshalb sollten die Gebirgsspannungen in den Pfeilern untersucht und mit Gebirgsspannungen außerhalb des Abbaufeldes verglichen werden.

Diese Untersuchungen wurden nach zwei Methoden ausgeführt, und zwar nach der Kompensationsmethode mit Schlitzentlastung und Druckkissenbelastung sowie der Überbohrmethode. Der Schlitzentlastungs-Druckkissenbelastungsversuch wurde an einem intakten Gebirgspfeiler vorgenommen. Die Untersuchungstiefe betrug etwa 1,5 m im Stoß. Die Sägeschlitze

waren horizontal angeordnet, um die Vertikalspannung im Pfeiler zu erfassen. Während der Schlitzsägearbeit konnten die Entspannungswege in Bohrungen unter den Sägeschlitzen mit induktiven Weggebern gemessen werden. In Abb. 12 sind die Meßergebnisse zusammengestellt. Die linke Hälfte der Abbildung zeigt die Entlastungswege, die sich während des Schlitzsägens einstellten. In der rechten Abbildungshälfte ist die Kompensationsbelastung dargestellt, die eine Rückverformung bewirkt. Die vertikalen Spannungen ließen sich in diesem Fall mit 3,4 und 4,2 MN/m² kompensieren, die horizontale Entspannung konnte mit den horizontal eingebauten Druckkissen nicht kompensiert werden.

Das Ergebnis hat nachgewiesen, daß dieser Pfeiler entsprechend der Überlagerung, der Festigkeit und unter Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung nicht überbelastet war.

Mit Überbohrversuchen konnte die Spannungsverteilung in einem überbelasteten und einem intakten Gebirgspfeiler ermittelt werden.

Die Messungen wurden durch Überbohren induktiver Weggeber (System BGR) ausgeführt mit kontinuierlicher Registrierung während des Überbohrens. Die Auswertung erfolgte unter der Annahme eines linear elastischen und isotropen Kontinuums. Für die praktische Auswertung war dies ausreichend, weil die Entlastungszeiten und Belastungszeiten in den Versuchen einander angepaßt wurden.

Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 13 zusammengestellt. In dem überbeanspruchten Gebirgspfeiler waren die ermittelten horizontalen und vertikalen Spannungen annähernd gleich hoch, und zwar am Pfeilerrand zur Lagerkammer bis 30 MN/m² und am Pfeilerrand zum ehemaligen Abbaufeld und zu einem Verbruch abfallend bis auf etwa 10 MN/m². Vergleichsweise sind die Ergebnisse von Überbohrversuchen in einem intakten Pfeiler aufgetragen. In diesem Pfeiler liegt die Horizontalspannung wesentlich unter der Vertikalspannung. Die Spannungen sind zwischen 1 m und 6 m Pfeilertiefe (Pfeilermite) annähernd gleichmäßig verteilt, um 13 MN/m² Vertikalspannung und um 5 MN/m² Horizontalspannung.

Auf der Grundlage der Spannungsmessergebnisse konnten Berechnungen und Ausbaumaßnahmen durchgeführt werden.

3. Ausblick

Für die Untersuchung plötzlich auftretender und kurzzeitiger Standsicherheitsprobleme hat sich der Einsatz von Spannungsmessmethoden, insbesondere der Überbohrmethode, als nützlich erwiesen. Die Untersuchungsarbeiten sind jedoch mit einigem Aufwand, bedingt durch die Bohrungen und das Schlitzsägen sowie den Einsatz der Meßgeräte, verbunden.

Abschließend soll noch einmal kurz auf die Bedeutung der Kenntnis der akuten Gebirgsspannungen für die Lösung felsmechanischer Standsicherheitsfragen hingewiesen werden.

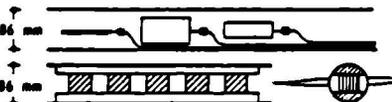
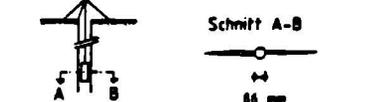
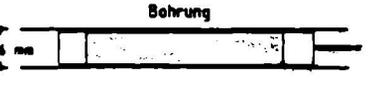
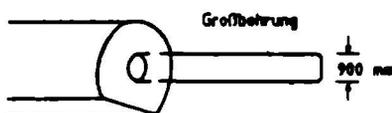
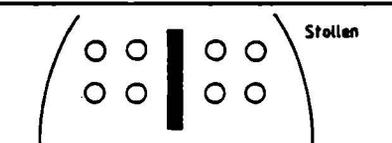
Unter der Annahme einer Störungsfläche im Gebirge, die eine sehr kleine Scherfestigkeit aufweist, hängt die Standfestigkeit im Bereich einer solchen Störung wesentlich von ihrer räumlichen Lage zu dem primären Spannungsfeld ab. Abb. 14 a zeigt eine gekrümmte Störungsfläche, an der in der Krümmungsachse Spannungskonzentrationen zu erwarten sind. Im Mohr'schen Diagramm darunter (Abb. 14 b) wird deutlich, daß sich die geringe Scherfestigkeit der Störung gravierend auswirkt, wenn durch den Ausbruch der dreidimensionale Spannungszustand gestört wird. Abb. 14 c erläutert die mögliche Entspannung durch Aufbau von Kluftwasserdruck (σ_p) in einer Störung und Herabsetzung der Scherfestigkeit.

Untersuchungen der Gebirgsspannungen sind deshalb eng verbunden mit geologisch-tektonischen Untersuchungen, aus denen schon wichtige Hinweise auf Störungsverlauf, Störungsver-schneidungen und mögliche Spannungskonzentrationen zu erwarten sind.

Literatur:

- (1) Denkhaus, H.G.: The Significance of Stress in Rock Mechanics. - CSIR Report Meg 702, Pretoria 1968.

- (2) Fairhurst, C.: Methods of Determining; in-situ Rock Stresses of Great Depth. - Techn. Rep. U.S. Army Corps of Eng., Missouri River Div., 1 - 68; Omaha, Nebr. 1968.
- (3) Glöggler, W. & Sprado, K.H.: Ermittlung von Gebirgsspannungen mit Schlitzsägearratur und Druckkissen, Z. Bergbau 9/80, Hattingen (1980).
- (4) Herget, G., Pahl, A. & Oliver, P.: Stresses below 3000 feet. - 10 th Canadian Rock Mechanics Symposium, Kingston/Ontario 1975.
- (5) Heusermann, St. & Pahl, A.: Stress Measurements in Underground Openings by the Overcoring Method and by the Flat Jack Method with Compensation. - Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics Zürich Sept. 1983, A.A. Balkema, Rotterdam 1984.
- (6) Jagsch, D.: Messung der Gebirgsspannung im Großbohrloch. - Festschrift Leopold Müller - Salzburg, Karlsruhe 1974.
- (7) Kienow, S.: Grundzüge einer Theorie der Faltungs- und Schieferungsvorgänge. - Fortschr. Geol. Paläont., 14, H. 46, 129 S., Berlin 1942.
- (8) Martini, H.J.: Geologische Probleme bei der Rettung der Felsentempel von Abu Simbel. - Vortragsreihe der Niedersächs. Landesregierung, H. 42, Göttingen 1970.
- (9) Müller, D.: Ermittlung von Gebirgsspannungen nach dem Prinzip des Überbohrverfahrens mit induktiven Weggebern. - Z. Bergbau 9/81, Hattingen 1983.
- (10) Pahl, A.: In-situ stress measurements by overcoring inductive gauges. - Proc. Int. Symp. Field Measurements in Rock Mechanics, Vol. I. 1977.
- (11) Rummel, F.: Stresses in the upper crust as derived from in-situ stress. - Proc. int. Workshop Aug. 29 - Sept. 5, Straßburg; Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1978.

Versuchsart/Meißmethode	Zweck, Kennziffer	Größe des Untersuchungsbereichs
Überbohrverfahren Meßzellen (Biaxial) Triaxialzelle Doorstopper	Innere Spannungen (Tekton. Restspann.) Spannungsrichtung Seitendruckziffer	 <p>Bohrung 14.6 mm</p>
Langzeit - Druckmeßzellen (hydraulische Druckkissen) (Bohrloch-Hydraulic Jack)	Spannungs - änderungen	 <p>86 mm</p>
Hydro Frac - Verfahren Hydraulische Rißbildung u.-öffnungen in Bohrungen	Primärspannungen Hauptspannungs - richtungen	 <p>Schnitt A-B 86 mm</p>
Dilatometer Test	Elastizitätsmodul Verformungsmodul	 <p>Bohrung 86 mm</p>
Großbohrverfahren	Innere Spannungen (Tekton. Restspann.)	 <p>Großbohrung 900 mm</p>
Schlitzent- und belastungs- versuch	Spannungsrichtung Seitendruckziffer	 <p>Stollen</p>

BGR Ref. B 2.11 März 84

Abb. 1: Schematische Darstellung der Verfahren zur Messung von Gebirgsspannungen

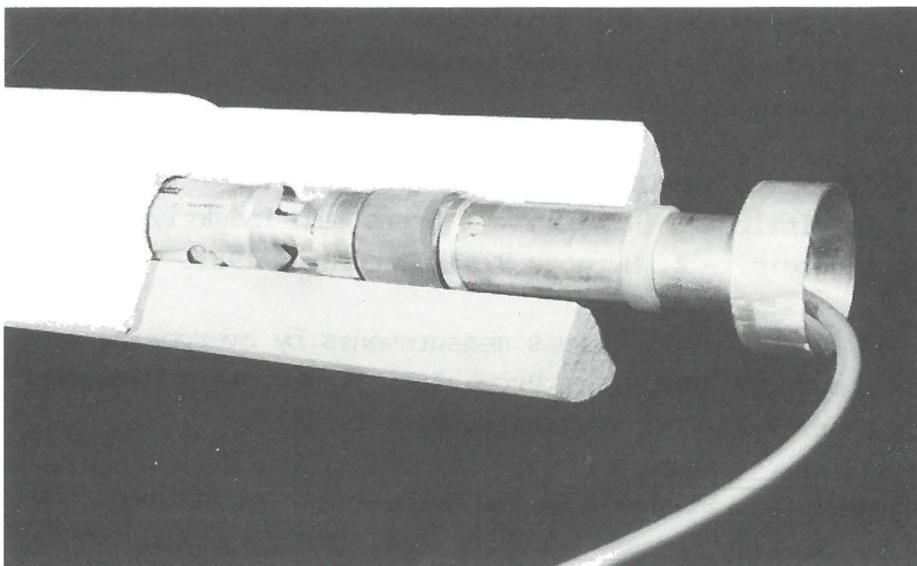


Abb. 2: Überbohrter Kern mit dem Meßgerät

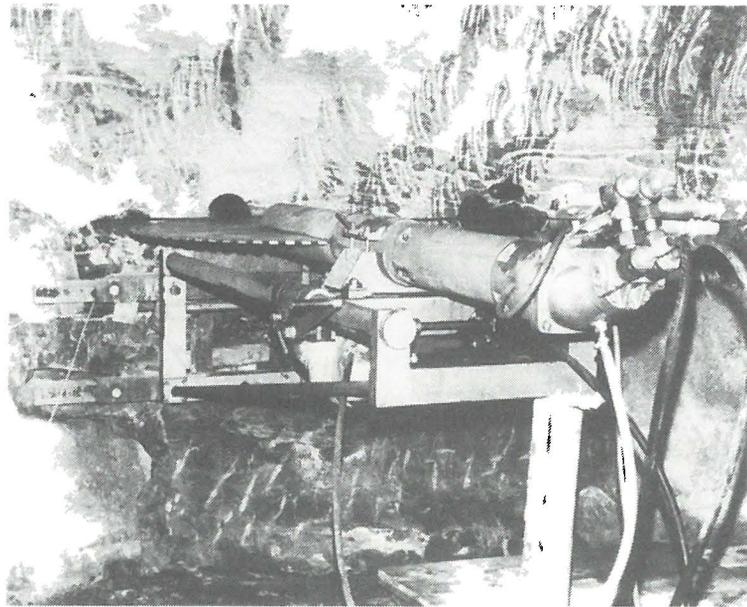


Abb. 3a: Schlitzsägearratur im Einsatz unter Tage

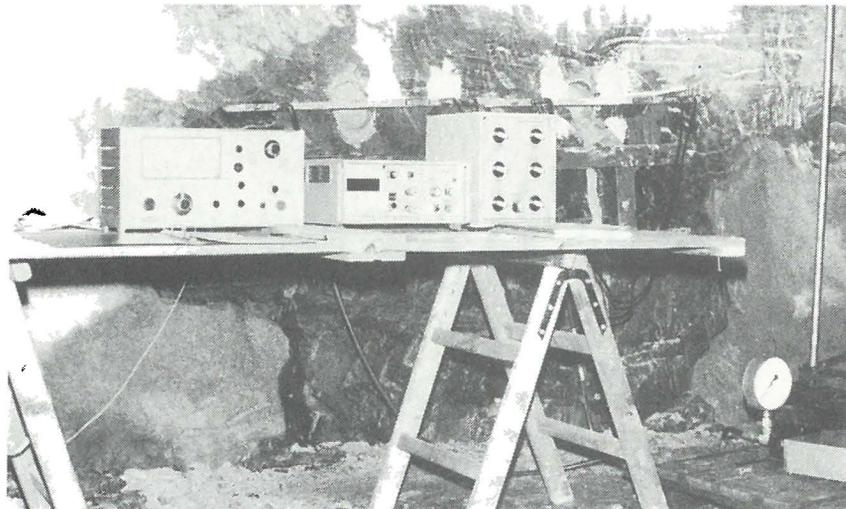


Abb. 3b: Druckkissen im Stoß mit Meßapparatur

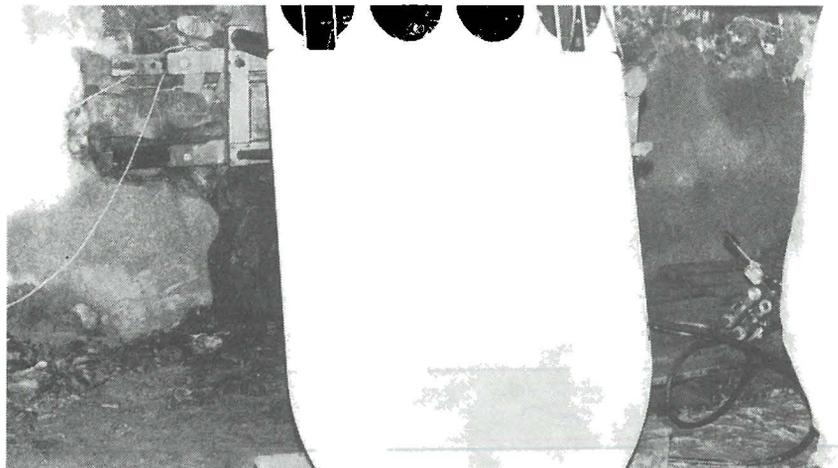


Abb. 3c: Druckkissen (Flat Jack)

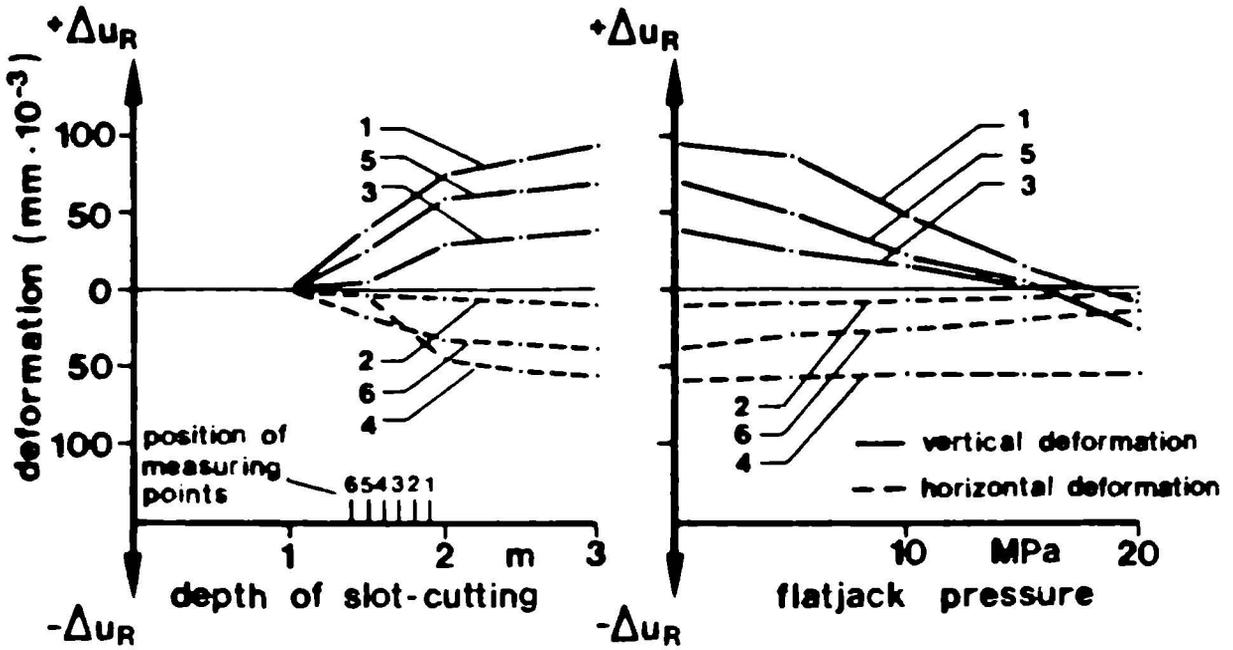


Abb. 4: Charakteristisches Diagramm eines Schlitzentlastungs-Druckkissen-Belastungsversuchs (nach HEUSERMANN & PAHL, 1983)

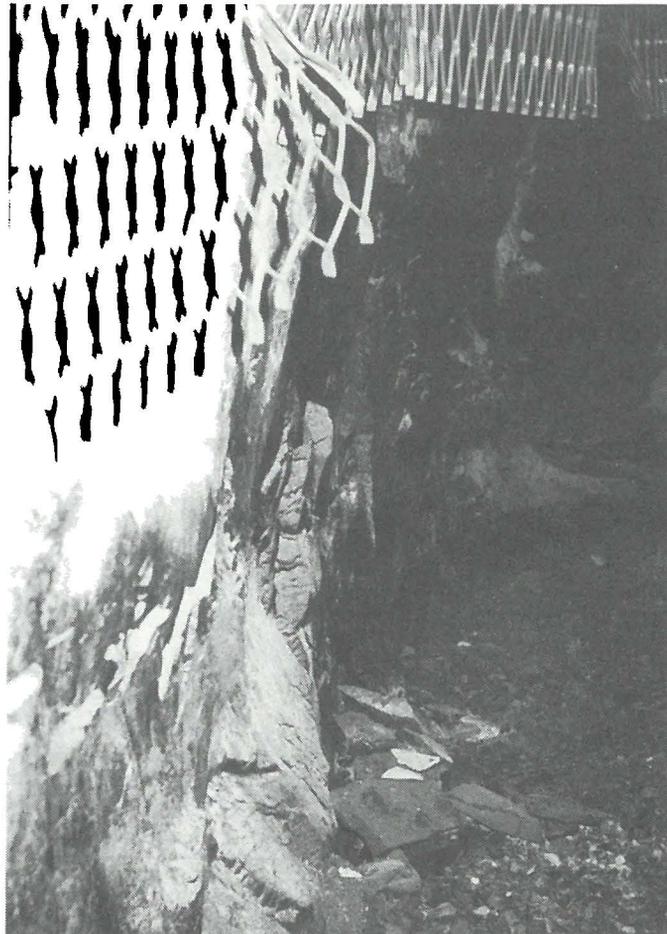


Abb. 5: Abplatzungen im Streckenstoß, Sicherung mit rhombodrischen Stahlmatten, Creighton-Mine/Ontario

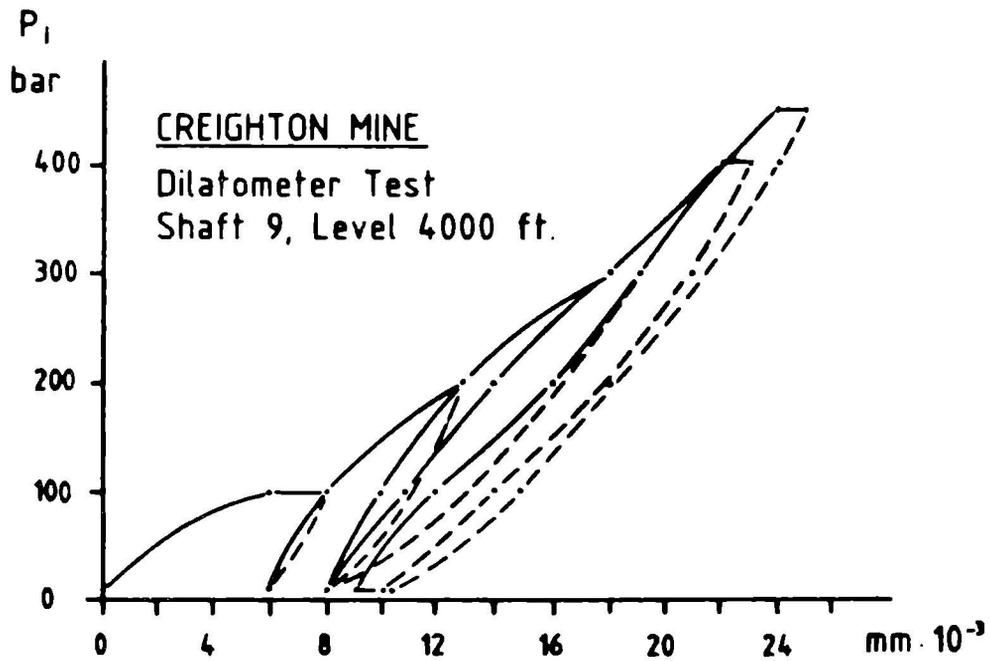


Abb. 6: Diagramm eines Bohrlochverformungsversuches

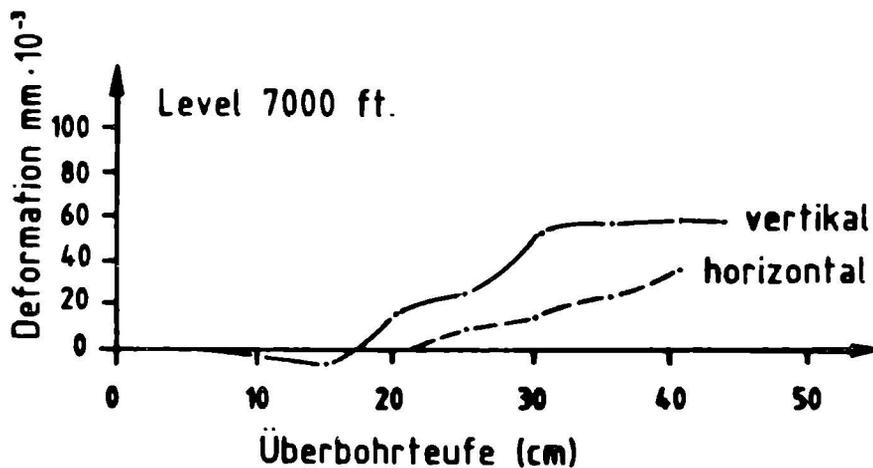
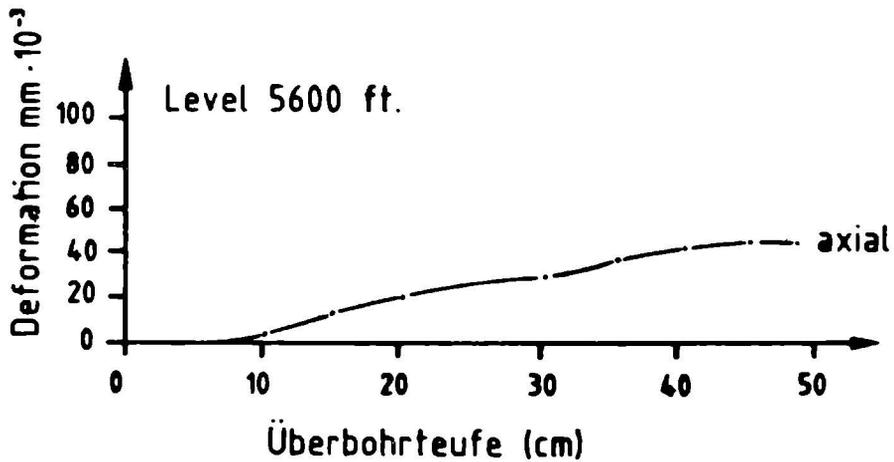


Abb. 7: Entspannungswege während des Überbohrens

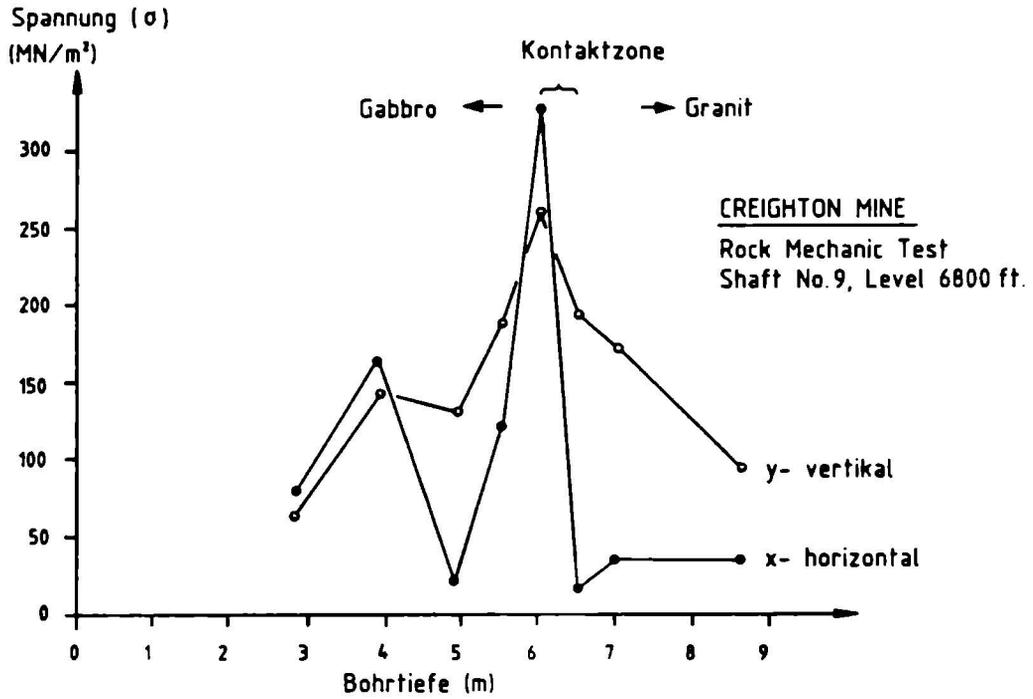


Abb. 8: Spannungsverlauf im Streckenstoß
(nach D. MÜLLER, 1981)

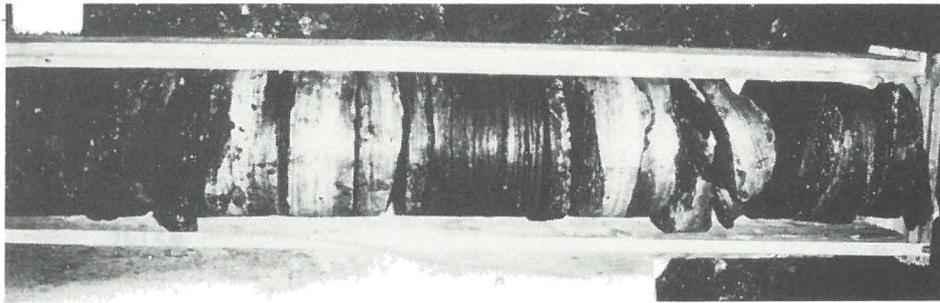


Abb. 9: Scheibenförmig aufgeplatzter Bohrkern, sog. "Discing"

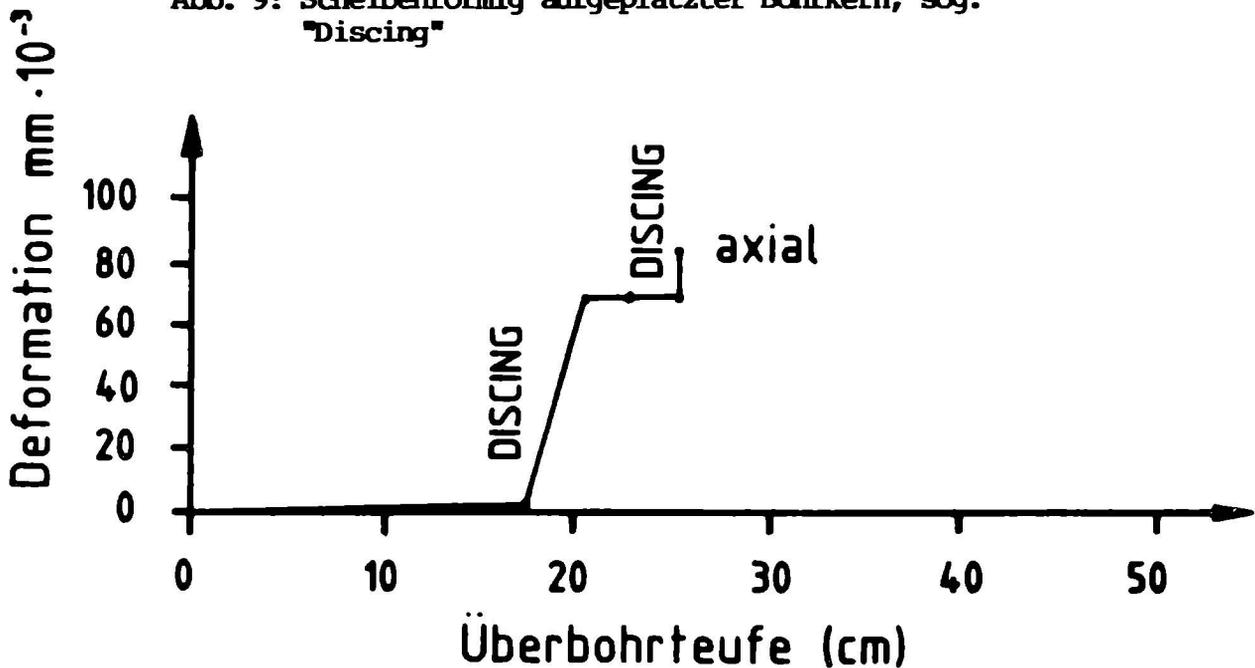


Abb.10: Schlagartige Entspannung durch Discing während des Überbohrens

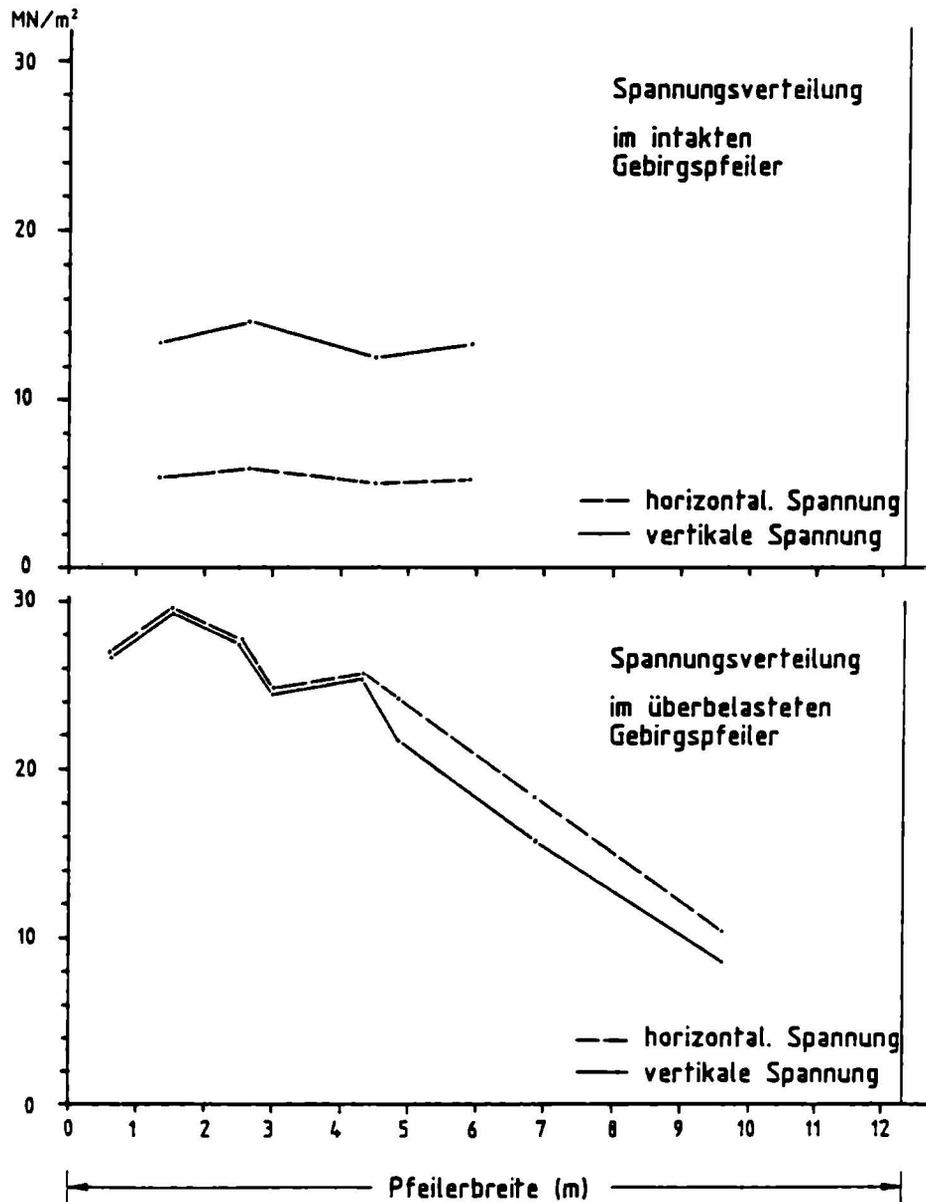


Abb.13: Ergebnisse von Überbohrversuchen in einem intakten und einem überbelasteten Pfeiler (nach PAHL & GLÖGGLER, 1982)

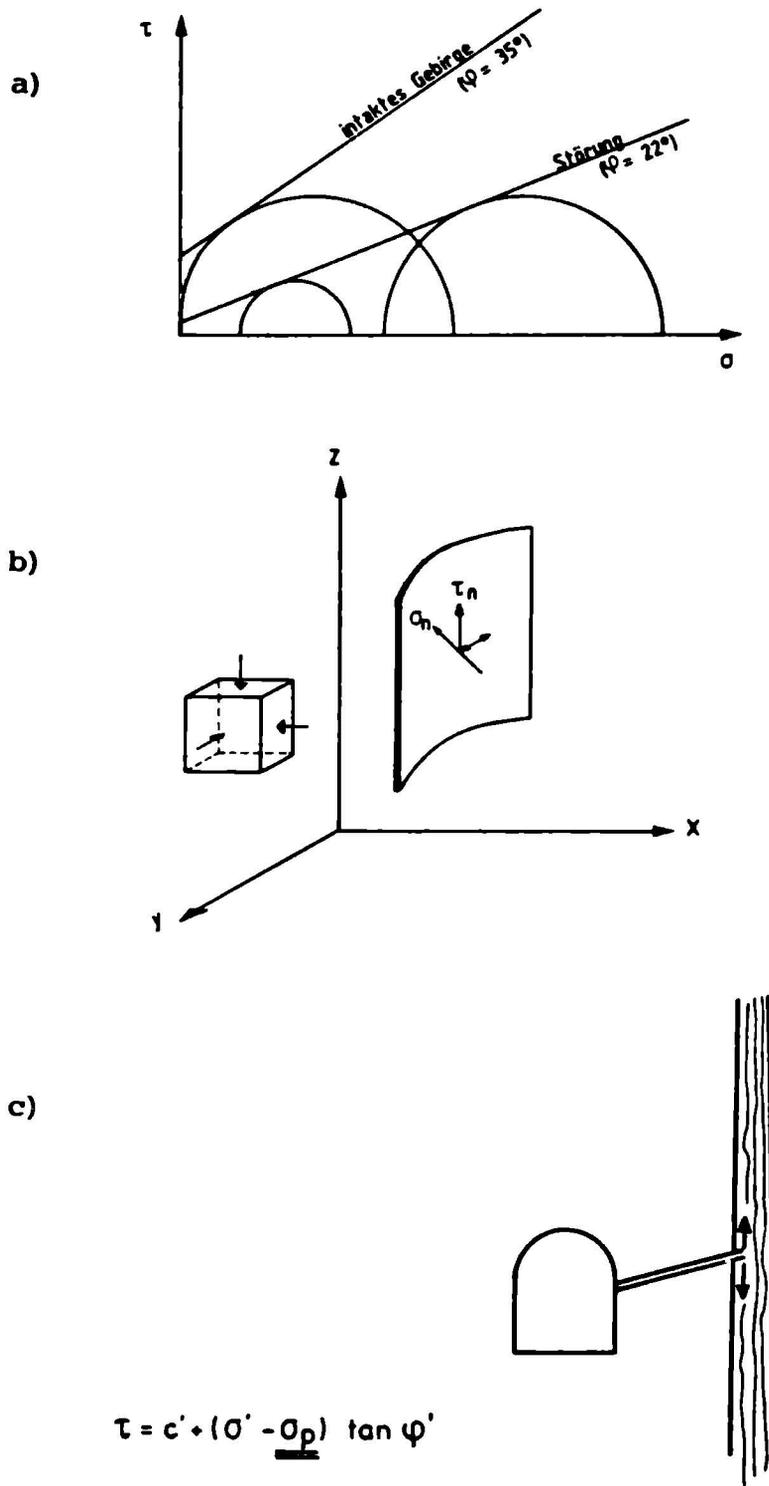


Abb.14a: Störungsfläche mit Hauptspannungen (oben)
 b: Scherfestigkeit im intakten Gebirge und an einer Störung
 c: Aufbau von Kluftwasserdruck und Beeinflussung der Scherfestigkeit

DISKUSSION

P. Schubert:

Ihre Messungen an Kernen setzen ein elastisches Verhalten voraus. Wie kann man Brucherscheinungen erkennen und Fehlinterpretationen vermeiden? Wie groß ist die Rate der Fehleinschätzungen?

A. Pahl:

Während des Überbohrens wird die Dehnung bei Entspannung kontinuierlich gemessen. Es erfolgt hierbei eine ständige Kontrolle von Unregelmäßigkeiten im Spannungsverlauf. Die Auswertung erfolgt im allgemeinen unter der Annahme linear elastischer und isotroper Bedingungen; dies ist beim Auftreten des sog. "Discing" nicht mehr möglich. Im Salzgebirge werden zusätzlich Kriechverformungen berücksichtigt. Spannungsuntersuchungen in Gebirgsarten mit zeitabhängigem Materialverhalten verlangen für genauere Aussagen die Anwendung anderer Stoffgesetze. Fehleinschätzungen werden durch die kontinuierliche Messung praktisch vermieden.