

Untersuchungen
zum festigkeitsmechanischen Verhalten
kristalliner Gesteine
bei Temperaturen bis 300 °C

Ch. Lempp
O. Natau

**Untersuchungen zum festigkeitsmechanischen Verhalten
kristalliner Gesteine bei Temperaturen bis 300⁰ C**

Christof Lempp und Otfried Natau

Kurzfassung:

Es werden Ergebnisse von festigkeitsmechanischen Untersuchungen an Graniten und Paragneisen vorgestellt, die bei Temperaturen bis 300⁰ C durchgeführt wurden. Dabei wird auf die Bedeutung der geometrischen Versuchsrandbedingungen bei derartigen festigkeitsmechanischen Versuchen eingegangen, die im Hinblick auf die kontinentale Tiefbohrung durchgeführt werden. Es werden Auswertungen der Bruchspannungen und der Bruchmechanismen dargestellt. Bei unverwitterten Graniten ergibt sich eine deutliche Abnahme der maximal aufnehmbaren Deviatorspannungen bei Temperaturen über 200⁰ C; die innere Reibung ist insbesondere bei 200⁰ C bis 300⁰ C stark vermindert. Bei angewitterten Graniten sind die temperaturbedingten Veränderungen weniger deutlich ausgeprägt. Die Bruchmoden von Granit- und Gneisproben unterscheiden sich. Das mechanische Materialverhalten wird wesentlich bestimmt durch zeitabhängige Vorgänge, die in speziellen Triaxialversuchen und in Kriechversuchen untersucht werden. Prozesse der Mikrorißbildung und des Rißwachstums werden als wesentlich für das Materialverhalten dargestellt.

Abstract:

Test results about strength and mechanical behaviour of granitic rocks and paragneiss at temperatures up to 300⁰ C are presented. The importance of the geometrical conditions in this kind of mechanical strength tests is demonstrated. The tests are explained in view to the deep continental drilling project (KTB). Evaluations of peak stresses and of failure modes are showed. Unweathered granites show a clear decrease of the maximum possible deviatoric stresses at temperatures above 200⁰ C; the internal friction is considerably reduced at temperatures of 200⁰ C to 300⁰ C. Moderately weathered granites show less pronounced effects of temperature influence. The failure modes of granitic and of gneissic samples differ. The mechanical behaviour of the rocks especially is related to the time dependent processes, which are investigated in special triaxial compression tests as well as in creep tests. Processes of microcrack formation and microcrack development are supposed to be important for the material behaviour.

Anschrift der Autoren: Dr. Christof Lempp und Prof. Dr. Otfried Natau, Lehrstuhl für Felsmechanik, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Richard-Willstätter-Allee, D 7500 Karlsruhe

1. EINFÜHRUNG

Die zentrale Frage der Standsicherheit eines mehr als 10 000 m tiefen Bohrloches in Mitteleuropa ist bisher noch nicht schlüssig beantwortet. Auch die bisherigen Beobachtungen zur Bohrlochstabilität der KTB-Vorbohrung erlauben es nicht ohne weiteres, Prognosen für die Tiefbohrung zu extrapolieren. Wahrscheinlich ergibt sich die endgültige Antwort auf die Standsicherheitsfrage erst beim Bohren.

Alle Ergebnisse von Vorausberechnungen hängen von den Modellannahmen, vom Rechenverfahren und von den festigkeitsmechanischen Parametern ab. Während die zu wählenden Modellannahmen und Rechenverfahren stark an den in-situ-Beobachtungen zur Stabilität der Vorbohrung orientiert sein sollten, können festigkeitsmechanische Parameter durchaus vorab im Labor an repräsentativem Gesteinsmaterial bestimmt werden. Jede vorlaufende Standsicherheitsberechnung für die Tiefbohrung wird dabei auf solchen festigkeitsmechanischen Parametern basieren, die notwendigerweise vor Erreichen einer kritischen Teufe ohne Kenntnis des maßgeblichen Versagensmodus ermittelt worden sind. Bei der Parameterermittlung wurde bisher vorrangig den sicher wichtigen physikalischen Versuchsrandbedingungen (Druck, Temperatur) Aufmerksamkeit geschenkt, während auf rein geometrische Versuchsrandbedingungen möglicherweise zu wenig geachtet worden ist.

Wichtige Voraussetzung bei allen festigkeitsmechanischen Experimenten ist die Erfassung eines repräsentativen räumlichen Betrachtungsbereiches, damit reproduzierbare und auf in-situ-Bedingungen übertragbare Meßergebnisse gewonnen werden können. Die Festigkeitsparameter sind stark vom Betrachtungsbereich, also von der Prüfkörpergröße abhängig.

Zunächst soll dieser geometrische Aspekt der Parameterermittlung diskutiert werden, bevor dann kurz die eingesetzte Versuchsanordnung vorgestellt und danach vorliegende Versuchsergebnisse erläutert werden. Abschließend soll eine Modellvorstellung skizziert werden, die die gemachten Beobachtungen zum festigkeitsmechanischen Verhalten zusammenfaßt.

2. BEDEUTUNG DER PRÜFKÖRPERGRÖßE

Während die Form der Prüfkörper (Verhältnis Höhe/Durchmesser λ) und die Art der Einspannung des Prüfkörpers (Endflächenqualität) durch felsmechanische Empfehlungen (vgl. z.B. ISRM-Commission, 1983) vereinheitlicht sind, wird die Größe der Prüfkörper (bes. Durchmesser) vor allem von den Möglichkeiten der Prüfmaschine und deren technischer Auslegung bestimmt. Naturgemäß führen hohe Prüfdrucke und -temperaturen zu relativ kleinen Prüfkörpervolumina, dabei muß ein Prüfkörpergrößeneffekt auf die Ergebnisse allerdings berücksichtigt werden.

Ganz allgemein ist bei zunehmender Prüfkörpergröße mit einer Festigkeitsabnahme zu rechnen, wenn der räumliche Trennflächenanteil (Mikrorisse, Risse, Klüfte) mit der Prüfkörpergröße zunimmt.

Die kristallinen Gesteine der Oberen Erdkruste, seien dies Granite mit Korngrößen im mm- bis cm-Bereich, Gneise mit ausgeprägter Lagentextur oder Granulite mit wechselnden Strukturen, alle Gesteinstypen besitzen eine typische sog. "innere Länge", mit der sich ein repräsentatives Volumenelement eingrenzen läßt (dabei soll von Trennflächen im Gebirgsverband hier zunächst ganz abgesehen werden).

Nachfolgend seien drei Untersuchungen beispielhaft genannt, aus denen deutlich hervorgeht, daß der Prüfkörpergröße erhebliche Bedeutung zukommt, weil die Versuchsergebnisse direkt von ihr beeinflußt sind. NATAU et al. (1983) zeigen, daß die einaxiale Druckfestigkeit eines feinkörnigen, laminierten Kalksteins aus dem Muschelkalk Nordwestdeutschlands mit zunehmender Prüfkörpergröße überlinear abnimmt (vgl. Abb. 1).

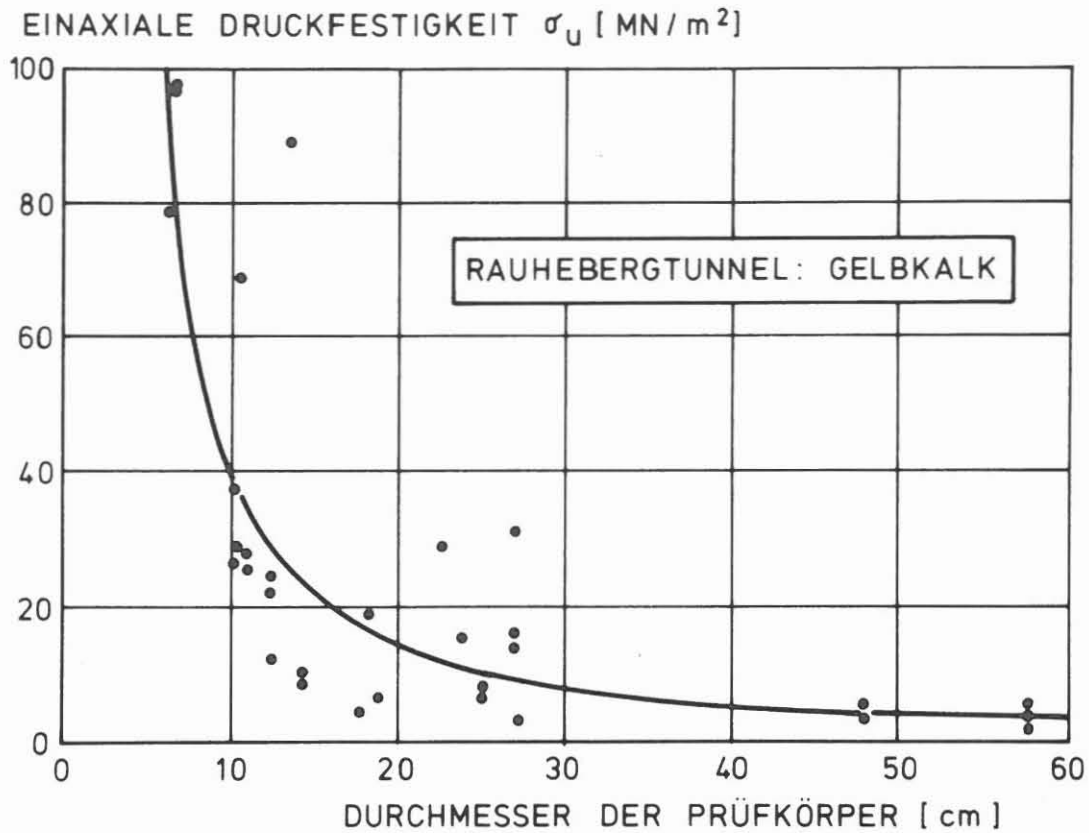


Abb. 1: Einaxiale Druckfestigkeit als Funktion der Probengröße nach NATAU et al., 1983)

CHO und HAIMSON (1987) vergleichen Versuchsergebnisse an einem Dolomitgestein, in dem zylindrische Bohrlöcher mit 14 mm bzw. mit 76 mm Durchmesser durch Erhöhung des Innendruckes hydraulisch aufgerissen werden. Es ergibt sich, daß bei zyklischen Wechselbelastungen unter sonst gleichen Versuchsbedingungen die größeren Bohrlöcher eine um 50% reduzierte Versagenszeit im Vergleich zu den kleineren Bohrlöchern besitzen. Die Autoren führen dieses Ergebnis auf einen geometrischen Effekt zurück.

MELLEGARD et al. (1983) führten Kompressionsversuche und Kriechversuche an monokristallinen Steinsalzproben mit Durchmessern von 50 mm und 100 mm durch und stellten fest, daß mit zunehmender Probengröße die Axialstauchung zurückgeht und daß sich der Seitendruck insofern auf das Ergebnis auswirkt,

als bei relativ hohem Seitendruck (σ_3 über ca. 10 MPa) die kleinen Proben fester und steifer sind als die großen Proben bzw. umgekehrt bei relativ geringerem Seitendruck ($\sigma_3 \leq 10$ MPa) die großen Proben fester und steifer sind als die kleinen. Unter Raumtemperatur erhöht sich außerdem bei größeren Proben die Kriechdehnung im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen an kleineren Proben. Erhöhte Temperaturen führen teilweise zur Umkehrung dieses Trends. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß statistisch betrachtet zwei unterschiedliche Prüfkörpergrößen im Vertrauensbereich von 95% als unähnlich anzusprechen sind. Die Versuchsergebnisse sind also nicht direkt vergleichbar.

Die genannten Beispiele mögen belegen, daß zur Bestimmung repräsentativer festigkeitsmechanischer Parameter ganz besonders bei den polykristallinen Krustengesteinen die Prüfkörpergrößen in einem sinnvollen Verhältnis zum interessierenden Betrachtungsbereich stehen müssen.

Untersuchungen zur petrographischen Homogenität verschiedener Gesteine (vergl. z.B. MÜLLER 1963, DREYER 1967) weisen die Bedeutung des Verhältnisses Probengröße zu Korngröße bei Festigkeitsuntersuchungen nach. Empirisch hat sich immer wieder bestätigt, daß der Prüfkörperdurchmesser wenigstens dem fünf- bis zehnfachen Korndurchmesser entsprechen muß, damit Homogenität gegeben ist.

Dementsprechend läßt sich abschätzen, daß zylindrische Prüfkörper mit Durchmessern von 50 mm bis 70 mm eine wichtige Voraussetzung bei Festigkeitsuntersuchungen an Krustengesteinen sind, wenn die Ergebnisse nicht durch undefinierte, von Einspannung und Korngröße überprägte Spannungszustände beeinflusst werden sollen. Der Querschnitt der Prüfkörper muß so groß sein, daß die an Korngrenzen auftretenden Spannungsspitzen innerhalb des Korngerüstes abgetragen werden und sich ein definierter, mittlerer Spannungszustand einstellen kann.

Neuere Stabilitätsanalysen von MÜHLHAUS und VARDOULAKIS (1986), bei denen die rechnerische Simulation von Bruchfugen- und Rißbildungen möglich ist und die daher für Standsicherheitsberechnungen der KTB besonders geeignet erscheinen, unterstreichen die Bedeutung dieser geometrischen Versuchsrandbedingungen: In diese Stabilitätsanalysen geht ein Geometrieparameter ein; es müssen also festigkeitsmechanisch repräsentative Prüfkörper untersucht werden.

Hierbei ist es notwendig, daß der Prüfkörperdurchmesser wenigstens in derselben Größenordnung liegt wie der Bohrlochdurchmesser.

Diese geometrische Grundvoraussetzung ist bei bisher veröffentlichten Versuchsergebnissen nicht gegeben: Festigkeitsmechanische Parameter unter den Temperatur- und Druckbedingungen der Oberkruste wurden an relativ kleinen Prüfkörpern mit Durchmessern $d = 15 \text{ mm}$ bis $d = 30 \text{ mm}$ bestimmt. Ein derart kleiner "Betrachtungsbereich Prüfkörper" verbietet eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf den größeren "Betrachtungsbereich Bohrloch".

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 108 "Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre" wurde in den vergangenen Jahren eine Triaxialprüfzelle entwickelt und gebaut, in der Prüfzylinder mit Durchmessern bis maximal 120 mm bis zu Temperaturen von 300° C aufgeheizt und dann festigkeitsmechanisch untersucht werden können.

So soll gewährleistet werden, daß festigkeitsmechanische Parameter bei Berechnungen zur Bohrlochstandsicherheit eingesetzt werden können, ohne daß Einschränkungen auf Grund nicht vergleichbarer Betrachtungsbereiche gemacht werden müssen.

3. KURZBESCHREIBUNG VON VERSUCHSANLAGE UND VERSUCHSABLAUF

Die Manteldruckzelle mit Axialkolben besteht aus wärmebeständigem, hochfestem Stahl. Als Dichtungselemente kommen O-Ringe aus Graphit und aus einem speziell entwickelten Elastomer-Compound-Werkstoff zum Einsatz. Die Manteldruckzelle ist auf einen Gebrauchsdruck von 70 MPa bei 300⁰ C ausgelegt.

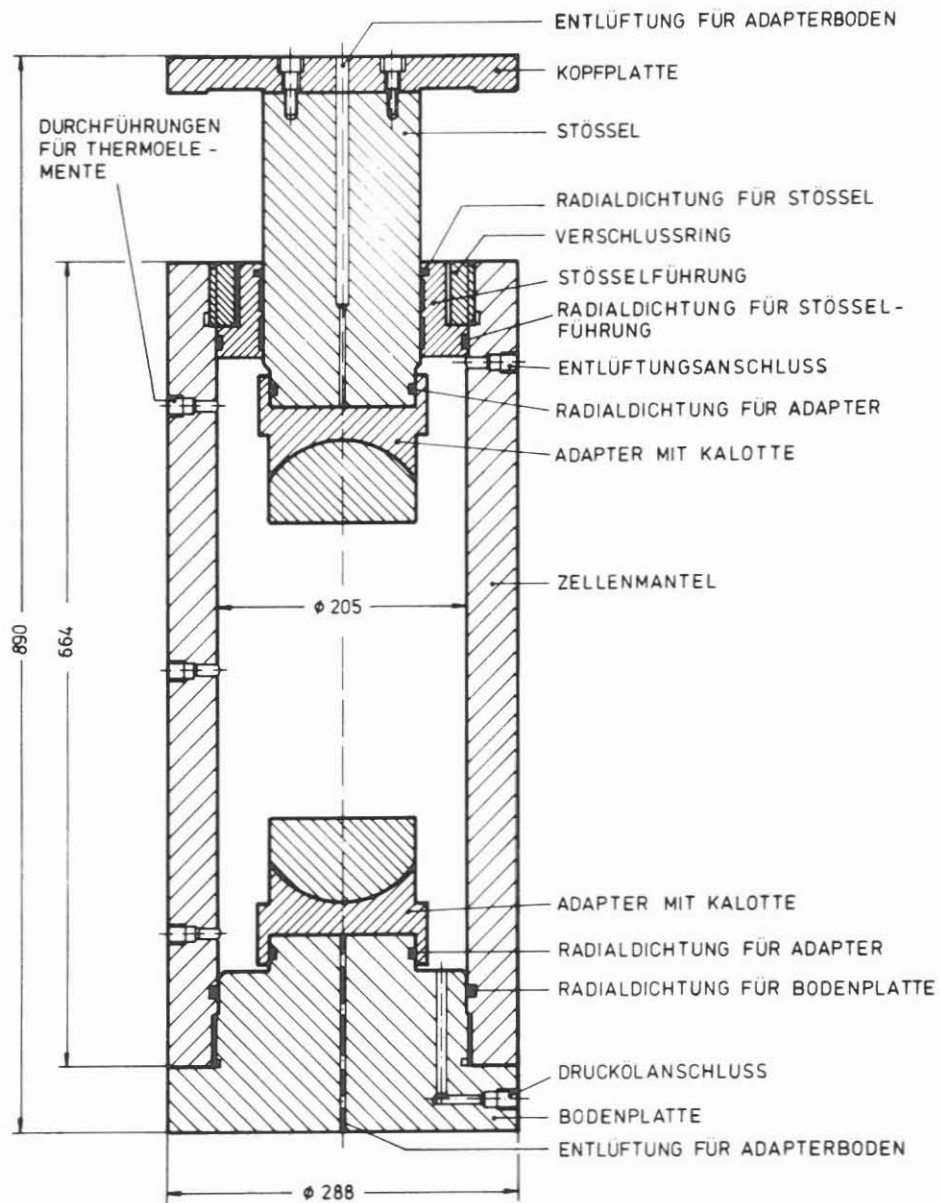


Abb. 2: Schnittzeichnung der Manteldruckzelle

Verschieden große, obere und untere mit Kugelkalotten versehene Adapterstücke gestatten wahlweise den Einbau von zylindrischen Prüfkörpern mit Durchmessern von 50 mm bis 120 mm.

Die Manteldruckzelle wird mit drei elektrischen Heizbändern beheizt, die auf den Zylindermantel aufgespannt sind. Die Temperatur wird in drei Ebenen gemessen, geregelt und auf $\pm 1^{\circ}$ C konstant gehalten. Die Probe wird für den Triaxialversuch mit einer elastischen, temperaturbeständigen Probenhülle aus einem stabilisierten Silikonkautschuk umgeben.

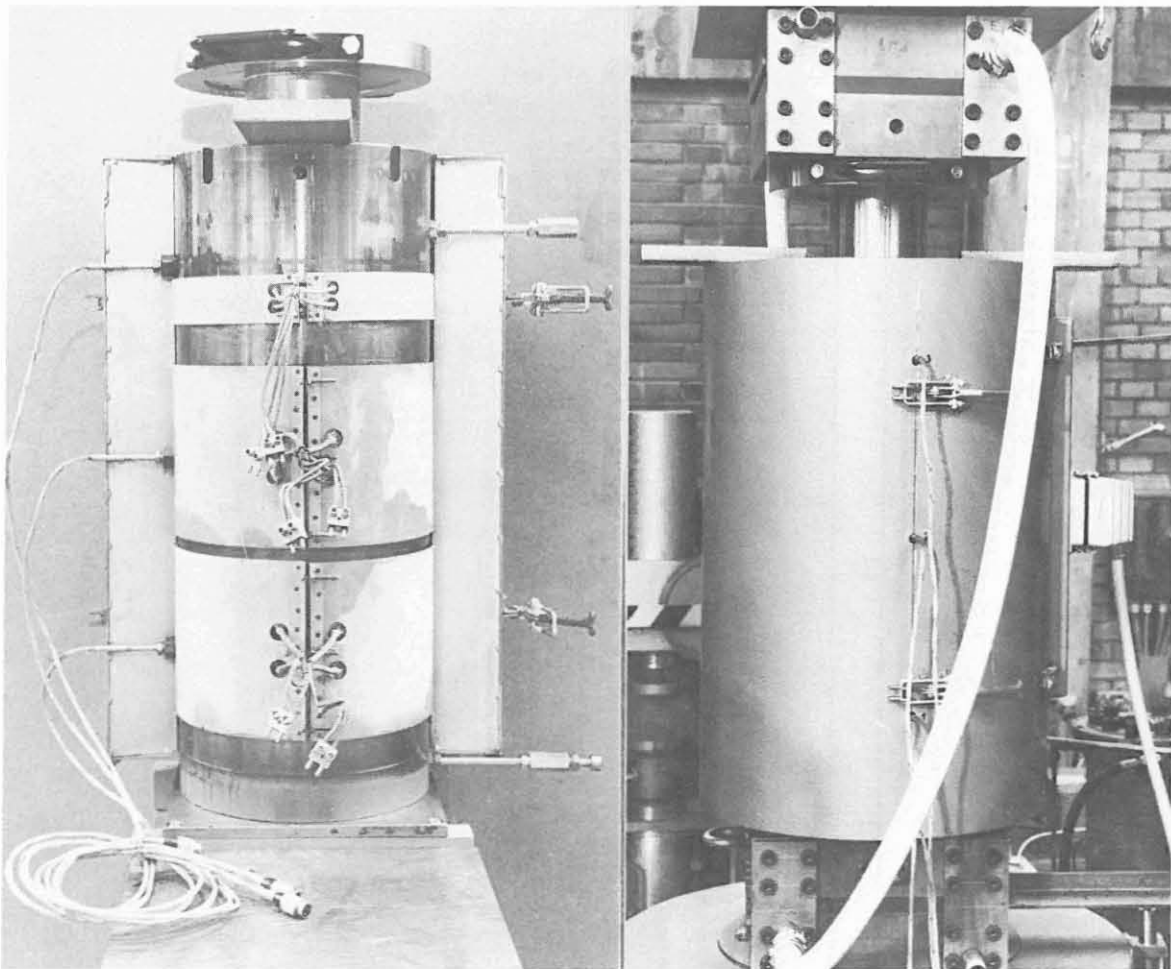


Abb. 3: Manteldruckzelle mit Isoliermantel (offen, geschlossen)

Nach dem Probeneinbau wird die Manteldruckzelle mit einem zweiteiligen Isoliermantel umgeben.

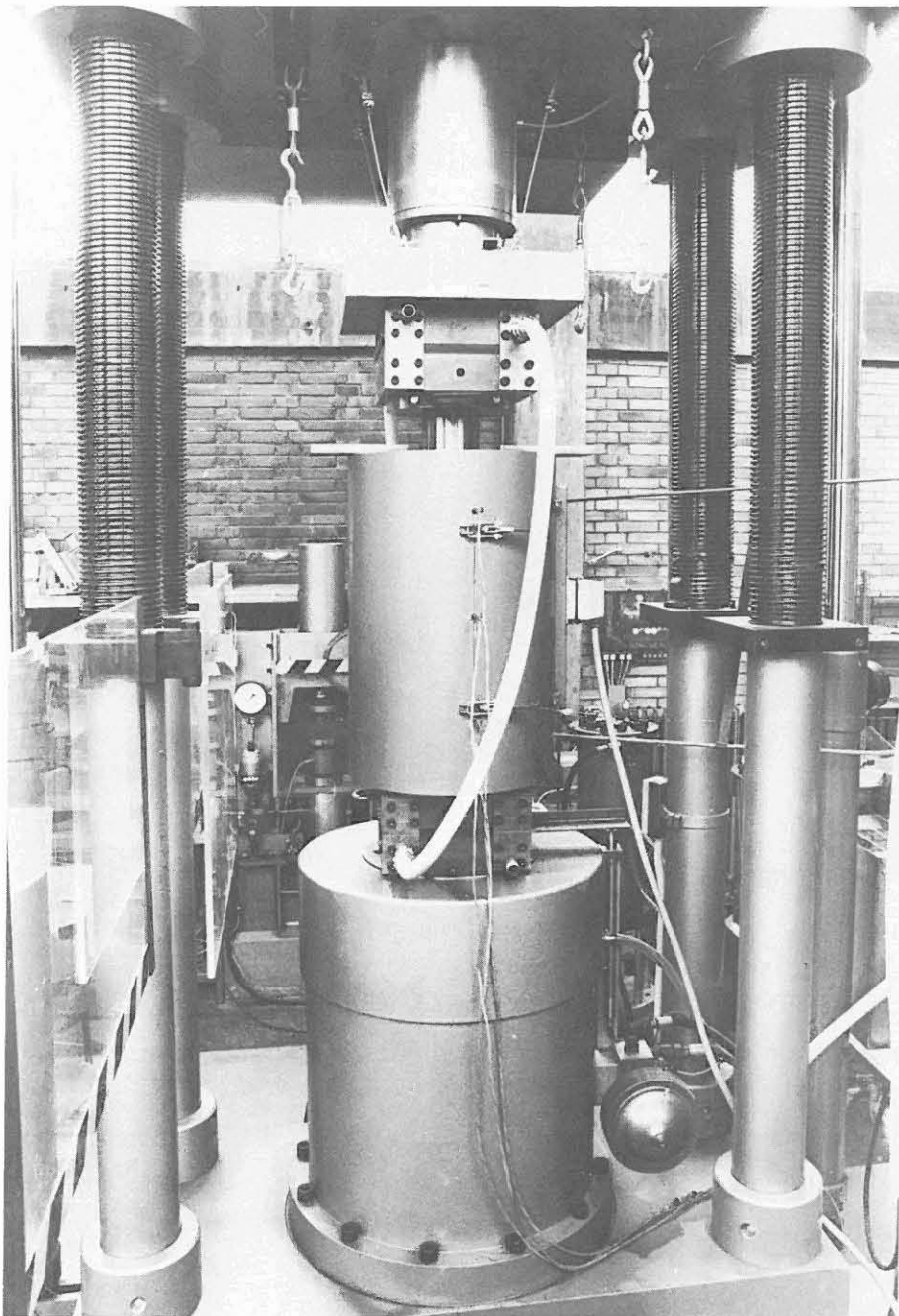


Abb. 4: Gesamtansicht der Manteldruckzelle in der Prüfmaschine

Die Manteldruckzelle wird zwischen die beiden wassergekühlten Druckplatten einer servohydraulischen 5 MN-Prüfmaschine eingebaut und mit den hydraulischen und elektrischen Versorgungsleitungen sowie den Regeleinheiten verbunden.

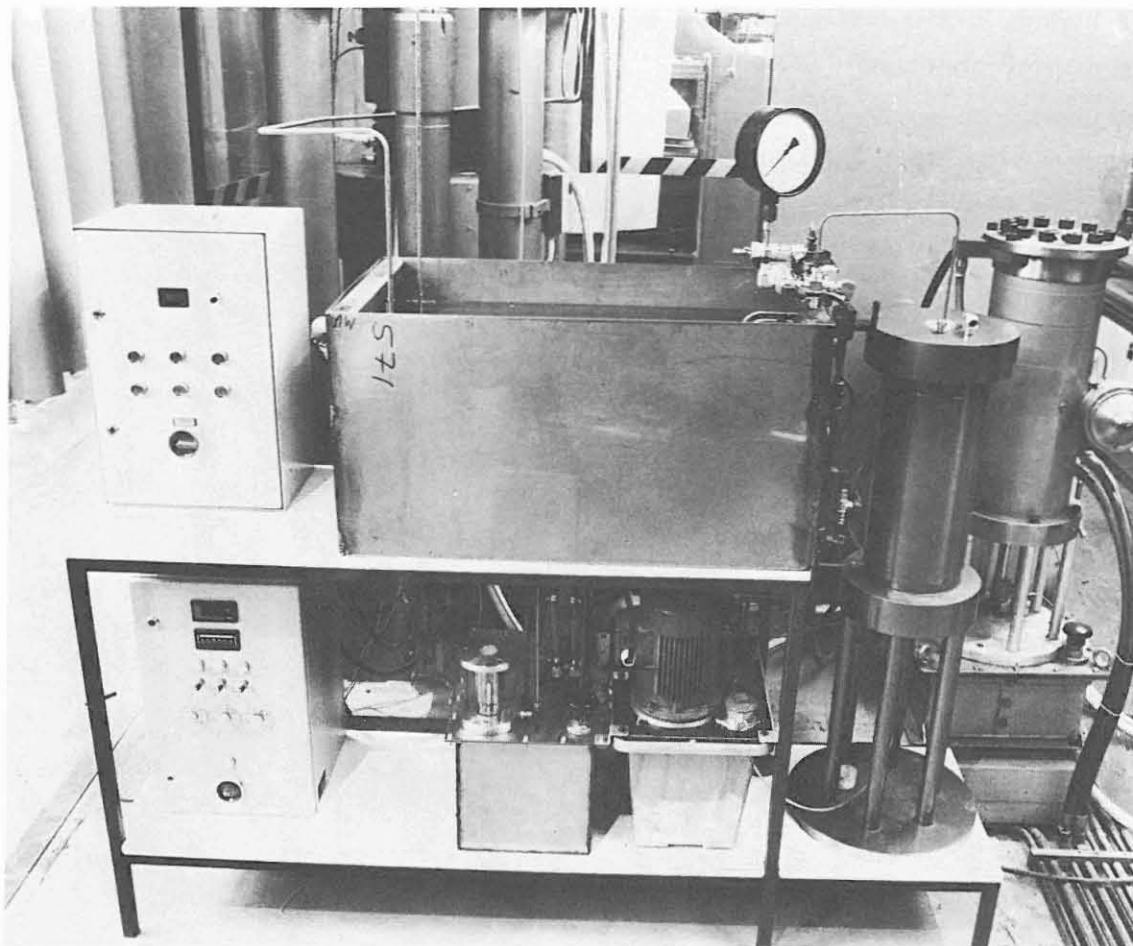


Abb. 5: Peripheriegeräte der Prüfmaschine

Auf technische Details der Anlage (vergl. LEMPP u. NATAU, 1986) soll hier nicht im einzelnen eingegangen werden, nur zwei Punkte seien erwähnt:

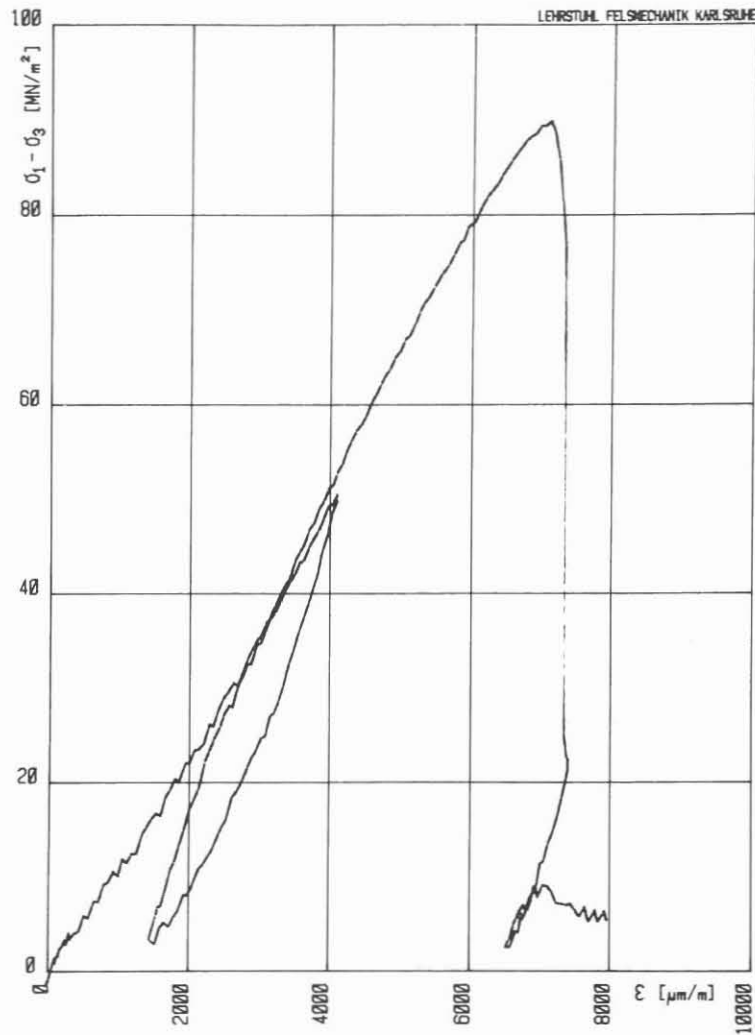
- Zur Übertragung von Druck und Temperatur wird eine Wärmeleitflüssigkeit verwendet, die auf Silikonölbasis hergestellt ist und die eine sehr große Temperaturstabilität besitzt. Ein Austausch des Drucköls ist praktisch nicht erforderlich.
- Die Erprobung geeigneter temperaturfester Dichtungselemente für die Manteldruckzelle war vor allem im Temperaturbereich über 200°C mit zahlreichen Rückschlägen verbunden. Das jetzt eingesetzte System ist bis ca. 310°C erprobt; bestimmte Dichtungen müssen dabei allerdings nach jedem Versuch erneuert werden.

Die Triaxialversuche laufen in der Regel so ab, daß die Prüfkörper zunächst unter einem hohen hydrostatischen Druck (65 bis 70 MPa) langsam mit ca. 1° C Temperaturänderung pro Minute auf die gewünschte Versuchstemperatur aufgeheizt werden. Auf diese Weise sollen thermische Rißbildungen weitgehend vermieden werden (vergl. RICHTER und SIMMONS 1974).

Erst wenn die Probe erwärmt ist, wird der im Versuch gewünschte Seitendruck eingestellt; er wird in einem eigenen hydraulischen Regelkreis während des Versuches konstant gehalten.

Die Axialbelastung durch den beweglichen Kolben erfolgt über den servohydraulischen Regelkreis der Prüfmaschine, wobei ein konstanter, wählbarer Vorschub vorgegeben wird (Wegregelung). Die Axialstauchung wird mit induktiven Weggebern bisher noch außen am Kolben gemessen. Versuchssteuerung und Meßwerterfassung erfolgen über einen Prozeßrechner.

In der Regel wird das Versuchsergebnis in einem Spannungs-Verformungs-Diagramm dargestellt.



HT-TRIAXIALVERSUCH: H3T20P30

Kolben-Vorschub: 0,100 mm/min

Zelldruck: 301,0 bar Zelltemperatur: 200 °C

Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 89,87 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 122,3 mm D = 70,4 mm H/D = 1,74

Abb. 6: Beispiel einer Spannungs-Stauchungs-Linie im Triaxialversuch

Es wird angestrebt, die Proben zunächst in einem Zyklus zu be- und entlasten und anschließend bis zum Bruchpunkt und weiter darüber hinaus zu fahren. Bei den weggesteuerten Versuchen erfolgte nach dem Bruch meist ein sehr steiler Spannungsabfall. Dieses Entfestigungsverhalten wurde bei den untersuchten Granitproben regelmäßig festgestellt.

4. VERSUCHSERGEBNISSE

Zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Festigkeitseigenschaften wurden Versuchsreihen an zwei Varietäten eines mittelkörnigen Zweiglimmer-Granites aus dem Nordschwarzwald (Forbach-Granit) durchgeführt. Zum einen wurde eine praktisch unverwitterte Varietät mit einer einaxialen Druckfestigkeit von ca. 130 MPa und geringer Porosität von ca. 0,25% untersucht, zum anderen wurde eine umgewandelte Varietät mit einer einaxialen Druckfestigkeit von ca. 60 MPa und einer Porosität von fast 1,6% als Vergleich herangezogen. Solche älterierten Granite kommen auch in tieferen Krustenbereichen vor (z.B. Nagra-Bohrung in Böttstein), sie stehen zur Diskussion als Gesteine der seismischen Niedriggeschwindigkeitskanäle mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit (vergl. Ergebnisse der KTB-Vorerkundungsarbeiten, Lokation Schwarzwald; 2. KTB-Kolloquium, Seeheim/Odw.).

Diese Versuchsreihe wurde mit Prüfzylindern von 70 mm Durchmesser ausgeführt; die Vorschubgeschwindigkeit des Pressenkolbens betrug in den folgenden Versuchen 0,1 mm/min.

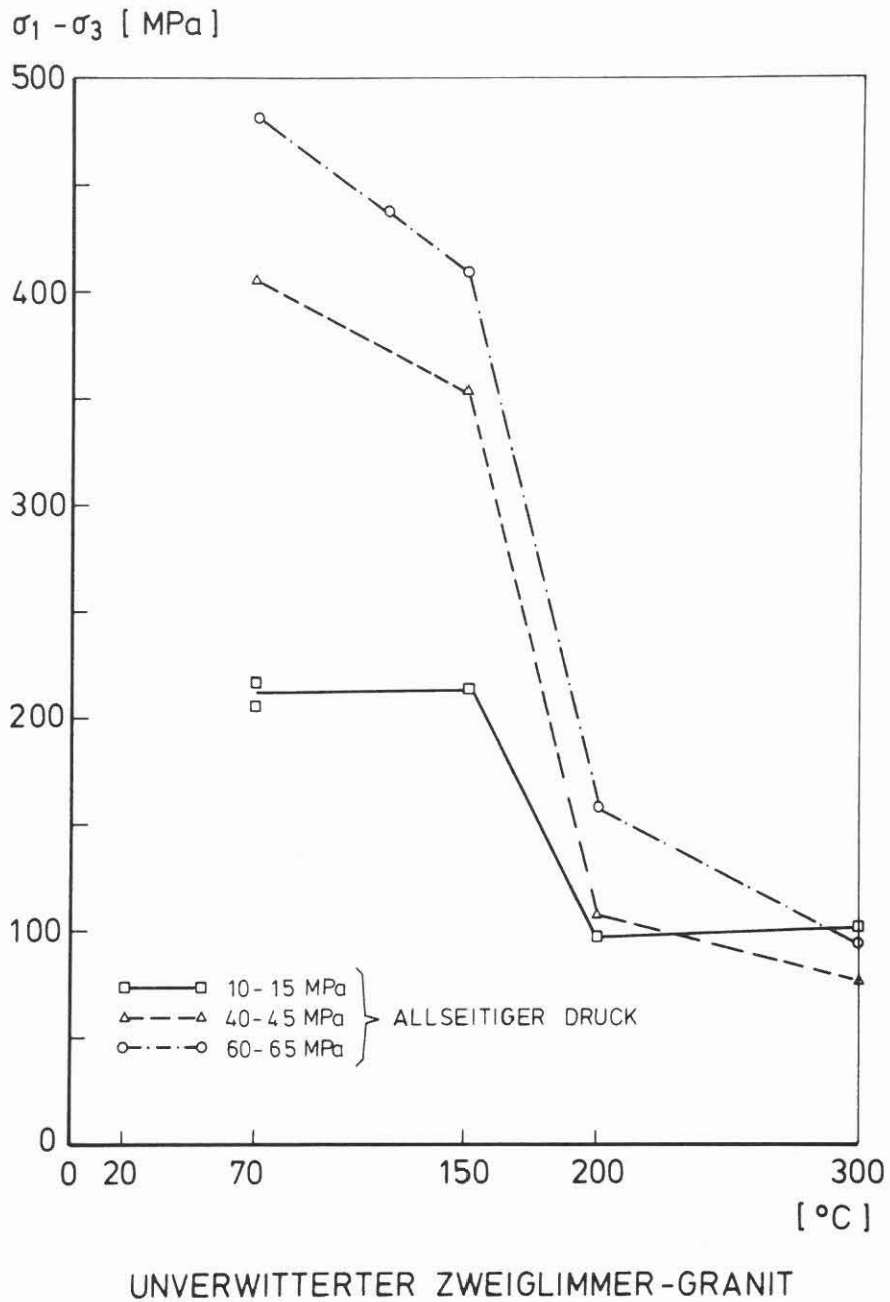
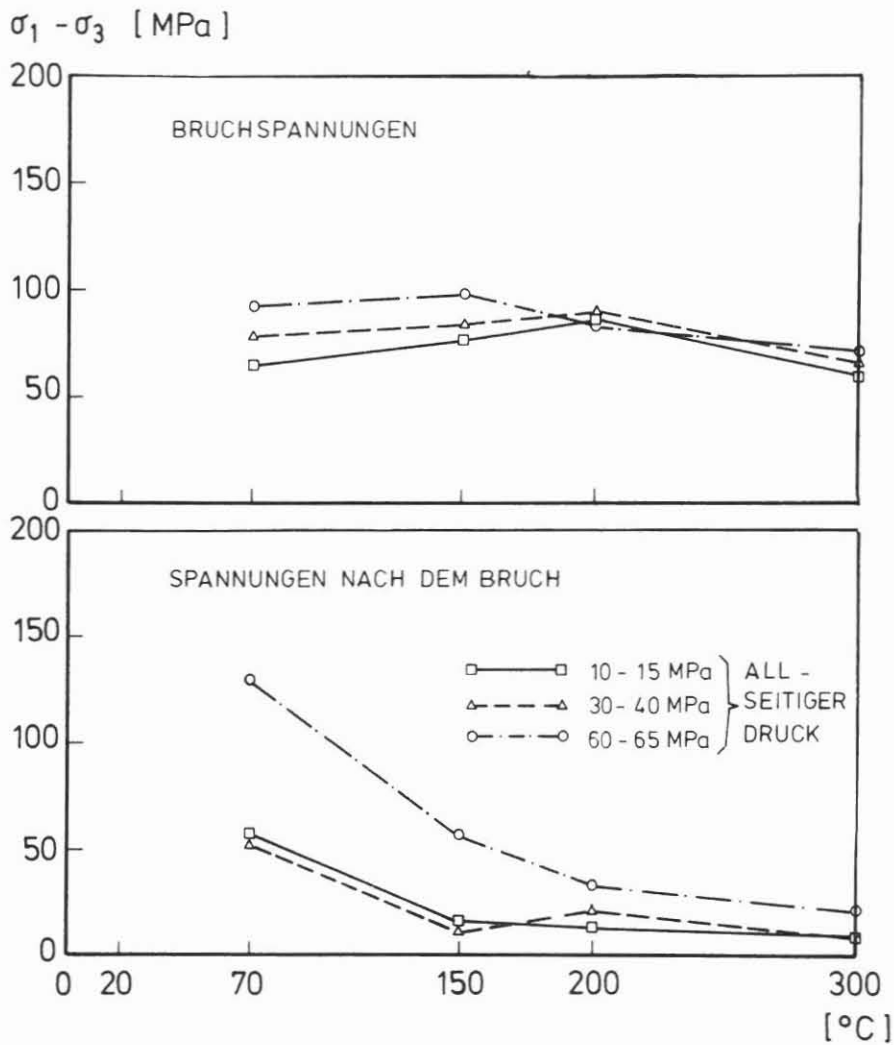


Abb. 7: $(\sigma_1 - \sigma_3)$ /Temperatur-Diagramm: Unverwitterte Granite

Von Interesse ist zunächst die bis zum Bruch aufnehmbare Deviatorspannung $(\sigma_1 - \sigma_3)$ in Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 7). Bei geringen Temperaturen besteht bei unverwittertem Granit erwartungsgemäß eine deutliche Ab-

hängigkeit der Bruchspannung vom Seitendruck. Mit Anstieg der Temperatur, vor allem zwischen 150⁰ C und 200⁰ C vermindert sich die Seitendruckabhängigkeit ebenso wie das Bruchspannungsniveau. Bei 300⁰ C ist praktisch keine Seitendruckabhängigkeit mehr gegeben; die aufnehmbare Deviatorspannung hat sich drastisch reduziert. Der Reibungswinkel geht also mit der Temperatur deutlich zurück, ebenso die Festigkeit. Diese ersten Ergebnisse sind allerdings durch weitere Versuche zu verifizieren.



UMGEWANDELTEN ZWEIGLIMMER - GRANIT

Abb. 8: $(\sigma_1 - \sigma_3)$ /Temperaturdiagramm: Umgewandelter Granit

Die maximalen Deviatorspannungen bei alterniertem Granit (Abb. 8) liegen erwartungsgemäß niedriger, die deutlich weniger ausgeprägte Seitendruckabhängigkeit, d.h. die allgemein sehr geringen Reibungswinkel sind allerdings auffällig. Entsprechend wirkt sich die Temperaturerhöhung weniger stark aus als bei unverwittertem Granit. Bei Temperaturen von 200⁰ C bis 300⁰ C ist die Seitendruckabhängigkeit dann ganz stark reduziert. Die maximalen Deviatorspannungen fallen bei Anstieg der Temperatur bis 300⁰ C zwar ab, die relativ höheren Bruchspannungen bei 150⁰ C bis 200⁰ C sind allerdings noch mit Fragezeichen zu sehen, weil natürliche Streuungen der Probenqualität weiterhin noch eine Rolle spielen können.

Im post-failure-Bereich zeigt sich bei alteriertem Granit eine deutliche Seitendruckabhängigkeit der Restfestigkeit. Bei geringen und mittleren Drücken verändert sich die Restscherfestigkeit weniger stark mit der Temperatur, wogegen bei hohen Drücken (hier 60 bis 65 MPa) eine deutliche Temperaturabhängigkeit zu sehen ist. Bei der 70⁰ C warmen Probe steigt die Deviatorspannung sogar bei weiterer Verformung über den Bruchspannungswert an, es tritt also eine Wiederverfestigung ein. Bei steigenden Temperaturen fällt die Restfestigkeit jedoch auch unter hohem Druck weiter ab.

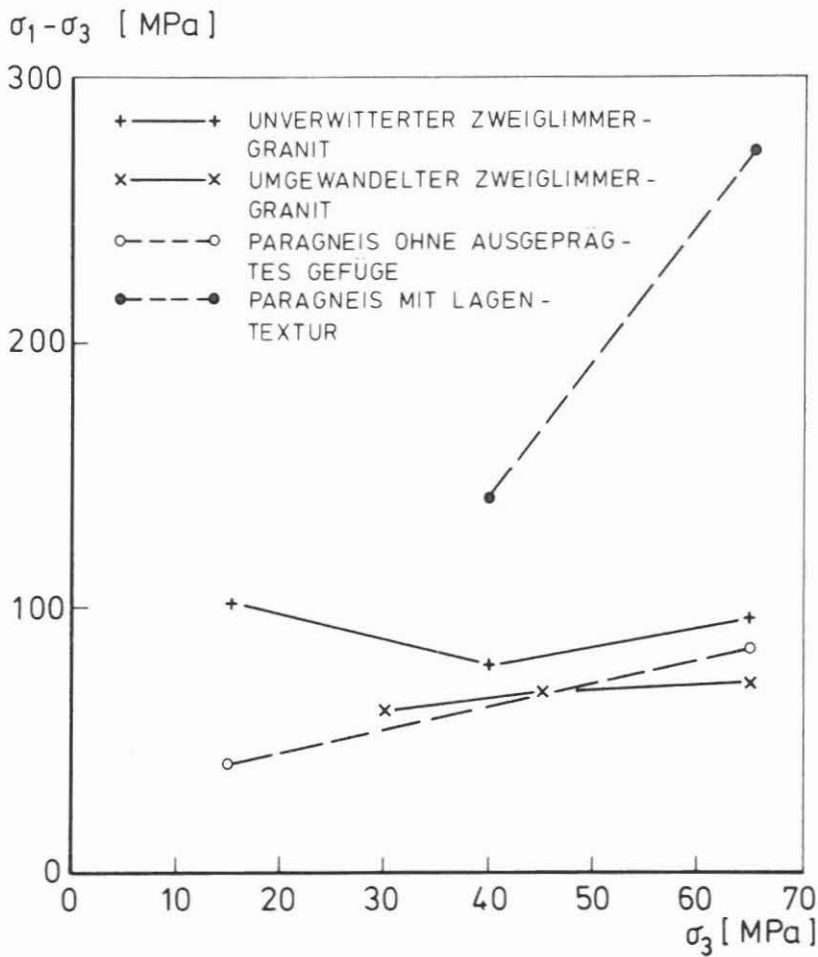


Abb. 9: $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3$ -Kurven verschiedener Gesteine bei 300° C

Bei Temperaturen von 300° C ist bei unverwitterten und bei umgewandelten Graniten eine nur noch wenig ausgeprägte Druckabhängigkeit der Deviatorbruchspannung zu erkennen. Versuchsergebnisse von mehr oder weniger lagentexturierten Paragneisen zeigen demgegenüber teilweise noch eine starke Druckabhängigkeit (Abb. 9). Diese Einzelergebnisse können zunächst nur als Hinweis auf wesentliche Unterschiede im mechanischen Verhalten zwischen den unterschiedlichen Gesteinstypen gewertet werden.

Solche Unterschiede kommen auch in den verschiedenen Bruchmoden dieser Gesteine zum Ausdruck (vgl. Abb. 10 und Abb. 11).

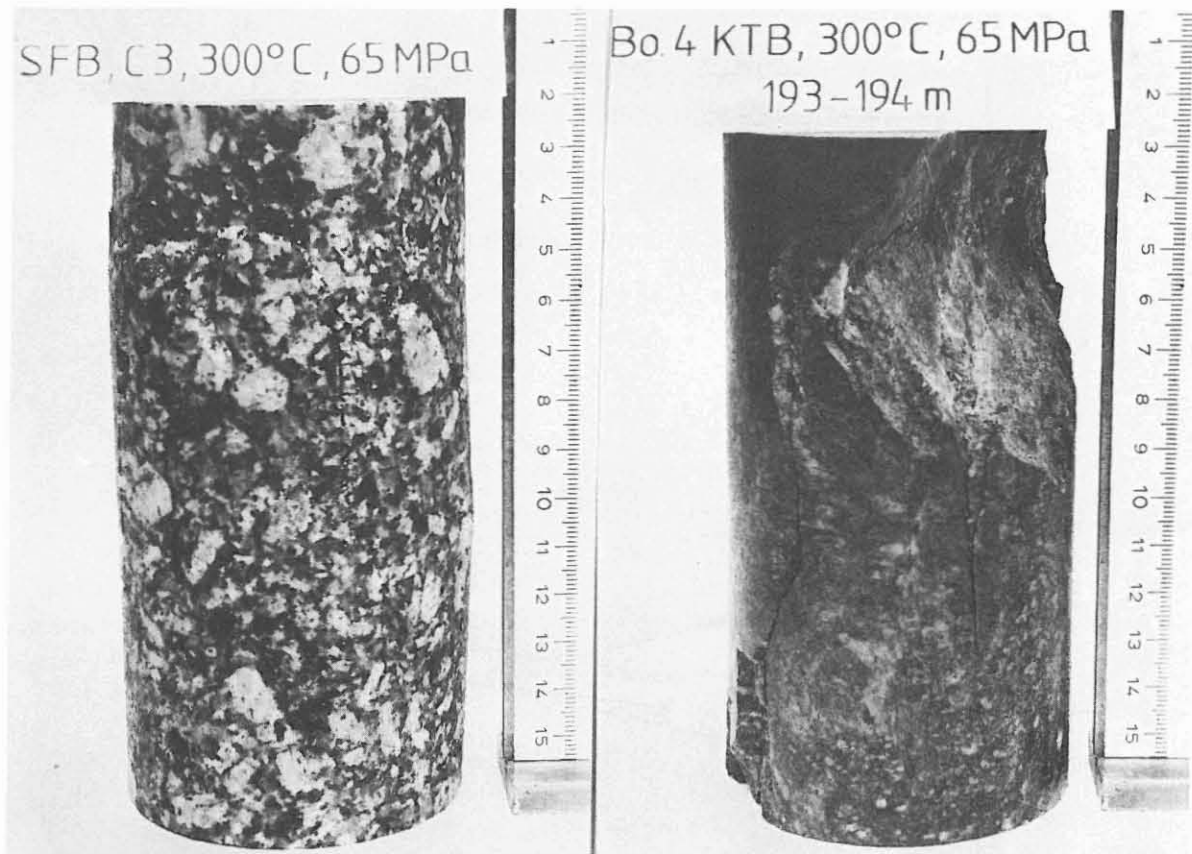


Abb. 10: Granitprobe mit Bruchmodus
"axial splitting"

Abb. 11: Paragneisprobe mit Bruchmodus
"durchgehende Scherfugen"
ohne Einfluß der Lagentextur

Von großer Bedeutung für die Verformungen bis zum Versagen der Prüfkörper ist allerdings auch die im Versuch gewählte Belastungsgeschwindigkeit. Dies zeigt eine Versuchsreihe mit unverwitterten Granitproben bei 300⁰ C unter 65 MPa Seitendruck (Abb. 12 und Abb. 13).

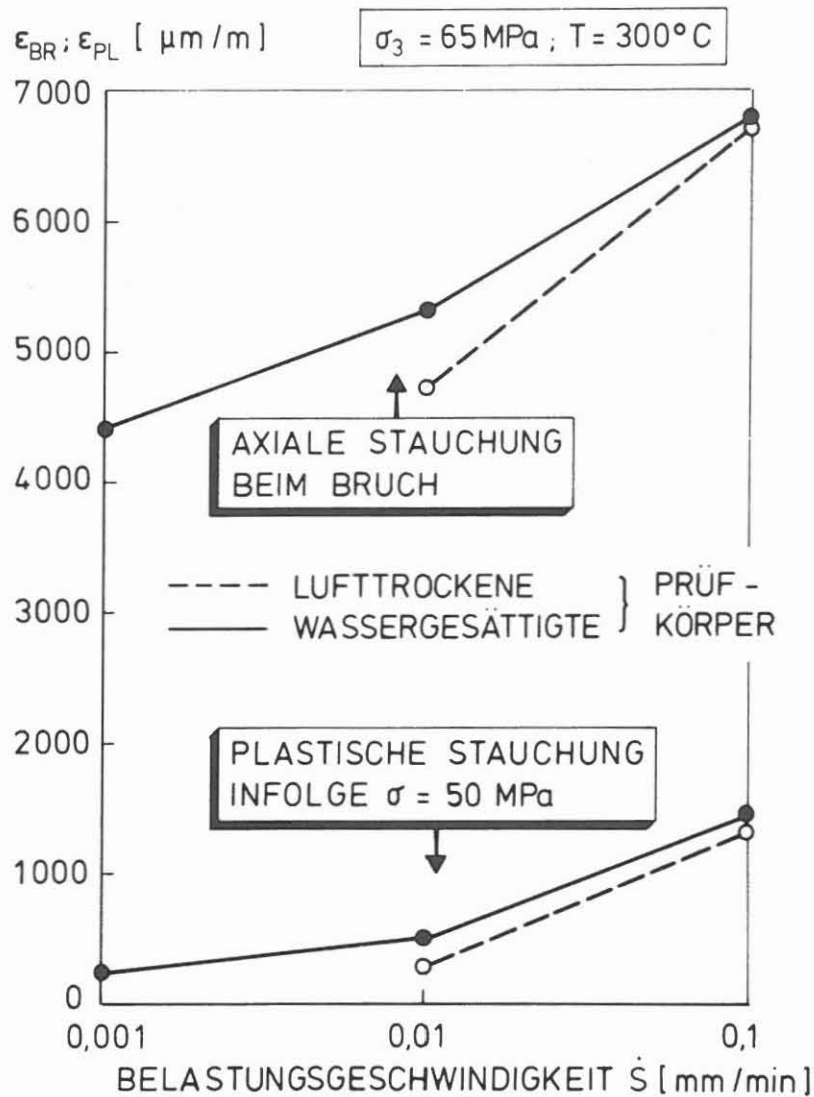


Abb. 12: Verformungen (Axiale Stauchung beim Bruch ϵ_{BR} , plastische Stauchung infolge $\sigma = 50 \text{ MPa}$ ϵ_{PL}) bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten

Sowohl die plastischen Axialstauchungen als auch die Bruchstauchungen sind von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Mit zunehmender Geschwindigkeit vergrößern sich beide Meßwerte, die Verformungs- und Elastizitätsmoduli werden dagegen reduziert.

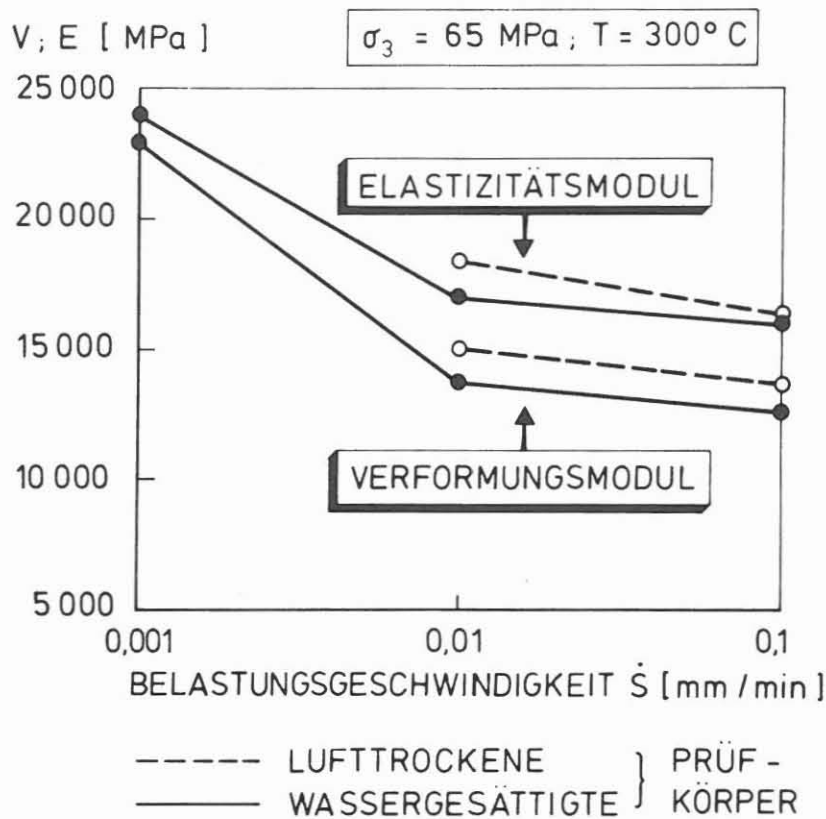


Abb. 13: Verformungseigenschaften in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten

Dieser ermittelte Zusammenhang zwischen Verformungseigenschaften und Belastungsgeschwindigkeit ist offenbar bei den unverwitterten Graniten dem Verhalten bei monokristallinem Steinsalz entgegengesetzt. Bei Salz vermindern sich bleibende Verformungen und Bruchstauchungen mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit und die Moduli steigen an. Dies haben Versuche an unserem Lehrstuhl ergeben. Das zeitabhängige Verformungsverhalten der Granite muß demzufolge anders modelliert werden.

Kriechversuche an Graniten bei erhöhten Temperaturen können dazu einige Hinweise geben (Abb. 14).

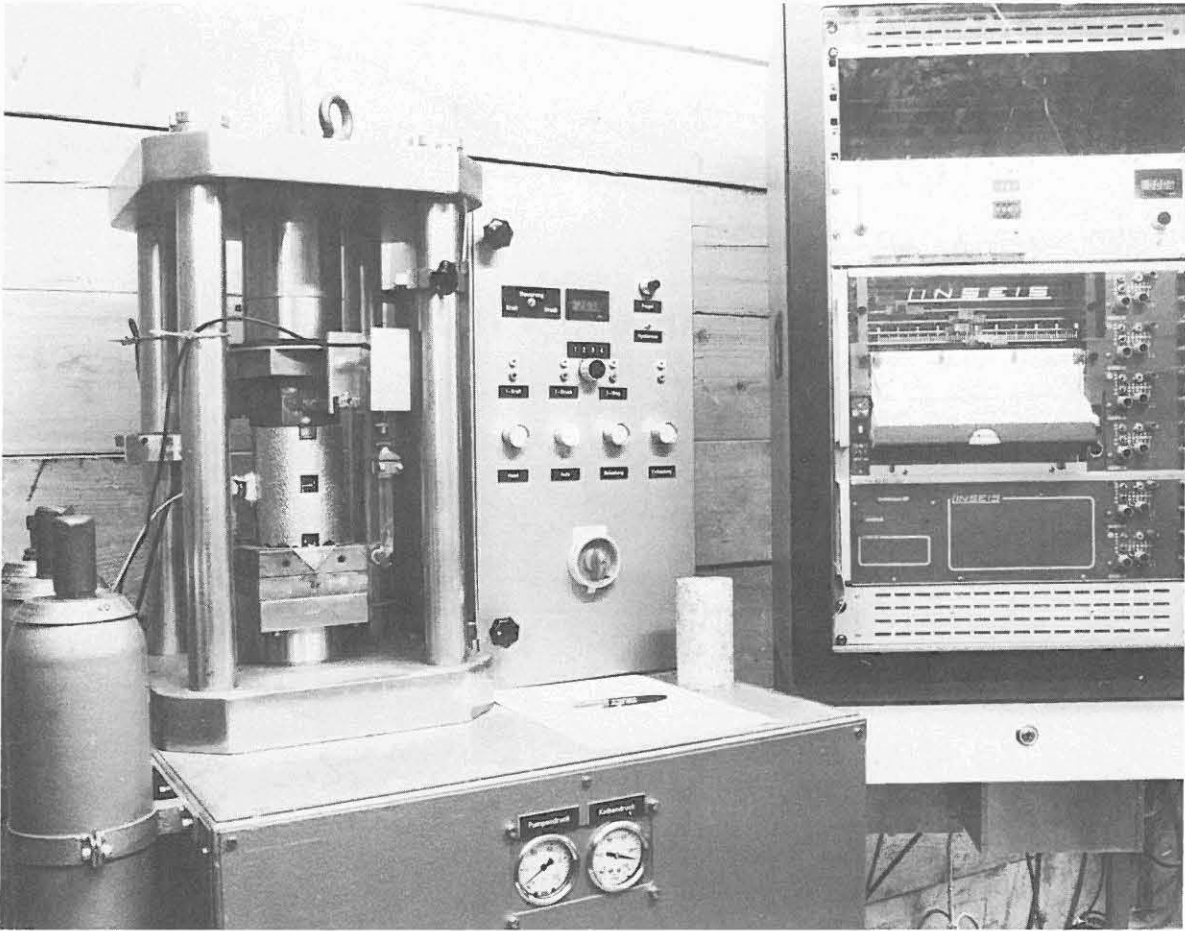


Abb. 14: Kriechversuchsstand für geheizte einaxiale Kriechversuche

Die Kurven der bleibenden Axialstauchung, bezogen auf die als elastisch angenommene Anfangsverformung zeigen im halblogarithmischen Zeit-Verformungsdiagramm einen diskontinuierlichen Verlauf. In unregelmäßigen Zeitabständen kommt es zu sprungartigen Verformungen.

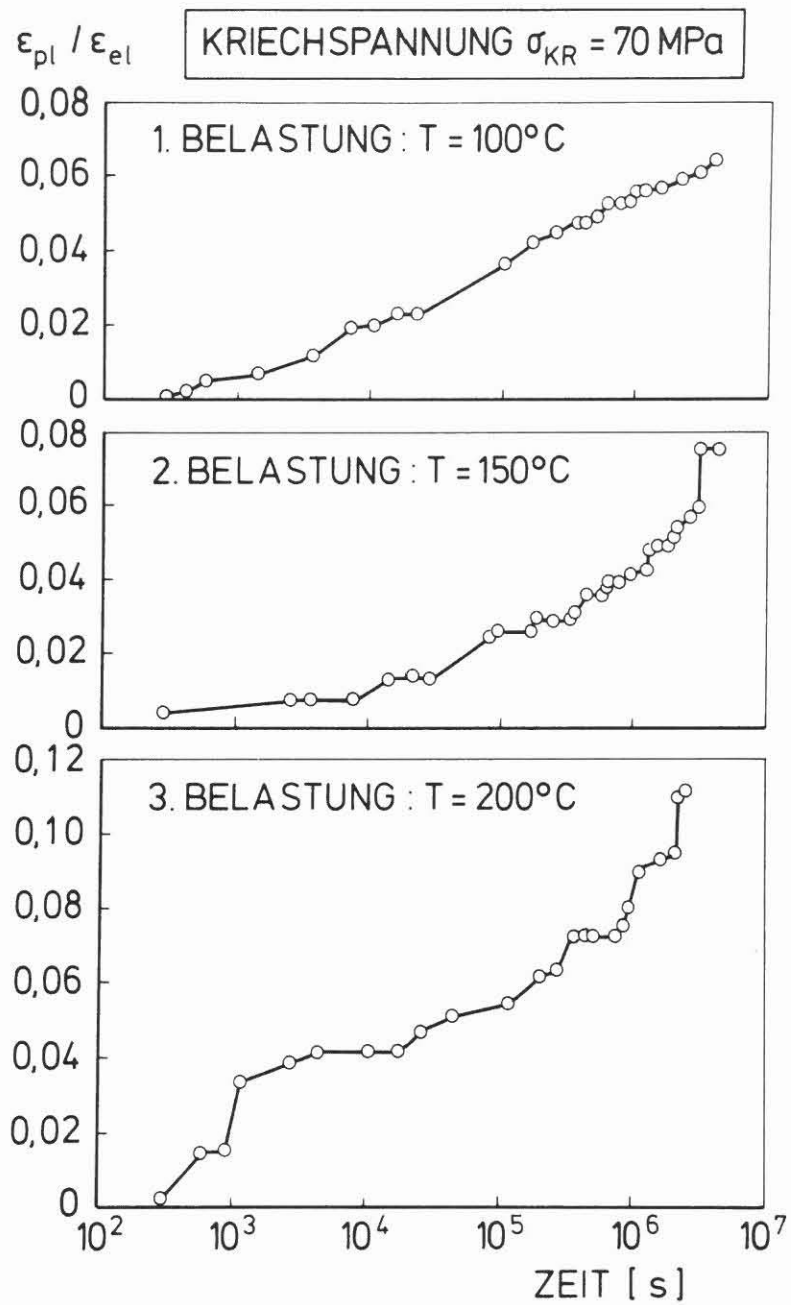


Abb. 15: Zeit-Verformungsdiagramm mit dreimaliger Belastung von Graniten bei 100° C, 150° C und 200° C

Besonders bei höheren Temperaturen deutet sich dabei eine Beschleunigung dieser Verformungen mit der Zeit an (Abb. 15).

Die über mehrere Wochen laufenden Kriechversuche ergeben eine bleibende Verformung in der Größenordnung von 5% bis 15% der elastischen Verformung. Dabei treten auch zwischen gleichartig erscheinenden Probekörpern meßbare Unterschiede im Kriechverhalten auf, die noch nicht erklärt werden können.

Die zeitabhängigen Verformungen hängen vom Spannungsniveau, von der Temperatur und von der Probenvorgeschichte ab.

Die unregelmäßigen Kriechgeschwindigkeiten machen die Herleitung von Kriechgesetzen sehr problematisch. Es ist zu berücksichtigen, daß, abweichend von einer mittleren Verformungsgeschwindigkeit (mit Größenordnungen um $0,15$ bis $0,5 \cdot 10^{-6}/\text{sec}$) bei jedem Versuch in unregelmäßiger Folge kurzzeitig vielfach höhere Verformungsgeschwindigkeiten beobachtet werden. Die Bewegungen laufen sprungartig ab.

Von vorrangiger Bedeutung bei allen Verformungen ist sicher das Mikrorißsystem und dessen Veränderungen unter Druck und Temperatureinfluß.

5. DISKUSSION EINER MODELLVORSTELLUNG ZUM FESTIGKEITSMECHANISCHEN VERHALTEN

Von grundsätzlicher Bedeutung scheint das zeitabhängige Materialverhalten der Granite zu sein. Bei relativ langsamer Belastung mit Verformungsraten in der Größenordnung bis ca. $0,15 \cdot 10^{-6}/\text{sec}$ müssen sich die Mikrorisse nicht wesentlich vergrößern, das Korngerüst überträgt die Spannungen sehr gleichmäßig, es kommt innerhalb des Korngerüsts zu Spannungsumlagerungen und zum Abbau von gefügebedingten Spannungsspitzen. Diese Vorgänge sind auf Kriechbewegungen und Spannungsrelaxation zurückzuführen. Weitgehend bruchlose Kriechverformungen werden unter den erhöhten Temperaturen um 300°C bei diesen geringen, versuchstechnisch noch realisierbaren Verformungsgeschwindigkeiten von $0,12 \cdot 10^{-6}/\text{sec}$ möglich, das Mikrorißsystem bleibt dabei weitgehend unverändert.

Bei rascher Belastung mit Verformungsraten in der Größenordnung von 1,2 bis $12 \cdot 10^{-6}/\text{sec}$ kommt es demgegenüber nicht zum Abbau der gefügebedingten Spannungsspitzen, die Belastung überträgt sich wesentlich unregelmäßiger, so daß an hochbelasteten Stellen im Mineralkornverband Mikrorisse neu gebildet werden. Infolge der höheren Mikrorißdichte sind bei schneller Belastung der Elastizitätsmodul geringer sowie die bleibende Verformung und die Bruchverformung größer.

Das Kriech- und Relaxationsvermögen des polykristallinen Mineralkorngefüges ist selbst bei den erhöhten Temperaturen bis 300°C noch nicht so ausgeprägt, daß die Mikrorißbildung bei diesen relativ höheren Verformungsraten unterbleibt, Erst bei deutlich geringerer Verformungsgeschwindigkeit von $0,12 \cdot 10^{-6}/\text{sec}$ wird Mikrorißbildung wenigstens teilweise infolge von Kriechbewegungen und Spannungsrelaxation kompensiert, weil Verformungsgeschwindigkeit und Kriechgeschwindigkeit in derselben Größenordnung liegen. Von wesentlicher Bedeutung ist also die Geschwindigkeit, mit der Spannungsänderungen bei der erhöhten Temperatur herbeigeführt werden.

Wegen der offenbar stark reduzierten Reibungswinkel wird unter den Temperaturbedingungen in 10 km Tiefe die Materialfestigkeit von entscheidendem Einfluß sein. Diese steht aber direkt im Zusammenhang mit der geschwindig-

keitsabhängigen Mikrorißbildung. Dementsprechend wird ein langsamer Bohrvorschub aus dieser Sicht von Vorteil sein, weil die Mikrorißbildung oder -erweiterung minimiert und die Möglichkeiten der Entfestigung beschränkt werden.

6. LITERATUR

CHO, T.F. UND HAIMSON, B.C. (1987): Effect of cyclic loading on circular openings - Results of laboratory simulation.

28th Symp. on Rock Mechanics/Tuscon, A. (USA), 805-812.

ISRM-COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS (1983): Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. Revised Version.

Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 20, No. 6, 283-290, London.

DREYER, W. (1967): Die Festigkeitseigenschaften natürlicher Gesteine, insbesondere der Salz- und Karbonatgesteine. 247 S. Gebr. Bornträger, Berlin.

LEMPP, CH. und NATAU, O. (1986): Festigkeitsverhalten von kristallinen Gesteinen unter hohen Drücken und Temperaturen.

Sonderforschungsbereich 108, Universität Karlsruhe, Berichtsband 1984-1986, 233-278.

MELLEGARD, K.D., SENSENY, P.E., HANSEN, F.D. (1983): Quasi static strength and creep characteristics of 100 mm-diameter specimens of salt from Avery Island, Louisiana.

Tech. Rep. ONWI 250, Rapid City, SD (USA).

MÜHLHAUS, H.-B., VARDOULAKIS, I. (1986): Axially-symmetric buckling of the surface of a laminated half space with bending stiffness.

Mech. of Materials, Vol. 5, 109-120, Amsterdam.

MÜLLER, L. (1963): Der Felsbau, 1. Band.

624 S., Enke Verlag, Stuttgart.

NATAU, O., FRÖHLICH, B. und MUTSCHLER, TH. (1983): Recent development of a large scale triaxial test.

Proc. 5th ISRM Conference, Section A, 65-74, Melbourne, Australia.

RICHTER, D., SIMMONS, G. (1974): Thermal expansion behaviour of igneous rocks.

Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 11, 403-411, London.