



Spannungsmessverfahren im Gebirge lassen sich nach dem heutigen Stand der Technik in folgende vier Gruppen einteilen:

- Entlastungsmethoden,
- Kompensationsmethoden,
- Methoden nach der Theorie des harten Einschlusses,
- Methoden der Risserzeugung im Gebirge.

Bei der Gruppe der Entlastungsmethoden macht man sich die Tatsache zunutze, dass ein belasteter Körper bei seiner Entlastung Verformungen erfährt. Bei bekanntem E-Modul und Poissonzahl des Gebirges lassen sich aus den Verformungen die Spannungen rückrechnen.

Die bekannteste Entlastungsmethode ist die sogenannte Doorstopper-Methode. Auf den geglätteten Boden eines Bohrloches wird mit einer speziellen, an einem Gestänge geführten Setzeinrichtung ein mit einer Dehnungsmessstreifen-Rosette bestückter Trägerkörper (Doorstopper) richtungsorientiert aufgeklebt. Nach einer Nullmessung wird die Messfläche, also der Bohrlochboden, überbohrt und die Entlastungsverformungen in der Stirnfläche des so entstandenen, entspannten Bohrkerns durch erneute Messung bestimmt. Diese Methode kann heute in Bohrlöchern bis in Tiefen von etwa 30 m erfolgreich eingesetzt werden.

In ähnlicher Weise wird bei den Bohrlochmantel-Entlastungsversuchen mit der sog. Triaxialzelle vorgegangen, wo über Dehnungsmessstreifen oder mit mechanischen Mess-tastern die Verschiebung der Bohrlochwand beim Überbohren gemessen wird. Der Anwendungsbereich dieser Methoden geht heute bis in Bohrlochteufen von etwa 150 m.

Die Entlastungsmethoden eignen sich gut für Bestimmungen des Absolutwertes der Spannungen; für die Beobachtung von Spannungsänderungen im Gebirge sind sie weniger geeignet.



Im Gegensatz zu den Entlastungsmethoden ist bei den Kompensationsmethoden eine Kenntnis der elastischen Konstanten des an der Messstelle anstehenden Gesteins nicht notwendig.

Dieses Messverfahren besteht darin, dass die während einer künstlichen Entspannung des Gesteins auftretenden Verformungen durch einen Kompensationsdruck, der mit geeigneten Belastungseinrichtungen aufgebracht wird, wieder rückgängig gemacht werden. Die hierzu aufzubringenden Spannungen entsprechen in der Regel den ursprünglich vorhandenen Spannungen. Diese Methode wird vornehmlich in unterirdischen Hohlräumen angewandt, wobei die Entlastung in der Regel durch einen Sägeschnitt erfolgt.

Für die Messung von Spannungsänderungen - weniger zur Bestimmung der Absolutwerte - eignen sich die Methoden nach der Theorie des harten Einschlusses.

Die Methode benutzt Messgeber, deren E-Modul im Vergleich zum E-Modul des Gesteins an der Messstelle wesentlich höher ist. Dabei geht man von folgenden grundlegenden theoretischen Zusammenhängen aus:

Bringt man in einen elastisch beanspruchten Gebirgskörper mit dem E-Modul E_G einen Messgeber mit dem E-Modul $E_M > E_G$ kraftschlüssig ein, so wird sich die Spannung im Messgeber von der im umgebenden Gebirgskörper unterscheiden; es treten Spannungskonzentrationen im Messgeber auf. Ist das Verhältnis der Moduli E_M/E_G bekannt, so lassen sich die im Geber gemessenen Spannungen korrigieren.

Da der kraftschlüssige Einbau, dicht am Gebirge anliegend, nur schwer zu erreichen ist, können mit diesen Gebern meist nur Spannungsänderungen gemessen werden. Ausichten, auch die Primärspannungen selbst zu messen, bestehen jedoch beim Einsatz eines solchen Messgebers im viskosen oder im plastisch beanspruchten Gebirgsbereich. Hier kann man damit rechnen, dass der Geber durch Fließen des Gebirges "einwächst", d. h., dass sich die im Gebirge herrschenden Spannungen allmählich auch im Messgeber aufbauen. Außerdem kann hier, ebenfalls aufgrund des Gebirgsfließens, ein ausgeprägter hydrostatischer Spannungszustand erwartet werden.



Die Zahl der heute bekannten Messverfahren bzw. der Messgeräte, die auf der Theorie des harten Einschlusses im Gebirge basieren, ist sehr groß. Allerdings unterscheiden sich sehr viele dieser Verfahren nur wenig. Dies ermöglicht deren Einordnung in verschiedene charakteristische Gruppen, die sich nach dem Prinzip der Messwertumformung bzw. der Messwertübertragung unterscheiden in:

- hydraulisches Messprinzip (Druckkissen, Druckdose),
- elektrisches Messprinzip (Dehnungsmessstreifen, induktive Geber),
- mechanisches Messprinzip (Schwingsaiten, Messuhren),
- optisches Messprinzip (spannungsoptisch aktive Materialien).

Bei den hydraulischen Druckmessdosen nach GLÖTZL wirkt der in dem Druckkissen herrschende Druck auf eine Membrane ein, die dadurch gegen eine Platte gepresst wird und zwei dort angebrachte Bohrungen verschließt. Durch die eine der Bohrungen wirkt ein Gegendruck, der so lange gesteigert wird, bis die Membrane von der Platte abhebt. Da beide Bohrungen in diesem Fall miteinander kommunizieren, äußert sich das Abheben durch Ausströmen des Druckmediums an der zweiten Bohrung. Der notwendige Gegendruck entspricht dann dem in der Messdose herrschenden Druck. Zur Anzeige sind nur geringe Membranbewegungen notwendig, die Messdose arbeitet demzufolge sehr hart.

Das Stressmeter nach POTTS besteht aus zwei gleichgestalteten, länglichen Kernstücken aus hochfestem Stahl, die so aufeinanderliegen, dass sich ein konischer Drehkörper ergibt. In die Auflageflächen sind flache Nuten eingefräst. Dadurch entsteht zwischen beiden Hälften ein schmaler Spalt, der mit einer Öl-Wasser-Emulsion gefüllt wird. Dieses Kernstück wird in eine gespaltene, in ihrem Inneren ebenfalls konisch gearbeitete Muffe gepresst. Dabei werden die beiden Muffensegmente auseinandergespreizt und mit definierter Vorspannung gegen die Bohrlochwandung gedrückt. Auf ein Ende des Kernstücks wird ein Messkopf aufgeschraubt. Dieser wandelt den im Kernspalt herrschenden Druck über eine mit Dehnungsmessstreifen bestückte Membran in ein elektrisches Signal um.



Das konische Mittelstück wird mit einer kleinen, speziell zu diesem Zweck konstruierten Hydraulikpresse in die Muffe gedrückt. Dadurch lässt sich dieser Messgeber mit definierter Vorspannung in das Bohrloch einsetzen, weshalb sich sowohl zunehmende als auch abnehmende Spannungen erfassen lassen.

Wie aus dem Namen hervorgeht, benutzt man bei dem "Vibrating Wire Stressmeter" nach HAWKES die Abhängigkeit der Schwingfrequenz eines Drahtes von seiner Spannung als Messprinzip. Das Messelement besteht aus einem dickwandigen, gehärteten Stahlrohr, in dem senkrecht zur Rohrachse ein 0,23 mm starker Stahldraht gespannt ist. In unmittelbarer Nähe dieses Drahtes befindet sich eine elektromagnetische Spule, die sowohl zur Erregung der Drahtschwingung (durch Stromimpuls) als auch zur Aufnahme der Schwingfrequenz dient. Der Messkörper ist an seiner Außenwand an einer Stelle abgeflacht. Dort wird, zusammen mit einem Stahlkeil, eine dem Bohrlochradius angepasste Druckplatte aufgesetzt. Mit einer speziell entwickelten, hydraulischen Setzeinrichtung lässt sich das Geberelement in ein 38 mm-Bohrloch einbringen und verkeilen. Spannungsänderungen in der Bohrlochumgebung bewirken eine Verformung des Rohrkörpers und damit die Änderung der Drahtspannung. Den daraus resultierenden Wechsel der Schwingfrequenz des Drahtes kann man an einer über Kabel mit dem Geber verbundenen Messbox ablesen. Zur Korrektur des Temperaturfehlers ist im Messkörper ein elektrischer Temperaturfühler eingebaut, dessen Signal ebenfalls über das Kabel nach außen übertragen wird. Das Messelement ist durch Eingießen der elektrischen Teile weitgehend wasserunempfindlich. Zur Anpassung an wechselnde Gesteinsfestigkeiten sind Druckplatten mit unterschiedlich großer Fläche verfügbar.

Ein von ROBERTS u. a. entwickelter Messgeber basiert auf der Spannungsoptik. Er besteht aus einem Glaszylinder, der über ein Polarisationsfilter und eine $\lambda/4$ -Platte von einer kleinen Glühbirne durchleuchtet wird. Klebt man diesen in das Messbohrloch ein, so übertragen sich die Spannungsänderungen im Gebirge auf ihn. Wenn man den Glaszylinder dann durch ein zweites Polarisationsfilter betrachtet, erscheint ein Isochromatenbild, aus dem sich der Spannungszustand im Glas und damit auch im umgebenden Fels ableiten lässt.



Die Langzeitstabilität ist aufgrund der Eigenschaften des Glases sehr gut. Ein Einsatz in tieferen Bohrlöchern wird durch die Verwendung von optischen Sonden oder Bohrloch-kameras möglich.

Als teilweise kritisch hat sich jedoch der Einbau solcher Messgeber erwiesen, da nur eine gleichmäßige und spannungsfreie Verklebung exakte Isochromatenbilder garantiert.

Das einzige bisher zur Anwendung kommende Verfahren zur Messung von absoluten Spannungen in Bohrlochtiefen über 200 m Teufe ist die Methode der Risserzeugung im Gebirge, die unter dem Namen "Hydraulic Fracturing" bekannt geworden ist. Es wurde bereits in Bohrlochtiefen von 4000 m und mehr eingesetzt. Unter der Voraussetzung bestimmter Randbedingungen ermöglicht es die vollständige Bestimmung des Spannungstensors.

Bei der Anwendung der "Hydraulic Fracturing"-Technik wird nach der klassischen Theorie vorausgesetzt, dass das Gebirge an der Messstelle elastisch, isotrop und unzerklüftet ist, und dass eine der drei Hauptspannungen nahezu vertikal verläuft. In dieser Richtung wird ein Bohrloch bis zur gewünschten Tiefe vorgetrieben und die Messzone sodann an ihrer oberen und unteren Grenze durch je einen aufblasbaren Gummipacker abgedichtet. In diesen abgeschlossenen Bohrlochbereich wird eine Flüssigkeit (Wasser, Öl) eingepumpt und deren Druck so lange gesteigert, bis ein plötzlicher Flüssigkeitsverlust bzw. Druckabfall eintritt, weil in der Bohrlochwandung ein Zugriss entsteht. Wird nun mit dem Pumpen aufgehört, so kommt die Rissausbreitung nach einer Weile zum Stillstand und es stellt sich ein Druckwert ein, der gerade ausreicht, den Riss offen zu halten. Nach einer völligen Druckentlastung der Teststrecke wird in einem zweiten Versuch der Öffnungsdruck des in der Bohrlochwandung erzeugten Risses bestimmt. Aus diesen Drücken und aus der Orientierung des entstandenen Risses, der mit einem Abdruckpacker abgebildet wird, kann die Größe und Richtung der Hauptnormalspannungen abgeleitet werden. In jüngerer Zeit konnte nachgewiesen werden, dass das Verfahren auch in nicht-elastischem und geklüftetem Gebirge eingesetzt werden kann (BAUMGÄRTNER u. RUMMEL, 1989) und dass die Bohrung nicht parallel zu einer der Hauptspannungsrichtungen liegen muss.



Bohrt man in einen unbelasteten Gebirgskörper ein Bohrloch und belastet den Gebirgskörper anschließend, so ändert das Bohrloch seine Form. Ursprünglich kreisrund wird es einen kleineren und darüber hinaus bei unterschiedlichen Seitendrücken einen elliptischen Querschnitt annehmen.

Die Durchmesseränderung ist dabei eine Funktion u. a. der Spannungen, des E-Moduls und der Poissonzahl.

Entsprechendes gilt für den umgekehrten Fall:

Wird ein Bohrloch in einen belasteten Gebirgsbereich gebohrt und wird dieser Gebirgsbereich anschließend entlastet, so wird der Bohrlochquerschnitt seine Form ebenfalls, allerdings nun in umgekehrter Richtung ändern. Eine vollständige Entlastung der Bohrlochumgebung kann auf einfachste Weise durch koaxiales Überbohren des Messbohrlochs mit einer Kernbohrkrone erreicht werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass der überbohrte Hohlkern keine messbaren Zerrüttungs- oder Auflockerungserscheinungen des Gesteinsgefüges und damit inelastische Volumenänderungen erfährt.

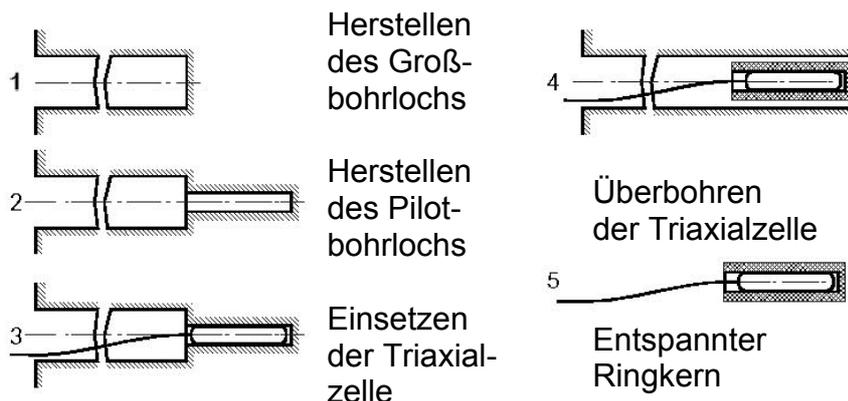


Abb. 1 Prinzip der Bohrlochmantel-Entlastungsmethode



Um den dreidimensionalen Spannungszustand im Gebirge nach dem Verfahren der Mantel-Entlastung zu messen, wurden seit 1972 an mehreren Forschungsinstituten Messzellen entwickelt, von denen wir eine, die "Hollow Inclusion Stress Cell" der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), in unserem Messprogramm anbieten. Diese Triaxialzelle (Austr. Patent Nr. 496712) wird von der Firma Environmental Systems & Services Pty Ltd, Victoria, Australia, in Lizenz produziert und in der Bundesrepublik von uns eingesetzt.

Die HI-Zelle besteht aus einem Kunststoffrohr, in dem neun Dehnungsmessstreifen eingebettet sind (s. Abb. 2). Diese Zelle wird in einem EX-Bohrloch (\varnothing 39 mm, Länge etwa 600 bis 700 mm) in Kunststoffinjektionsgut eingebettet und nach dem Aushärten mit einer Überbohrkrone (\varnothing 146 mm) freigebohrt, wobei vor, während und nach dem Bohrvorgang kontinuierlich die Bohrlochdurchmesseränderung gemessen wird.

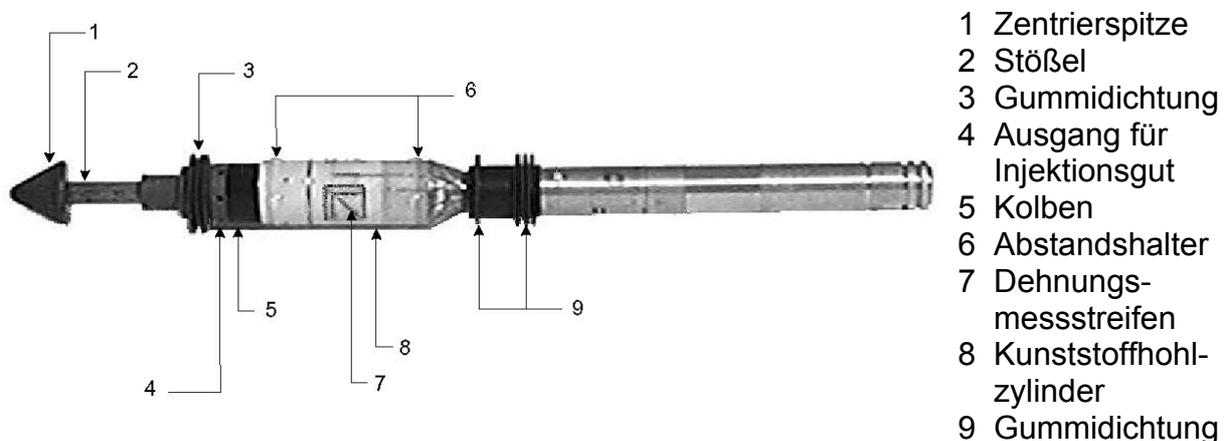


Abb. 2 Triaxialzelle HI zur Messung der Primärspannungen nach der Mantel-Entlastungsmethode



In der HI-Zelle sind die drei $45^\circ/90^\circ$ Dehnungsmessrosetten genau unter 120° zueinander angeordnet, so dass drei Streifen in Ringrichtung, zwei in Axialrichtung und vier unter $\pm 45^\circ$ zur Bohrlochachse zu liegen kommen (s. Abb. 3). Jeder Messstreifen ist 10 mm lang, um groß im Vergleich zur Körnung des Gesteins zu sein. Durch Anordnung und Größe ist gewährleistet, dass eine realistische Messung des kompletten Spannungstensors möglich ist.

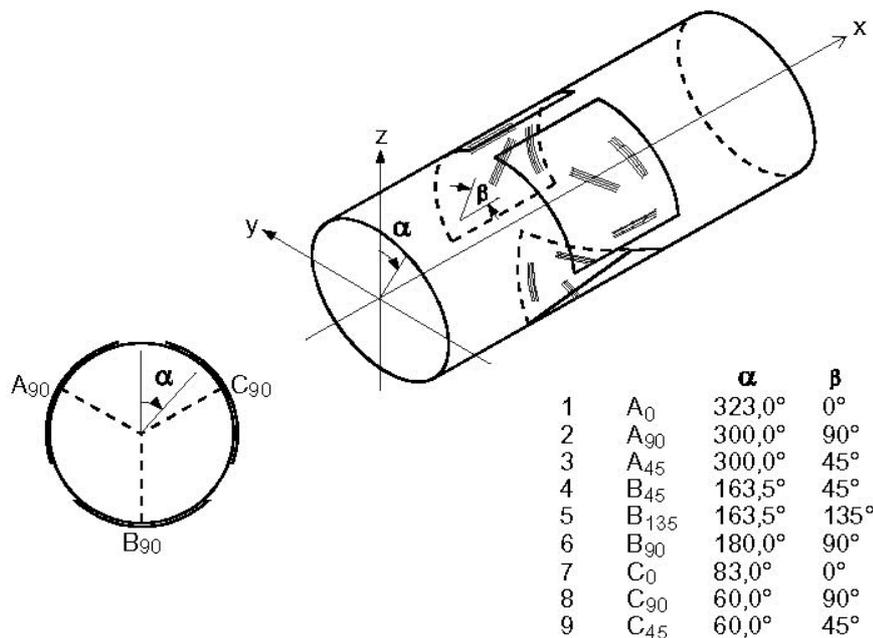


Abb. 3 Anordnung der Dehnungsmessrosetten in der HI-Zelle

Um die HI-Zelle im Bohrloch zu injizieren, wird die Zelle mit einem 2-Komponenten-Kleber gefüllt und dieser durch Bohrungen mit Hilfe eines zylinderförmigen Stößels ausgepresst, so dass der Hohlraum zwischen Messzelle und Bohrlochwand gänzlich verfüllt ist. Die Wanddicke der Füllung beträgt im Normalfall 1,5 mm, sie wird aber am besten durch Aufsägen des überbohrten Kernes nachvermessen, weil dieser Wert in die Spannungstensorberechnung eingeht. Der Stößel kann entweder durch Verschieben der Messzelle gegen das Bohrlochtieferste oder durch einen Zugdraht betätigt werden.



Die Anwendung des Messverfahrens beschränkt sich momentan auf Bohrlochtiefen bis 150 m. Größere Einsatztiefen sind zwar grundsätzlich möglich, wir halten sie jedoch nicht für empfehlenswert, da der Einbau nur sehr schwer möglich ist und der Querschnitt der Messleitungen ebenfalls Grenzen bei der Übertragung der Messwerte setzt.

Durch den Einsatz eines Bohrlochcomputers, der unmittelbar über der Messzelle befestigt wird, ist es in jüngster Zeit gelungen, das Übertragungsproblem zu lösen, die Topfzeit des Kunststoffklebers stellt jedoch immer noch eine Grenze für die Einbautiefe dar. Der Bohrlochcomputer ermöglicht darüber hinaus auf einfache Weise eine kontinuierliche Messung der Dehnungen während des Überbohrens. Bisher waren kontinuierliche Messungen nur über Kabel und bei Verwendung einer Spindelbohrmaschine mit Einfachkernrohr möglich. Die Einsatztiefe bei dieser Methode war auf ca. 30 m beschränkt und bedurfte eines erheblichen Mehraufwandes von Seiten des Bohrunternehmers, so dass aus bohrtechnischen Gründen meistens nur eine Entspannungsmessung nach dem Bergen des Kerns durchgeführt wurde. Der Bohrlochcomputer erlaubt jetzt kontinuierliche Messungen während des Überbohrens bis zur Maximalteufe von 150 m, wobei mit Doppelkernrohr und modernen Standardbohrausrüstungen ohne Behinderung des Bohrbetriebs gearbeitet werden kann. Abb. 4 zeigt ein Messbeispiel des Dehnungsverlaufs in Abhängigkeit vom Bohrfortschritt.

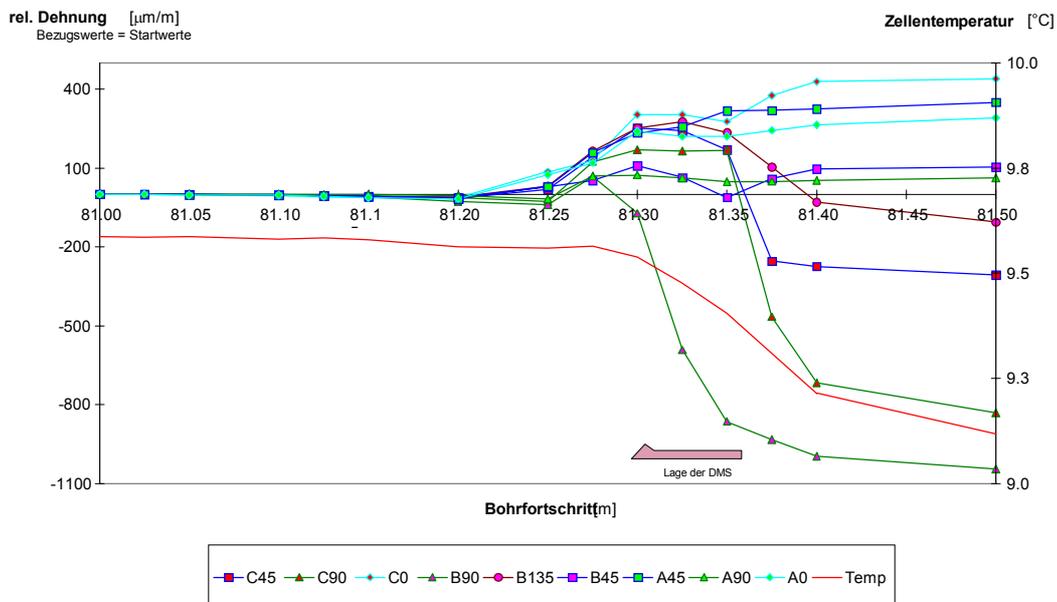


Abb. 4 Signalverlauf während des Überbohrens



Ein Einsatz der Triaxialzelle unter Wasser ist möglich, da das verwendete Kunststoffinjektionsgut auch bei Gegenwart von Wasser aushärten kann. Zufriedenstellende Ergebnisse können nur dann erzielt werden, wenn der Kluftabstand an der Messstelle größer als 250 mm ist und davon ausgegangen werden kann, dass die Messzelle innerhalb eines größeren Kluftkörpers liegt.

Für die Berechnung des Primärspannungszustandes ist die Kenntnis der elastischen Parameter des Gesteins erforderlich. Diese werden sinnvollerweise direkt am überbohrten Kern durch einen Biaxialversuch bestimmt. Hierzu wird der überbohrte Kern mit der eingeklebten Triaxialzelle in der Biaxialkammer radial mit Druck beaufschlagt und die dabei auftretenden Verformungen gemessen. Der Druck wird mittels einer Hydraulikpumpe auf den neoprenummantelten Bohrkern aufgebracht. Die Protokollierung der gemessenen Dehnungen erfolgt in Laststufen von 0,25 - 0,5 MPa. Aus dem Verlauf der Arbeitslinien kann außerdem auf die Qualität der Einklebung der Triaxialzelle geschlossen werden.

Zur Berechnung des vollständigen Spannungstensors aus den Messergebnissen der CSIRO-Zelle ist die Kenntnis folgender Eingangsparameter erforderlich:

- Verformungsbeträge der Zelle infolge der Gesteinsentlastung,
- räumliche Orientierung der Messzelle,
- elastische Gesteinseigenschaften.

Da die Dehnungsmessstreifen der CSIRO-Zelle von der Wandung des EX-Bohrlochs durch einen ca. 1,5 mm breiten Araldit-gefüllten Spalt getrennt sind, unterscheiden sich die in Ringrichtung sowie in 45°- bzw. 135°-Richtung gemessenen Dehnungen von den tatsächlichen Werten. WOROTNICKI u. WALTON (1976) haben daher vier Korrekturfaktoren ermittelt, mit deren Hilfe sich die an der Bohrlochwandung aufgetretenen Verformungen aus den gemessenen Werten berechnen lassen. Diese Korrekturfaktoren finden im Auswerteprogramm Berücksichtigung. Geeignete Formeln zur Berechnung des Spannungszustands aufgrund der gemessenen Verformungen der Bohrlochwandung infolge Überbohrens wurden von LEMANN (1971) veröffentlicht. Zur Bestimmung des vollständigen Spannungstensors sind allgemein sechs voneinander unabhängige Dehnungsmessungen erforderlich. Die CSIRO-Zelle liefert jedoch neun Dehnungswerte in acht verschiedenen Richtungen. Diese Redundanz der Messwerte ermöglicht eine Auswahl der Ergebnisse mit Hilfe einer Regressionsrechnung nach dem Prinzip der



kleinsten Quadrate. Im ersten Schritt wird somit der aus dem Gesamtbild herausragendste Dehnungsmesswert ermittelt und eliminiert. Mit den verbleibenden acht Messwerten kann dann ein weiterer Iterationsschritt vorgenommen werden. Maximal drei Iterationen sind möglich, da mindestens sechs Dehnungsmesswerte gewertet werden müssen. Darüber hinaus lässt sich die Qualität eines Datensatzes anhand der statistischen Kennwerte beurteilen, welche vom Rechenprogramm ermittelt werden.

Man sollte jedoch bedenken, dass die Multiple-Regressionsrechnung gewisse Annahmen - die Daten betreffend - beinhaltet und eine streng nach statistischen Gesichtspunkten optimierte Lösung liefert. Eine endgültige Beurteilung der Relevanz einzelner Messwerte sollte daher weiterhin aufgrund von Erfahrungswerten vorgenommen werden. Von Bedeutung dabei sind außer den statistischen Kennwerten auch Einflüsse, die aus den individuellen Bedingungen während der Versuchsdurchführung resultieren.

Der Spannungszustand im Gebirge wird mit Hilfe des Programms STRESS91 berechnet. Das von MILLER (1983) in Australien entwickelte Rechenprogramm verwendet das oben beschriebene Iterationsverfahren; während jedes Iterationsschrittes wird der Dehnungswert mit der größten Abweichung zur Kleinsten-Quadrate-Lösung eliminiert. Ebenso können jedoch auch einzelne Messwerte vom Bearbeiter aussortiert werden, wenn sie aus irgendeinem Grund unbrauchbar erscheinen.

Als Eingabedaten erwartet das Programm:

- Allgemeine Informationen zur Kennzeichnung des Versuchs,
- Orientierung der Bohrung,
- E-Modul und Poissonzahl des Gesteins,
- Dehnungswerte und Raumstellung der Dehnungsmessstreifen.

Der Programmoutput (s. nachfolgendes Auswertbeispiel) besteht aus:

- den drei Hauptspannungsrichtungen und -beträgen,
- drei Normal- und drei Scherkomponenten relativ zum Bezugssystem und
- den kennzeichnenden statistischen Werten zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der Messergebnisse.

**Bestellhinweise**

- 13.1.1 CSIRO HI-Triaxialzelle (modifizierte Ausführung System GIF) mit 9 Messstellen und integriertem Thermistor zur Temperaturmessung
- 13.1.2 Epoxydharz-Kleber für die Zementation der CSIRO HI-Triaxialzellen, Menge auf eine Zelle abgestimmt, für Gebirgstemperatur-Bereiche von + 4 bis + 10°C, + 10 bis + 18°C, + 18 bis + 25°C, + 25 bis + 32°C, + 32 bis + 45°C, + 45 bis + 60°C (bitte angeben)
- 13.1.3 Setz- und Zentriervorrichtung für Versuchsbohrungen von 146 mm und Pilotbohrungen von 39 mm Durchmesser (horizontale oder vertikale Version)
- 13.1.4 Setzgestänge aus Aluminium mit torsionssteifen Kupplungen aus rostbeständigem Stahl, Länge 2 m
- 13.1.5 Bohrlochcomputer zur Registrierung der Dehnungen beim Überbohren (Wireless-Version) einschl. Kompasssonde und Neigungsmesser zur Feststellung der Einbaurichtung der Triaxialzelle
- 13.1.6 Biaxialkammer zur Bestimmung der Materialkennwerte am überbohrten Kern mit Handpumpe und Feinmessmanometer für einen Kerndurchmesser von 101 ± 2 mm (andere Durchmesser auf Anfrage)
- 13.1.7 Einbau-Bedienungshandbuch CSIRO
- 13.1.8 Auswerteprogramm STRESS 91



Das Verfahren beruht auf einer künstlichen Entspannung des Gebirges durch einen Sägeschnitt bei gleichzeitiger Messung der auftretenden Verformung. Diese wird durch einen Kompensationsdruck, der mit geeigneten Belastungseinrichtungen aufgebracht wird, wieder rückgängig gemacht. Die hierzu aufzubringenden Spannungen entsprechen in der Regel den ursprünglich vorhandenen Spannungen. Im Gegensatz zu den Entlastungsmethoden ist bei diesem Verfahren eine Kenntnis der elastischen Konstanten des an der Messstelle anstehenden Gesteins nicht notwendig.

Die Kompensationsmethode wurde erstmals von MAYER et al. (1951) angewendet und später durch ROCHA et al. (1966) vereinfacht und verfeinert. Ihr Prinzip und die Arbeitsvorgänge sind in Abb. 1 veranschaulicht. Im ersten Arbeitsgang werden auf der Oberfläche des Bauteiles Messstifte auf beiden Seiten des herzustellenden Messschlitzes in geeigneter Anordnung einzementiert. Ihre Abstände werden mit elektrischen Wegaufnehmern oder Setzdehnungsgebern (Ablesegenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$) registriert.

Im Anschluss an die Nullmessung wird mit einer diamantbestückten Kreissäge ein in der Regel 400 mm breiter und 5 mm hoher Messschlitz hergestellt. In den Schlitz wird ein halbmondförmiges hydraulisches Druckkissen passgenau eingesetzt und mit einer Hydraulikpumpe, an der ein Feinmessmanometer der Klasse 1.0 angebracht ist, verbunden. Das Druckkissen wird anschließend soweit belastet, bis die Entlastungsverformungen wieder kompensiert sind.

Das Verfahren besitzt eine Reihe von Vorteilen:

- es setzt kein linear elastisches Gebirge voraus,
- die Verformungseigenschaften des Gebirges (Gesteins) müssen nicht bekannt sein,
- infolge der großen Versuchsabmessungen haben Inhomogenitäten des Gebirges geringere Bedeutung.

Diese Methode versagt allerdings beim Auftreten von Zugspannungen, die jedoch in der Praxis seltener vorkommen.

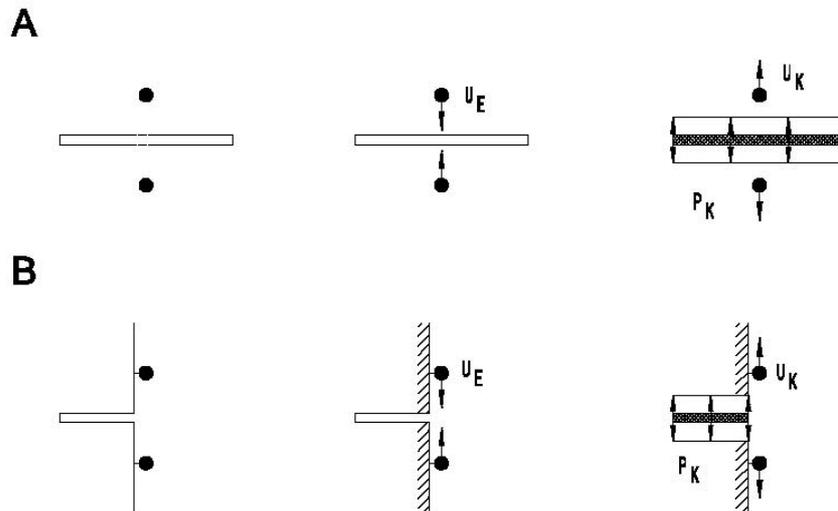


Abb. 1 Messprinzip Kompensationsverfahren
 A = Ansicht, B = Querschnitt
 U_E = Entlastungsverformung
 U_K = Rückverformung bei Kompensation
 P_K = Kompensationsdruck

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nach der Kompensationsmethode wird von folgender Gleichung ausgegangen:

$$\sigma_n = p \cdot K_m \cdot K_a$$

p = Öldruck im Kissen bei vollkommener Kompensation

K_m = Formkonstante des verwendeten Druckkissens

K_a = Verhältnis zwischen Kissenfläche und Schnittfläche

Die mit dieser Gleichung bestimmten Spannungen entsprechen den tangentialen Spannungen im Abstand von 5 cm vom Außenrand der Felsoberfläche.



Unter der Voraussetzung, dass in den Druckkissen Weggeber eingebaut sind, oder dass das zur Druckkissenaufweitung eingespeiste Volumen der Hydraulikflüssigkeit auf 1 cm^3 genau gemessen werden kann, eignen sich die Kompensationsversuche auch zur Bestimmung des Gebirgsverformungsmoduls. Entsprechend der Empfehlung Nr. 7 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (1984) und Suggested Method for Deformability Determination using a Large Flat Jack Technique der ISRM (1986) sind in diesem Falle im Allgemeinen jedoch große Schlitzte mit Druckkissen von ca. $1000 \times 1000 \text{ mm}$ (LFJ) zu verwenden. Nach der Elastizitätstheorie gilt für den homogenen, isotropen Halbraum, auf den eine Gleichlast einwirkt:

$$E = (1 - \nu^2) \frac{K}{\Delta s} \Delta p$$

ν = Poissonzahl

K = Formbeiwert mit der Dimension einer Länge

p = Öldruck im Kissen

s = Verschiebung

Bei Kenntnis des Beiwertes K ist also eine Bestimmung des Gebirgsverformungsmoduls möglich. In Abb. 2 sind K -Werte für Kissen mit 1000 mm Breite und 1250 mm Gesamtlänge wiedergegeben. Darüber hinaus sei auf die Publikationen von LOUREIRO-PINTO (1981) verwiesen, wo weitergehende Berechnungsmöglichkeiten für K -Werte angegeben sind.

Druckkissenanordnung	Position	K[cm]	Position	K[cm]
	A, B C, D	131 136		
	A, F B, E	150 191	C, I D, G	160 215
	A, L B, J C, N	155 202 167	D, M E, F G, I	231 216 249
	A, P B, O C, R D, Q	157 206 170 237	E, L F, J G, N I, M	223 228 259 267

Abb. 2 K-Werte für verschiedene Druckkissenkombinationen aus DGEG (1984)

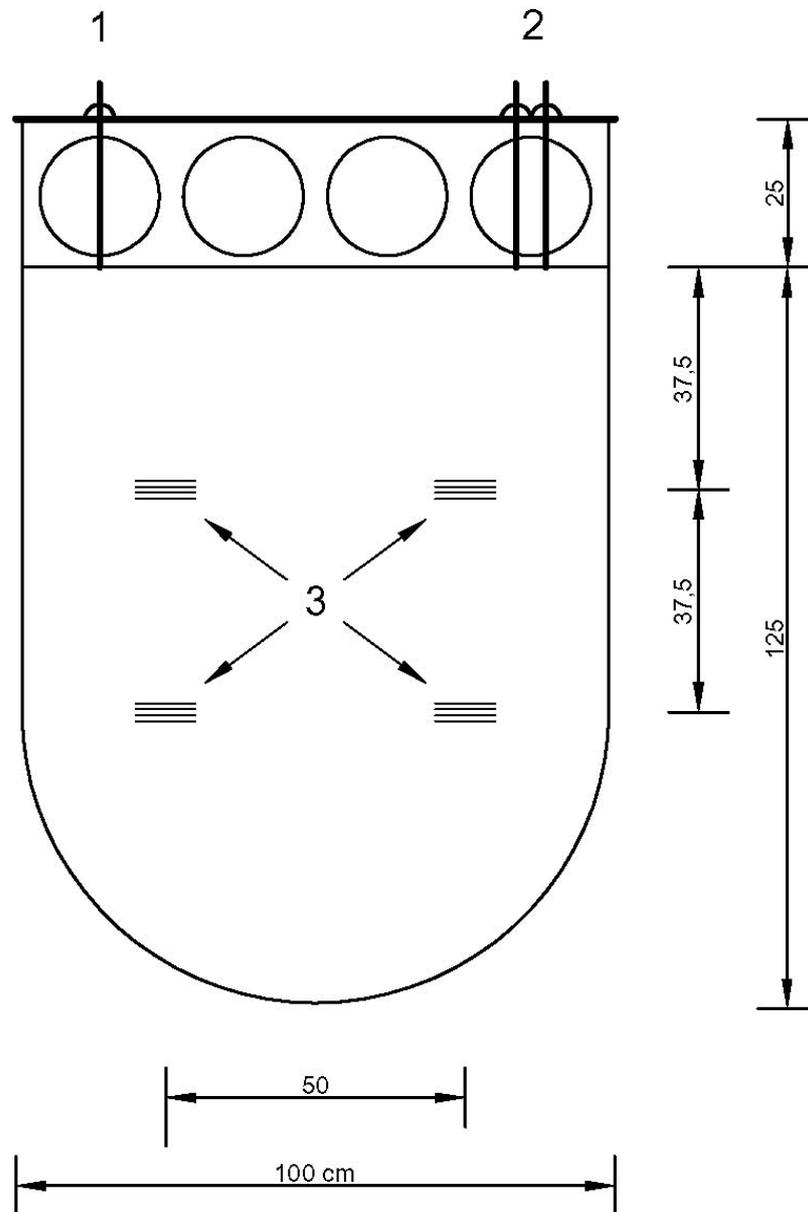


Abb. 3 Abmessungen des Large Flat Jacks (LFJ)
1 Öl-Einlass, 2 Anschlüsse für die Deformeter, 3 Deformeter



Bei dem Verfahren des steifen Einschlusses (hard-inclusion) werden Spannungsaufnehmer mit i. a. hoher Steifigkeit in einem Bohrloch eingebracht, um auftretende Spannungsänderungen zu registrieren. Die Methode benutzt Messgeber, deren E-Modul hoch ist im Vergleich zum E-Modul des Gebirges an der Messstelle. Dabei geht man von folgenden grundlegenden theoretischen Zusammenhängen aus:

Bringt man in einen elastisch beanspruchten Gebirgskörper mit dem E-Modul E_G einen Messgeber mit dem E-Modul $E_M > E_G$ kraftschlüssig ein, so wird sich die Spannung im Messgeber von der im umgebenden Gebirgskörper unterscheiden; es treten Spannungskonzentrationen im Messgeber auf. Ist das Verhältnis der Moduli E_M/E_G bekannt, so lassen sich die im Geber gemessenen Spannungen korrigieren.

Nach dem Prinzip der Messwertumformung bzw. der Messwertübertragung lassen sich eine Reihe von Verfahren unterscheiden:

- hydraulisches Messprinzip
- elektrisches Messprinzip
- mechanisches Messprinzip
- optisches Messprinzip

Als Spannungsaufnehmer haben sich flache Druckkissen hoher Normalsteifigkeit besonders bewährt. Die Druckmessgeber (Abb. 1) werden orientiert in Messbohrlöcher eingebaut. Gemessen wird die Spannungskomponente normal zu den Druckkissen.

Zur Herstellung des Kraftschlusses zwischen Druckkissen und dem Gebirge werden die Bohrlöcher mit einem geeigneten, auf das Gebirgsverhalten abgestimmten Mörtel verfüllt. Nach Abbinden des Verfüllmörtels kann eine Vorspannung durch Hochdruckinjektion von Epoxydharzen vorgenommen werden.

Das Verfahren ist geeignet zur Erfassung auch relativ geringer Spannungsänderungen. In viskosem oder in plastisch beanspruchten Gebirgsbereichen kann man damit rechnen, dass der Geber durch Fließen des Gebirges "einwächst", d. h., dass sich die im Gebirge herrschenden Spannungen allmählich auch im Messgeber aufbauen. Bei solchen Gebirgsverhältnissen und entsprechend gewähltem Verfüllmörtel können dann



außer Spannungsänderungen auch die tatsächlichen Größen der Normalspannungskomponenten ermittelt werden.

Der Standard-Gebirgsspannungsaufnehmer besteht aus:

Drei richtungsorientierten, flachen Stahl-Druckkissen mit drei Ventilgebern, Typ BB 10/20 KF 50, um je 120° gedreht angeordnet. Belastbarkeit 0 – 50 bar (erforderlichenfalls auch höher). Injektionsleitung um die Druckkissen und Vierkant-Gestängeanschluss. Verbindungsleitungen für die Messung der Ventilgeber und Injektionsleitungen für die Nachinjektion.

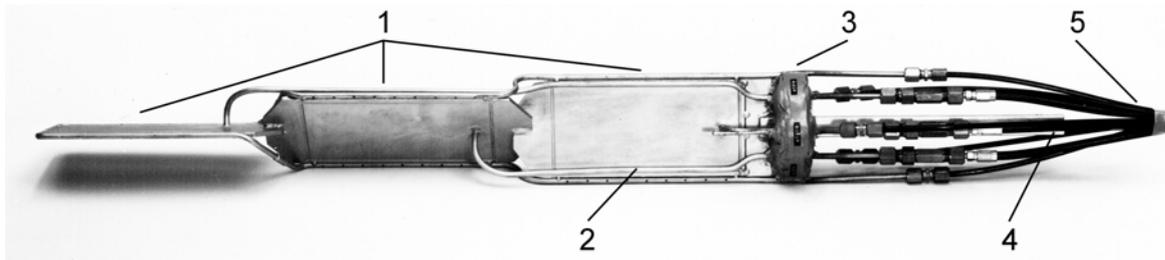


Abb. 1 Druckmessgeber mit drei hydraulischen Druckkissen

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1 Druckkissen | 2 Injektionsleitung |
| 3 Ventilgeber | 4 Vierkantgestängeanschluss |
| 5 Verbindungsleitungen | |

Die Messung des Drucks in den Druckkissen wird hydraulisch über Ventilgeber System Glözl oder elektrisch mit Druckaufnehmern vorgenommen. Die in den Druckkissen herrschende Spannung wird am Messgerät direkt in bar angezeigt.

Die gelochten Hochdruck-Injektionsleitungen, die randlich um die Druckkissen angeordnet sind, werden mit Klebeband verschlossen, um ein Eindringen von Verfüllmaterial beim Einbau zu verhindern. Nach Verfestigung des Verfüllmaterials kann über diese Injektionsleitungen durch Einpressen von z. B. Kunstharzen eine Vorspannung des Füllmaterials und der darin eingeschlossenen Spannungsaufnehmer erfolgen.



Bohrlochschlitzentlastung mit der Bohrlochschlitzsäge (Borehole Slotter) ist ein zweidimensionales Primärspannungsmessverfahren. Es basiert auf dem Prinzip einer lokalen Spannungsentlastung in einer Bohrung. Mit Hilfe einer pneumatisch angetriebenen Diamantsäge werden parallel zur Bohrachse Entlastungsschlitze gesägt (Abb. 1). Die Schlitze sind jeweils ca. 1 mm weit und bis zu 20 mm tief.



Abb. 1 Schlitzsonde am Mund eines Bohrlochs

In unmittelbarer Nähe des Schlitzes wird während des Sägens ein eigens entwickelter Kontaktdehnungsaufnehmer mit einer definierten Kraft an die Bohrlochwand gedrückt (Abb. 2). Seine Funktion ist die Erfassung der tangentialen Dehnung der Bohrlochwand, die mit dem Schlitzen einhergeht. Bei der in Abb. 3 gezeigten Konfiguration tritt am Messpunkt eine vollständige lokale Spannungsentlastung auf, die sich in einer proportionalen tangentialen Dehnung äußert.

Normalerweise werden die Bohrungen zunächst mit einer Bohrlochkamera befahren um ungeeignete Bohrlochabschnitte auszuschließen.



Am jeweiligen Messort werden nacheinander in verschiedenen Richtungen Schlitzte gesägt. Mindestens drei, um jeweils 120° versetzte Schlitzte, ermöglichen die Bestimmung des zweidimensionalen Spannungszustands. Normalerweise werden für eine Spannungsmessung jedoch noch drei zusätzliche Schlitzversuche an einer 10 cm tieferen oder höheren Messstelle im Bohrloch durchgeführt (Abb. 4) um durch Überbestimmung die Ergebnisse zu verifizieren.

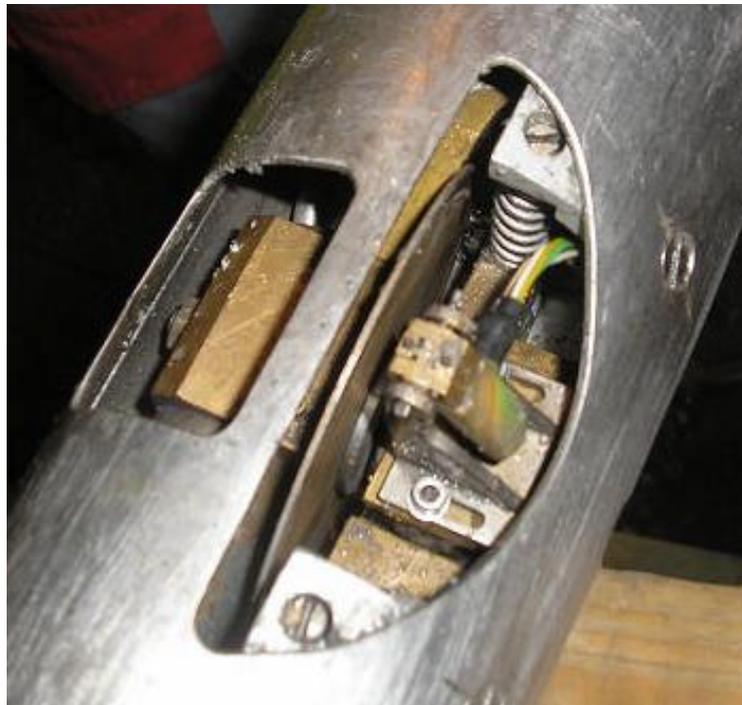


Abb. 2 Dehnungsaufnehmer neben dem Sägeblatt

Die sich daraus ergebende Redundanz der Messdaten erlaubt eine Quantifizierung der Güte der Messdaten, z. B. in Form eines Korrelationskoeffizienten. Diese Möglichkeit der inneren Kontrolle der Messdaten hat sich bei der Durchführung und Interpretation der Bohrlochschlitzversuche als äußerst vorteilhaft herausgestellt. Erscheint z. B. während der Versuchsdurchführung die innere Konsistenz der Messergebnisse als unzureichend niedrig, so können unmittelbar zusätzliche Schlitzte geschnitten werden, bis sich ein hinreichend beständiger Trend abzeichnet.



Bei der Auswertung wird der Untersuchungsbereich als linear elastisch, homogen und isotrop angenommen. Mit Hilfe des Modells der gelochten Scheibe wird über die Gleichungen von KIRSCH aus der Entlastung des sekundären Spannungszustandes beim Schlitzten im Bohrloch der Primärspannungszustand rückgerechnet. Als Eingangswerte müssen dazu der Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl aus einaxialen Druckversuchen am anstehenden Gestein ermittelt werden.

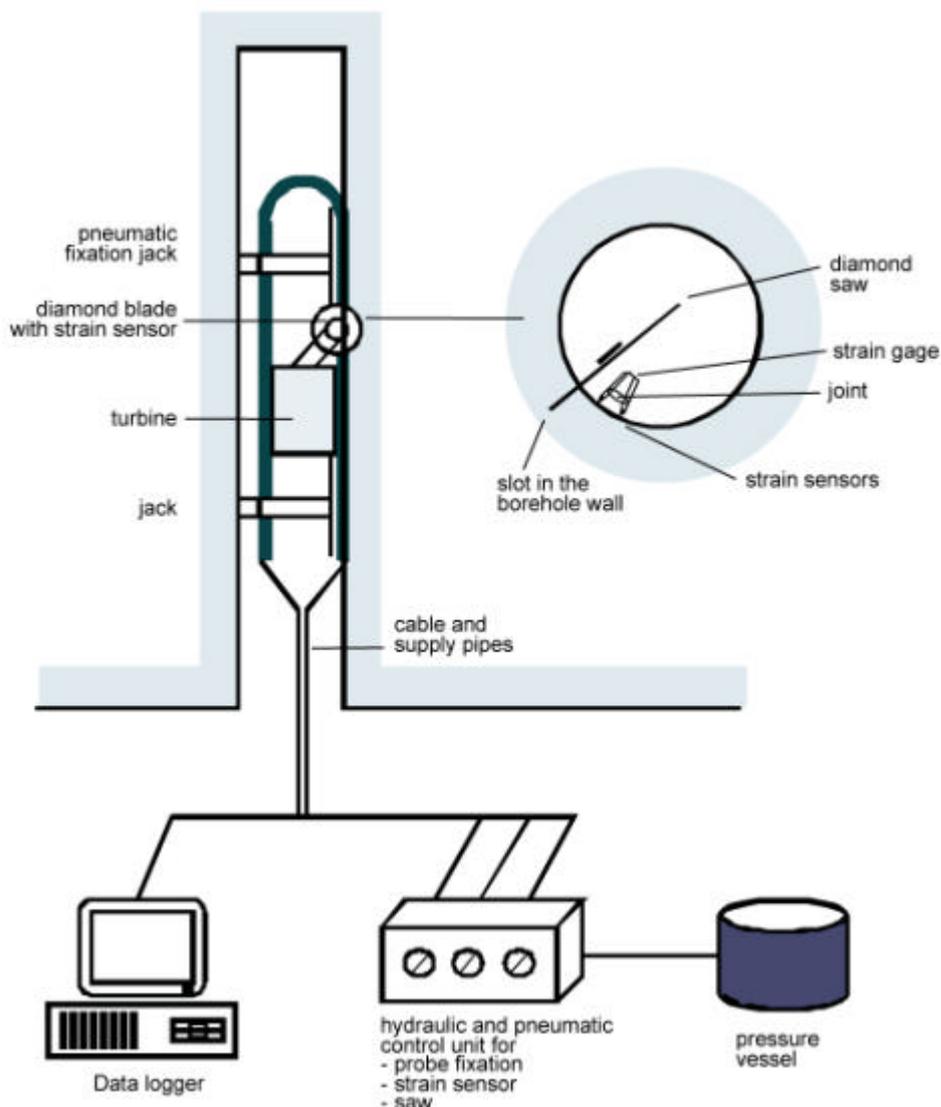


Abb. 3 Prinzipskizze des Versuchs mit der Bohrlochschlitzsäge



Die Genauigkeit der Primärspannungsmessung mit der Schlitzsonde hängt von der Größe des Gesteinsmoduls und der Empfindlichkeit des Dehnungsgebers ab. Für ein Gestein mit einem E-Modul von 40 GPa beträgt die Genauigkeit ca. +/- 0,5 MPa, wobei die Auflösung des Sensors bei etwa 1 Mikrostrain liegt.

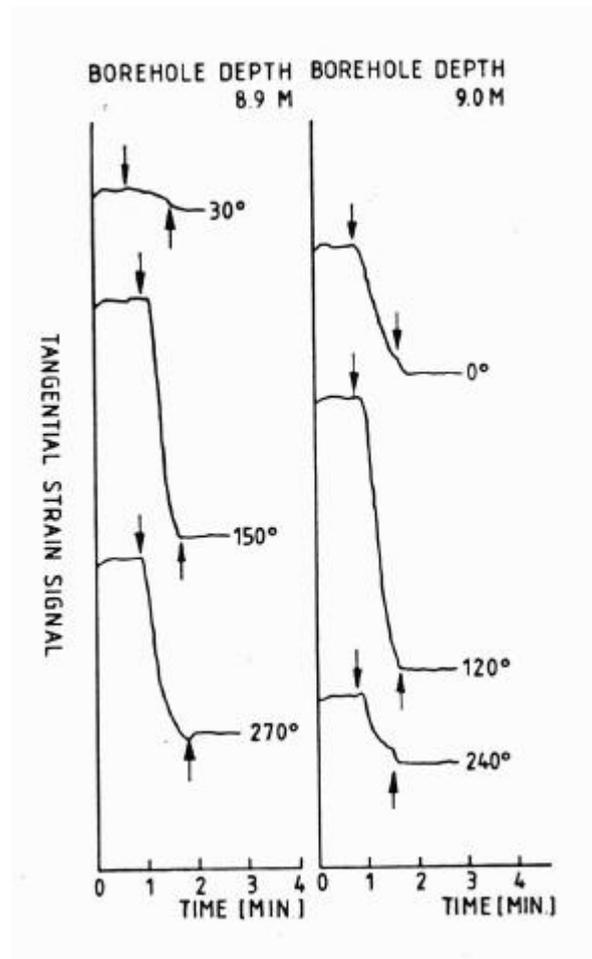


Abb. 4 Zeit-Dehnungskurven von 6 Schlitzversuchen, die zusammen eine einzelne, redundante 2-D Spannungsmessung ergeben

Um den dreidimensionalen Spannungszustand im Gebirge zu bestimmen, muss das Verfahren in drei Bohrungen mit unterschiedlichem Azimut und Einfallswinkel durchgeführt werden. Die Richtungen und Neigungen der möglichst ortsnahe beieinander liegenden Bohrungen sind exakt einzumessen, da diese Werte in die Berechnung des Spannungstensors eingehen.



Als Bohrungen werden Kernbohrungen benötigt, da für die Auswertung des Spannungszustandes der Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl des Gesteins an jeder Messstelle durch Laborversuche bestimmt werden müssen.

Technische Daten

Einsatzbedingungen

- Die Erkundung geologischer Bohrungen ist bis max. 30 m Teufe möglich.
- Unter Wasser ist das Verfahren nicht einsetzbar; die Bohrungen sollten daher leicht steigend bis vertikal nach oben angeordnet werden. Eine typische Anordnung der Bohrungen zur Bestimmung des 3D Spannungszustandes wäre:
Bohrung 1 subhorizontal, ungefähr 5° steigend (wenn möglich rechtwinklig zum Bohrloch 2)
Bohrung 2 subhorizontal, ungefähr 5° steigend (wenn möglich rechtwinklig zum Bohrloch 1)
Bohrung 3 vertikal nach oben.
- Der Bohrerlochdurchmesser der Kernbohrungen darf zwischen 96 und 103 mm liegen. Die Bohrung sollte mit einer Diamantbohrkrone gebohrt werden.
- Bei Messungen aus einem Tunnel oder Stollen heraus sollten die Messungen erst ab einer Tiefe vom 1,5 bis 2fachen des Hohlraumdurchmessers durchgeführt werden.
- Das Bohrloch sollte immer mindestens 1 m tiefer sein als die größte gewünschte Messtiefe.
- Die Arbeitsfläche vor dem Bohrloch sollte wegen des Schubgestänges mindestens 2 x 2 m betragen.

Abmessungen

Borehole-Slotter	L = 1300 mm, dia = 90 mm
Schubgestänge	LxBxH 1500x20x20 mm
Hydraulisch/Pneumatische Steuerungseinheit	LxBxH 660x390x650 mm

Gewicht

Borehole-Slotter	13,5 kg
Schubgestänge	1,0 kg / Schuss
Hydraulisch/Pneumatische Steuerungseinheit	28,0 kg