

Standfestigkeitsanalyse
der kontinentalen Tiefbohrung
als geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgabe

G. Borm

STANDFESTIGKEITSANALYSE DER KONTINENTALEN TIEFBOHRUNG ALS GEOWISSENSCHAFTLICHE GEMEINSCHAFTSAUFGABE *

Von

G. BORM, Karlsruhe

1. EINFÜHRUNG

Die extrem hohen Drücke und Temperaturen in der tieferen Erdkruste bewirken zusammen mit den dort hochgespannten wässrigen Lösungen, daß selbst die härtesten Gesteine fließfähig und brüchig werden. Die Fluide dringen in Risse, Spalten und Poren ein und formen eine Zone verminderter Materialdichte und -festigkeit. Die Kontinentale Tiefbohrung soll diesen Bereich durchdringen und ohne Verrohrung dauerhaft standsicher sein. Die Bohrlochstabilität ist daher ein zentrales Problem sowohl für die Bohrtechnik als auch für die Durchführung der beabsichtigten in-situ-Meß- und Testprogramme. Sie betrifft vor allem die Verformungen und die Spannungsumlagerungen am Bohrlochrand, wo das Gebirge am stärksten den thermo- und hydromechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt ist.

Die Standsicherheit des offenen Bohrloches hängt von der Gesteinsfestigkeit, der mechanischen Beanspruchung, den Stützmaßnahmen und der Zeit ab. Mit der Zeit ermüdet das Material und verliert an Festigkeit; gleichzeitig relaxieren die deviatorischen Spannungen und entlasten die Bohrlochwand. Die Gebirgsspannungen lagern sich während und nach den Bohrarbeiten um, führen zu Verformungen des Gesteins und damit zu Konvergenzen des Bohrlochquerschnittes; bei Überlastung stellen sich unerwünschte Mehrausbrüche ein.

Die Bohrlochrandausbrüche entstehen je nach Magnitudenverhältnis der horizontalen äußeren Spannungen in zwei diametral gegenüberliegenden Zonen an der Bohrlochwand in Richtung der kleinsten horizontalen Primärspannung oder aber kleeblattförmig mit Elongationen in den Richtungen der Hauptschubspannungen. Ausbruchstiefe und -weite wachsen zwangsläufig mit der Magnitude der horizontalen äußeren Spannungen an, wobei sich die Abplatzungen, Abschalungen und Scherbrüche ebenso wie die Konvergenzen des Bohrlochs als un stetige, zeitlich progressive Erscheinungen erweisen.

Die Beobachtungen der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bohrlochstruktur, die Analyse von Scherbrüchen, Gleitkeilen, Trennrissen, Abschalungen, Auskesselungen und hydraulischen Brüchen am Bohrlochrand sollen zusammen mit den Materialuntersuchungen zum Verformungs-, Festigkeits- und Entfestigungsverhalten unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen sowie den Spannungsmessungen und theoretischen Berechnungen wesentliche Entscheidungshilfen für einen sicheren Bohrbetrieb und Erfolg bei der Kerngewinnung geben.

* Erweiterter Vortrag zum 1.KTB-Kolloquium am 29.01.1988 in Gießen; eine ausführliche Literaturstudie zum vorliegenden Thema wird im KTB-Report 88-9 gegeben.

2. MATERIALUNTERSUCHUNGEN UND MODELLVERSUCHE

Die mitteleuropäische Schule der Felsmechanik, die besonders mit den Namen H.CLOOS, L.MÜLLER und J.STINI verknüpft ist und im praktischen Felsbau heute weltweit Anwendung findet, hat ihre Ursprünge hauptsächlich in der Baugeologie: Der Gebirgsverband mit seinem Trennflächengefüge wird als geklüftetes Diskontinuum angesehen (MÜLLER, 1960, 1963). Die amerikanische Begriffsbildung der "Rock Mechanics" hingegen, wie sie von D.T.GRIGGS, W.F.BRACE und J.HANDIN geprägt worden ist, entspricht mehr einer Materialprüfung der Gesteine nach Methoden, die in der Werkstoffkunde metallischer und nichtmetallischer Festkörper angewendet werden. Die Stabilitätsuntersuchungen zur Kontinentalen Tiefbohrung sollten nun zweckmäßigerweise beide Betrachtungsweise vereinigen, indem man eine gewisse Analogie zwischen Mineralkorn- und Klufkörperverband anerkennt (LEMPP & NATAU, 1985).

Die experimentellen Labormethoden umfassen neben den felsmechanischen Materialuntersuchungen und Modellversuchen vor allem die mineralogischen und petrographischen Untersuchungen, geophysikalischen Methoden sowie ingenieurgeologische Bohrkernaufnahmen. Die felsmechanischen Materialuntersuchungen, die im folgenden behandelt werden, dienen der Bestimmung der Verformungs- und Festigkeitsparameter des kristallinen Gesteins bei hohen Drücken und Temperaturen. Dabei spielen Maßstabeffekte eine erhebliche Rolle (BIENIAWSKI, 1967a). In prozeßrechnergesteuerten Versuchen werden kombinierte Verformungs- und Spannungspfade bis über den Bruch hinaus so simuliert, daß auch die *residuellen* Festigkeitsparameter bei progressiver Materialauflockerung und -entfestigung ermittelt werden können. Daneben haben triaxiale *Extensionsversuche* eine erhebliche Bedeutung bei den Materialuntersuchungen zur Bohrloch- und Bohrkernstabilität.

2.1 Wechsellastversuche

Die Festigkeit des kristallinen Gesteins ist eine Funktion der Temperatur, des Umgebungsdrucks, der Gesteinsart, der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit, des Fluidgehalts und des Porendrucks sowie der Mikrorißdichte, Verformung und Eigenspannung. Im Bruchspannungsniveau findet eine Gefügeauflockerung statt, die mit einer ausgeprägten Änderung der festigkeitsmechanischen Parameter verbunden ist. Wasserzugabe beschleunigt den Entfestigungsprozeß durch Reduktion der Kohäsion und inneren Reibung sowie durch Hydrolyse des Gesteins (GRIGGS, 1974). Besonders durch Dauerbelastung oder häufige Last- und Temperaturwechsel verliert das Gestein mit der Zeit an Festigkeit (LEMPP, 1988). Diese *Ermüdung* tritt hauptsächlich bei höheren Spannungsamplituden und längeren Lastwechselperioden auf (CHO & HAIMSON, 1987). Darüberhinaus beeinflussen geochemische Korrosion und Lösungsvorgänge die Materialfestigkeit und erhöhen die Porosität und Permeabilität des Gesteins.

Nach dem Bruch erfährt das Gestein eine Auflockerung (Dilatanz) und Entfestigung. Als Bruchformen beobachtet man Scherbruch, Zugriß und Mischformen. Sie sind lokalisiert oder über die Probe verteilt. Der Trennbruch (Extensionsbruch) stellt sich überwiegend parallel zur Wirkungsrichtung der maximalen Druckspannung nach Überschreiten der Zugfestigkeit des Materials (HOLZHAUSEN & JOHNSON, 1979) ein, während der Scherbruch tendenziell der Wirkungsrichtung der maximalen Schubspannung nach Überschreiten von Kohäsion und innerer Reibung des Materials folgt.

2.2 Kriech- und Relaxationsversuche

Zur Untersuchung des temperatur- und zeitabhängigen Materialverhaltens werden geheizte Kriech-, Relaxations- und Wechsellastversuche durchgeführt. Stationäre Kriechversuche erfolgen unter konstanten Spannungen oder unter konstanten Dehnungsgeschwindigkeiten; nach KRANZ (1979) ergeben sich dabei sehr unterschiedliche Resultate. Relaxationsversuche sind wegen der großen Schwierigkeit ihrer Durchführung noch verhältnismäßig selten (HAUPT, 1988). Man unterscheidet zwischen Spannungs- und Temperatur-Relaxationsversuchen. Die rheologischen Deformationen der Gesteine hängen in exponierter Weise von den Spannungen ab. Auch hat der Fluidgehalt einen erheblichen Einfluß auf Kriechen und Relaxation der Gesteine. Die Spannungsrelaxation ist bei polykristallinem Gestein von sehr komplizierten Mechanismen wie gefügebefindete Spannungsspitzen und stip-slick-Effekte bestimmt. Es tritt eine rege Wechselwirkung von intragranularer Kriechbewegung, Spannungsrelaxation und Mikrorißbildung auf, wodurch die Kriech- und Relaxations-Kennlinien als sehr un stetig erscheinen (LEMPP & NATAU, 1987). Die Einordnung der Einflußparameter für die Bohrlochstabilität bei sprödem oder duktilem Materialverhalten polykristalliner Gesteine unter hohen Drücken und hohen Temperaturen ist ein wichtiger Beitrag zur Grundlagenforschung bei der Definition des spröd/duktile-Übergangs von Geomaterialien.

2.3 Permeabilitätsuntersuchungen

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen auf der Basis der effektiven Spannungen überschätzen den Effekt des Porendrucks in hohem Maße. Ansätze für poroelastisches Materialverhalten von *verformbarem* Gestein mit *kompresiblen* Fluiden (RICE & CLEARLY, 1976) kommen den Verhältnissen in der Natur wesentlich näher, doch sollten sie für Stabilitätsbetrachtungen im KTB-Projekt auch den exponentiellen Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Porosität bzw. Auflockerungsgrad enthalten und das hochviskose, thixotrope Stoffverhalten der Bohrspülung (ENGESER & UJMA, 1987) sowie deren Temperatur- und Druckeinflüsse auf die Bohrlochstabilität berücksichtigen können. Den Einfluß von nicht-linear viskosen Druckflüssigkeiten auf den hydraulischen Bruch des Gesteins berechnet PASCAL (1986). Nach den in-situ-Messungen von BLACK (1983) ist die hydraulische Leitfähigkeit eine Potenzfunktion der wirksamen äußeren Spannungen, wobei sich die hydraulischen Eigenschaften von Gestein, Trennflächen und Rissen jedoch sehr voneinander unterscheiden.

2.4 Temperaturversuche

Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit und zu einem Festigkeitsverlust. Die thermischen Eigenschaften beziehen sich auf Ausdehnungskoeffizient, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Die thermische Ausdehnung ist eine Funktion der Rißdichte, der Heizrate, der vorausgegangenen maximalen Temperatur ebenso wie der mineralogischen Zusammensetzung und der vorzugsweisen Kristall-Orientierung.

2.5 Modellversuche

Die Modellversuche zeigen Neubrüche in der Umgebung des Hohlraumes immer dann, wenn die Tangentialspannung in den Bereich der einachsigen Druckfestigkeit des Materials kommt (VARDAR, 1977). Je nach Verhältnis der Spannungen stellt man radial gerichtete, konzentrische oder ohrenförmige Brüche fest. An den kreisförmigen Modellbohrlöchern beginnt der Bruch durch Scherung an diametral gegenüberliegenden Bereichen (GAY, 1973) und kann sich durch Abschaltungen so lange fortsetzen, bis die gesamte Probe kollabiert. BANDIS et al. (1987) werten die Bruchkonturen mit Hilfe einer elastoplastischen Gleitlinienkonstruktion aus; dabei ergeben sich Scharen von logarithmischen Spiralen, deren Schnittwinkel direkt vom Reibungsbeiwert des Materials abhängen. Die Gleitzonen entfalten sich scharenweise gestaffelt zum Teil simultan, zum Teil sequentiell und progressiv; sie können auch übergangslos in Trennflächen umschlagen. Dabei ist die Bruchfortpflanzung nicht kontinuierlich sondern sporadisch in unregelmäßigen Zeitabständen.

Die Modellversuche dienen der Prüfung von theoretischen Vorhersagemodellen durch Experimente an biaxial belasteten, gelochten Scheiben oder dickwandigen Gesteinshohlzylindern in biaxialen oder triaxialen Hochdruckversuchen unter kontrollierten Spannungs-, Temperatur- und Porendruckbedingungen. Die Erfahrungen aus dem Experiment werden dazu benutzt, die Genauigkeit und Aussagekraft der theoretischen Rechenansätze und -modelle zu verifizieren, zu ergänzen und zu modifizieren. Erst wenn eine hinreichende Übereinstimmung von Versuch und Rechnung erzielt ist, kann man Prognosen für die Standfestigkeit der Kontinentalen Tiefbohrung abgeben.

3. STATISCHE BERECHNUNGEN

Die Berechnungen zur Bohrlochstabilität erfolgen analytisch, semi-analytisch oder numerisch. Als Eingabeparameter benötigt man Geometrie, geologische Struktur, Stoffgesetze sowie Anfangs- und Randbedingungen für Spannungen und Verschiebungen. Man verwendet kontinuierliche, finitisierte oder diskontinuierliche Rechenmodelle von zwei- oder dreidimensionaler Geometrie. Berechnet werden die Bohrlochkonvergenzen, Gebirgsspannungen und Bruchzonen.

3.1 Analytische Modelle

Die Spannungsumlagerungen nach Öffnung des kreisförmigen Querschnittes sind für den Fall isotroper äußerer Spannung aus der Theorie von LAMÉ (1852) bekannt, die für ein dickwandiges, elastisches Rohr hergeleitet worden ist, auf dessen innere und äußere Mantelflächen gleichmäßig verteilte Normalspannungen wirken. Erstaunlicherweise wurde ausgerechnet nach dieser Methode die Stabilität der Kola-Tiefbohrung abgeschätzt (ANDRIANOV et al., 1987).

Bei biaxialer äußerer Horizontalspannung führt man die Berechnungsaufgabe zweckmäßigerweise auf das Randwertproblem der einachsig gezogenen, gelochten elastischen Scheibe zurück, das für die Spannungsverteilung erstmals von KIRSCH (1898) vollständig gelöst worden ist. KASTNER (1971) benutzte diese Lösung, um durch Vergleich mit der Grenzbedingung nach MOHR-COULOMB die sog. plastischen Zonen

um einen kreisförmigen Tunnelquerschnitt bei biaxialen äußere Horizontalspannungen zu lokalisieren; plastische Verformungen und Spannungsumlagerungen blieben dabei außer Acht.

Die Spannungsumlagerungen nach Öffnung eines kreisförmigen Querschnittes im *elastoplastischen Gebirge mit Entfestigung* sind für den Fall isotroper äußerer Spannung aus der Theorie von EGGER (1973) bekannt. FLORENCE & SCHWER (1978) zeigen bei Anwendung des MOHR'schen Festigkeitskriteriums, daß die Ausweitung der plastischen Zone bei ebenen Berechnungen außer von Kohäsion und Reibung entscheidend auch von der Wahl der POISSON'schen Querkontraktionszahl abhängt.

Oberflächen-Instabilitäten und lokalisierte Scherbandbildung am Bohrlochrand mit spannungsabhängigen Verformungsmoduln untersuchen SANTARELLI & BROWN (1987), die zu qualitativ ähnlichen Spannungsverteilungen wie bereits NADAI (1963) kommen, der ein Potenzgesetz für die elastoplastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung angenommen hat. Dabei hängt die Bohrlochstabilität nicht allein von den Materialeigenschaften sondern auch sehr von dem Spannungspfad bei der Herstellung der Bohrung und von den Randbedingungen des Systems ab (VARDOULAKIS et al., 1988).

LEE & SMITH (1988) berechnen das Wachstum eines anfangs kreisförmigen Hohlraumes unter ausgeprägt biaxialen äußeren Spannungsbedingungen nach der Methode der komplexen Spannungsfunktionen und finden, daß das Verformungsverhalten sich qualitativ und quantitativ sehr von dem eines linear viskosen Materials unterscheidet: Die Elongation der Hohlraumgeometrie wächst bevorzugt in Richtung der maximalen Kompressionsspannung und bildet langfristig einen elliptischen Spalt, der die Form eines Extensionsrisses annimmt. Dieses bemerkenswerte Ergebnis, das sowohl für die Interpretation der Bohrlochrandausbrüche unter hohen Temperaturen und Drücken nützlich ist als auch die Bildung von tangentialen Rissen an Bohrlochwänden in einem viskosen oder starr plastischen Gebirge erklären könnte, wird von numerischen Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente von ANDERSSON (1977) und durch Laborexperimente an Metallen bestätigt.

3.2 Numerische Berechnungsmodelle

Numerische Methoden werden herangezogen, wenn keine entsprechenden analytischen vorhanden sind, z.B. bei unregelmäßiger Geometrie des Bohrlochs, heterogener Struktur des Gebirges, Auflockerungszonen und komplexen Materialeigenschaften des Gesteins. Sie basieren überwiegend auf der Methode der finiten Elemente für kontinuumsmechanische Anwendungen, der finiten Differenzen für hydromechanische Berechnungen und der Randintegral-Elemente für bruchmechanische Probleme.

Finite-Differenzen-Modelle wurden von WILKINS (1969) zur näherungsweise Lösung partieller Differentialgleichungen für Randwertprobleme der Geomechanik vorgeschlagen; sie haben sich jedoch in der Felsmechanik gegenüber den Finite Element Modellen bisher noch nicht recht durchsetzen können. Voraussichtlich werden sie an Bedeutung gewinnen, wenn die zeitabhängigen thermo-hydro-mechanischen Ansätze für das Materialverhalten der Gesteine am Bohrloch in großer Tiefe stärkere Anwendung finden als bisher.

Die *Randintegral Element Methode* der Elastizitätstheorie beruht auf analytisch exakten Fundamentallösungen für Punkt- oder Linienkraftquellen im kontinuierlichen Voll- oder Halbraum, die mit Hilfe von Computerprogrammen linear so superponiert werden, daß sie alle gestellten Randbedingungen bei willkürlicher Geometrie des betrachteten Bereichs befriedigen (CROUCH & STARFIELD, 1983). Die Randintegral-Element-Modelle werden für die Analyse der Bohrlochrandausbrüche und des Bohrkernerfalls herangezogen und vermögen, die Entstehung, Form, Ausbreitung und Wechselwirkung von Brüchen phänomenologisch zu beschreiben.

Die von EWY et al.(1987) propagierten Bohrlochmodelle nach der Randintegral-Element-Methode sind von der Theorie her demnach prinzipiell elastische Modelle: Bereiche, in denen die Grenzbedingungen erreicht oder überschritten sind, werden in einem folgenden Iterationsschritt geometrisch durch Veränderung der Kontur des offenen Bohrloches ausgespart. Die berechneten Abplatzungsformen führen zu der Ausbildung definierter Ausbruchsbereiche, die hinsichtlich Abspaltung und Scherbrüchen stabil sind; sie entsprechen qualitativ denen, die auch in Hohlzylinderdruckversuchen beobachtet werden. Die Ausweitung des gebrochenen Bereich ist dabei im Fall einer graduellen Erhöhung der äußeren Spannungen kleiner als bei einer sofortigen Öffnung des Hohlraums unter voller Belastung durch das äußere Spannungsfeld.

Üblicherweise erfolgen die felsmechanischen Berechnungen nach der *Methode der finiten Elemente* unter besonderer Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens, der diskontinuierlichen geologischen Gebirgsverhältnisse und der räumlichen Geometrien. Die Elemente-Bibliothek sollte Schalenelemente für die Bohrlochverrohrung, Ring-Elemente für das Gebirge, ebene isoparametrische 8-Knoten-Scheibenelemente sowie ebene und räumliche Zwischenelemente für Gleitfugen, Trennflächen und Klüfte enthalten (BATHE, 1986). Die Finite Element Analyse umfaßt Eigengewichtsbelastung, homogenes und inhomogenes, isotropes und anisotropes Stoffverhalten, nichtlineare konstitutive Materialgesetze einschließlich Plastizität und Kriechen, sowie statische Gleichgewichts-Iterationen und Zeit-Integrationen für rheologische Rand- und Anfangswertprobleme. Die Berechnungen werden unter Variation der wesentlichen Einflußparameter (Materialfestigkeiten, Geometrien und Randbedingungen) durchgeführt. Dabei konzentriert sich die Analyse auf die Spannungen und Verformungen für die unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Zustände der Bohrung.

3.3 Ebene oder räumliche Strukturen

Maßgeblich für die Bohrloch- und Bohrkernstabilität ist der allgemeine Fall der Belastung in einem räumlichen Spannungsfeld mit unterschiedlich großen primären Horizontalspannungen. Besonders kompliziert wird die statische Berechnung, wenn die Hauptachsen des äußeren Spannungstensors nicht mit den Achsen des Bohrlochs übereinstimmen oder wenn räumlich unterschiedliche Bohrlochrandausbrüche zu einer heterogenen Spannungskonzentration führen. Unumgänglich sind dreidimensionale Berechnungen bei der Analyse des Spannungs-, Verformungs- und Bruchverhaltens in der Nähe der *Bohrlochsohle* und bei der *Kernentnahme* unter der Normal- und Scherbeanspruchung durch das Bohrwerkzeug. Leider sind die räumlichen Finite Element Modelle extrem zeit- und kostenaufwendig.

Die Vielfalt der unterschiedlichen Materialbereiche im anstehenden Gebirge muß hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften zu repräsentativen Materialtypen zusammengefaßt werden. Beim Entwurf des Finite-Element-Netzes wird versucht, die geologischen Materialgrenzen möglichst realistisch einzuhalten. Bei den Materialfraktionen wird angenommen, daß sie Foliationsflächen mit ausgeprägten Festigkeitsanisotropien aufweisen. Diskontinuitäten bei geologischen Formationswechseln und tektonischen Störungszonen, die zu diskreten Gleitkeilbildungen am Bohrlochrand führen können, lassen sich durch spezielle Kluft-Elemente mit reduzierten Festigkeiten und ausgeprägten Materialanisotropien berücksichtigen (MALINA (1969), VAN DILLEN et al.(1984), WITKE & ERBAN (1985)); ihr Stellenwert bei der Stabilitätsanalyse für *größere* Teufenbereiche der Kontinentalen Tiefbohrung ist jedoch noch unbestimmt.

3.4 Rand- und Anfangsbedingungen

Die Festlegung des seitlichen Einflußbereichs der Tiefbohrung ist bei elastischem Materialverhalten relativ einfach zu treffen; bei nichtlinear rheologischem Gebirgsverhalten ist die Wahl der lateralen Ränder erheblich problematischer, da sie auch aus sehr großer Entfernung noch die Spannungskonzentration und die Kriechraten am Bohrlochrand signifikant beeinflussen können (BORM & HAUPT, 1988). *Tektonische* oder *residuelle* sowie *geothermische* Gebirgsspannungen lassen sich in den numerischen Berechnungen wie die *gravitativen* Spannungen als *Anfangsspannungen* eingeben.

Das Abteufen der Tiefbohrung ist ein *nicht-stationäres* Problem: Die Störung des Kräftegleichgewichts beim Ausbruch, der Versuch des Gebirges, über seine spontane oder langzeitige Deformation und Spannungsrelaxation in *intermittierender* Weise einen neuen stabilen Zustand herzustellen, der weitere Bohrfortschritt usw. schlagen sich in wechselnden Belastungen der Bohrlochwand nieder. Um den Einfluß von bohrtechnisch bedingten Temperatur- und Lastwechseln erfassen zu können, muß die Berechnung diese *hysteretischen* Vorgänge realistisch nachzeichnen können.

3.5 Konstitutive Modelle

Die Gestalts- und Volumenänderungen von Festkörpern unter dem Einfluß äußerer Kräfte werden in der Kontinuumsmechanik durch die konstitutiven Gleichungen (Stoffgesetze) beschrieben. Bei natürlichem Fels sind entsprechende Gleichungen im allgemeinen nicht bekannt, sodaß man sich in der Praxis auf vereinfachte Näherungsansätze beschränkt, die das Materialverhalten wenigstens innerhalb eines vorgegebenen Deformationsbereichs zahlenmäßig hinreichend genau wiedergeben.

Hinsichtlich der *Verformbarkeit* unterscheidet man lineares, nicht-lineares, isotropes, anisotropes und orthotropes elastisches Materialverhalten. Es wird charakterisiert durch die Angabe von Elastizitätsmoduln und Querkontraktionszahl oder durch Schub- und Kompressionsmoduln oder durch die Lamé-schen Konstanten. Sie sind für statische und dynamische Belastungsbedingungen i.a. verschieden und sind für Gesteine keine eigentlichen Materialkonstanten sondern hängen von der Intensität der Verformung ab. Nichtlineare Elastizität wird als inkrementell linearisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit veränderlichen Pseudo-Elastizitätsmoduln angenommen (BUDIANSKY & O'CONNELL (1976), WALSH (1965a,b)).

Während aus einem dreidimensionalen Rechenmodell bei entsprechender Parametervariation Rückschlüsse auf das Spannungs- und Verformungsverhalten des Bohrlochs gezogen werden können, sind Angaben zur *Stabilität* des Hohlraumes noch nicht direkt möglich. Selbst im Fall einer sehr weitgehenden Plastifizierung des Modelles, wenn also die Grenzbedingung um den Hohlraum herum überall erreicht ist, wird in einem Bohrloch kein Stabilitätsversagen eintreten, solange das Entfestigungsverhalten und der zusätzliche Verlust an Reibung durch Fluiddruck nicht berücksichtigt sind.

Die überwiegende Anzahl der elastoplastischen numerischen Berechnungen wird mit Festigkeitsparametern (Reibungswinkel und Kohäsion) durchgeführt, die als konstant angenommen werden. Dieses entspricht jedoch bei kristallinen Festgesteinen nicht unbedingt der Realität, vor allem dann nicht, wenn stärkere Verformungen auftreten. Die in den Laborversuchen gemessene *Materialentfestigung* des feuchten Gesteins muß quantifiziert und in ein thermodynamisch konsistentes, dreidimensionales Stoffgesetz umgesetzt werden, das man für makroskopische numerische Berechnungen verwenden kann. Um darüberhinaus die Entstehung der unterschiedlichen Formen der Bohrlochrandausbrüche wie Scher-, Trenn- und Mischbruch oder für das Knicken numerisch simulieren zu können, sind hohe geometrische Auflösungen der Netzstruktur und Verformungsansätze höherer als linearer Ordnung erforderlich. In einem Entfestigungsmodell von MÜHLHAUS (1987), bei dem mit nicht-assoziierter Fließregel gearbeitet wird, werden die ursprünglich *lastgeregelten* Randwertprobleme in äquivalenter Weise - aber numerisch wesentlich vorteilhafter - *verschiebungsgeregelt* berechnet.

Oberflächen-Instabilitäten und lokalisierte Scherbandbildung am Bohrlochrand zeigen, daß die Bohrlochstabilität nicht allein eine Frage der Materialeigenschaften ist, sondern daß sie auch sehr von dem Spannungspfad bei der Herstellung der Bohrung und von den Randbedingungen des Systems abhängt. Numerische Modellrechnungen müssen daher die Spannungs- und Verformungs-*Geschichte* in inkrementeller Form zuverlässig nachvollziehen können. Bei der quasi-einachsigen Aufspaltung und Knickung an der Bohrlochwand ist die Dicke der Abschaltungen um eine Größenordnung geringer als der Durchmesser des Bohrloches. Von zentraler Bedeutung ist daher neben der Notwendigkeit eines entsprechend feinen Diskretisierungsgrades, daß das Stoffgesetz einen Materialparameter mit der Dimension einer charakteristischen Länge enthält, wie z.B. Korngröße oder Mikrorißdichte. Diese Voraussetzung ist bei den herkömmlichen numerischen Modellen in der Regel nicht erfüllt.

SALUSTOWICZ (1965) stellt treffend fest, daß die Gesteinsmassen der Erdkruste sich auf eine von der Teufe abhängende Weise verhalten: In kleinen Teufen sei das Gestein elastisch oder plastisch; in größeren Teufen weise es eine verzögerte Elastizität auf; dem entspreche das KELVIN'sche Modell; in sehr großen Teufen wachsen die Verformungen unbegrenzt an; dem entspreche das MAXWELL'sche Modell. Die linearen viskoelastischen Modelle sind jedoch nur von theoretischer Bedeutung zur Veranschaulichung von Kriech- und Relaxationsphänomenen an der Bohrlochwand. Praktisch sind sie irrelevant, weil die natürlichen Gesteine sich langfristig in keiner Weise linear verhalten.

Die Einbeziehung der *rheologischen* Bewegungsgleichungen und ihrer Integration nach der Zeit ermöglichen Prognosen zur Dauerstandfestigkeit der Tiefbohrung und zur Kriechkonvergenz. Die Berechnungen erfolgen auf der Basis der Methode der Anfangsverformungen (ZIENKIEWICZ, 1971). Praktische Rezepte für die Wahl nume-

risch stabiler Zeitintegrationsverfahren geben ZIENKIEWICZ & CORMEAU (1974) und SNYDER & BATHE (1977). Bei Ansatz eines nichtlinearen rheologischen Materialverhaltens relaxieren die sekundären Differenzspannungen am Bohrlochrand chronisch; dadurch verlagern sich die Maxima der tangentialen Spannungsintensitäten allmählich in das Innere des Gebirges, wo sie eine temporäre *Schutzhülle* um den Hohlraum aufspannen. Dieses *Relaxationsverhalten* erscheint für die Stabilität der Tiefbohrung maßgeblich, da die Festigkeit der kristallinen Gesteine voraussichtlich schon in mittleren Teufen für die Aufnahme elastischer Spannungskonzentrationen nicht mehr ausreichen wird. Auch stehen die transienten Verformungen des umgebenden Gebirges in reger Wechselwirkung mit der Spannungsrelaxation am Bohrlochrand (BORM, 1987).

Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit und zu einem Verlust an Festigkeit (HANDIN & CARTER, 1979). Der am häufigsten verwendete Ansatz für die Temperaturabhängigkeit ist die ARRHENIUS-Funktion, nach der der negative Logarithmus der stationären Kriechrate proportional zu einer spannungs- und temperaturabhängigen Aktivierungsenergie und umgekehrt proportional zur KELVIN - Temperatur ist (WEERTMAN & WEERTMAN, 1975). Der Einfluß der Erhitzung auf die mechanischen Eigenschaften des Gesteins variiert jedoch stark je nach Zusammensetzung und Textur der Gesteine. Spannungsänderungen durch *Temperaturdifferenzen* von Gebirge und Bohrspülung bewirken, daß die Vertikal- und Tangentialspannungen an der Bohrlochwand außer durch Spannungsrelaxation auch durch die Abkühlungskontraktion des Gebirges mit der Zeit abnehmen (LUX et al., 1987).

Die thermomechanischen Wechselwirkungen werden in den numerischen Modellrechnungen bei instationären Temperaturfeldern im allgemeinen durch entkoppelte Systeme iterativ simuliert: Neben dem mechanischen Finite Element Modell existiert ein weiteres, das die transiente Temperaturausbreitung berechnet; die darin ermittelten Temperaturen werden in inkrementellen Zeitschritten an das mechanische Modell als jeweilige Anfangstemperaturen übergeben, um daraus die thermische Expansion, Kontraktion und ggf. Rißbildung sowie die Kriechraten des Gesteins bestimmen zu können. In der Nachbildung des Bohrvorganges steckt implizit sowohl eine bohrtechnische als auch eine thermomechanische Zeitabhängigkeit. Durch das entkoppelte Verfahren von instationärer Temperaturberechnung und Spannungsanalyse erweist sich die vollständige Stabilitätsberechnung als so außerordentlich kompliziert, zeit- und kostenaufwendig, daß man gezwungen ist, sich auf Näherungsverfahren zu beschränken.

Sickerströmungen zum Bohrloch hin oder vom Bohrloch weg sollen ebenso wie der Einfluß von Spülungsdruck, Porendruck und Porendruckgradient in der Modellrechnung berücksichtigt werden: Einerseits induziert die Deformation des Gebirges die Bewegung der Fluide, andererseits ist diese Fluidbewegung von der Permeabilität des Systems bestimmt; umgekehrt hängt der Permeabilitätstensor des Systems vom lithostatischen und hydraulischen Druck ab. Die Permeabilitätswechselwirkungen sind deshalb räumlich und zeitlich unterschiedlich stark ausgeprägt (WALLNER et al., 1987).

Die Theorie der poroelastischen Modelle entwickelte BIOT zu Anfang der 40-er Jahre; die Ansätze wurden später von ihm ergänzt und modifiziert. Auf dieser Grundlage beschreibt GEERTSMA (1966) ausführlich die formalen Analogien zwischen poroelastischen und thermoelastischen Randwertproblemen und deren Lösungen. DETOURNAY & CHENG (1988) untersuchen das Problem der gekoppelten Diffusion und De-

formation für *biaxiale* äußere Spannungsfelder und berechnen damit potentielle Mechanismen für verzögerte Bohrloch-Instabilität und Scherbruch-Initiierung im Gebirge. Da die Ansätze ursprünglich nur für wassergesättigte *poröse Sedimentgesteine* entwickelt worden sind, bleibt zu klären, ob und in welchem Umfang auch das Verhalten von *entfestigten kristallinen* Gesteinen mit dieser Theorie beschrieben werden kann.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Standfestigkeitsanalysen mit dem Charakter einer Prognose der Möglichkeiten, auf direkt vergleichbare Situationen oder Erfahrungen zurückgreifen zu können, bilden eine herausfordernde Zielsetzung für die Geowissenschaften. Es müssen theoretische Modellvorstellungen entwickelt werden, deren Grundlagen zunächst einzugrenzen sind.

Ablenkungen des Bohrlochs, wie sie bei der KTB-Vorbohrung normal zur Foliationsrichtung der Paragneise beobachtet werden, oder gar Versetzungen des Bohrlochs an tektonischen Störzonen werden bei den vorliegenden Stabilitätsbetrachtungen ausgeklammert; sie sind Inhalt globaler Modellrechnungen, die auf das Umfeld der Kontinentalen Tiefbohrung mit seiner Störungstektonik und regionalen Spannungsanisotropie ausgerichtet sind. Voraussetzung bei dieser Prognose sind Faktoren, die überregional in der Lithosphäre die Standfestigkeit einer Tiefbohrung ausmachen.

Linear elastische Berechnungsmodelle können bestenfalls nur zur Kalibrierung der nichtlinearen Modelle herangezogen werden. Ebenso sind die linear viskoelastischen Methoden nur von theoretischer Bedeutung bei der Veranschaulichung von Kriech- und Relaxationsphänomenen an der Bohrlochwand. Praktisch sind sie irrelevant, weil die natürlichen Gesteine sich langfristig in keiner Weise linear verhalten. Wenig gut geeignet für Analysen der Bohrloch- und Bohrkernstabilität sind ferner alle herkömmlichen Verfahren auf der Basis von Plastizitäts- oder Viskoplastizitätstheorien, solange die dreidimensionale, inkrementelle Spannungs- und Verformungs-Geschichte und die progressive Auflockerungsentfestigung des Gebirges nicht darin berücksichtigt sind.

Bei dem quasi-einachsigen Aufspaltungs- und Knickmechanismus an der Bohrlochwand ist die Dicke der Abschalungen um eine Größenordnung geringer als der Durchmesser des Bohrloches. Von zentraler Bedeutung ist daher neben der Notwendigkeit eines entsprechend feinen Diskretisierungsgrades, daß das Stoffgesetz einen Materialparameter mit der Dimension einer charakteristischen Länge enthält, wie z.B. Korngröße oder Mikrorißdichte. Diese Voraussetzung ist bei den herkömmlichen numerischen Modellen in der Regel nicht erfüllt.

Oberflächen-Instabilitäten und lokalisierte Scherbandbildung am Bohrlochrand zeigen, daß die Bohrlochstabilität nicht allein eine Frage der Materialeigenschaften ist, sondern daß sie sehr wohl auch von dem Spannungspfad bei der Herstellung der Bohrung und von den Randbedingungen des Systems abhängt. Numerische Modellrechnungen müssen daher die Spannungs- und Verformungs-Geschichte in inkrementeller Form zuverlässig nachvollziehen können

Spannungsänderungen durch Temperaturdifferenzen von Gebirge und Bohrspülung bei zyklischer thermischer Belastung sowie Rißbildung durch Abkühlung sollen ebenso berücksichtigt werden können wie veränderliche Porendruckgradienten im Gestein; sie

bewirken, daß die Vertikal- und Tangentialspannungen an der Bohrlochwand sowohl durch Spannungsrelaxation als auch durch Abkühlungskontraktion des Gebirges mit der Zeit abnehmen und damit die Bohrlochwand entlasten.

Die Berechnungsansätze zur Bohrlochstabilität sollen auch die hydrolytische Materialentfestigung und die Erhöhung der Duktilität des Gesteins durch den Gehalt an Fluiden nachvollziehen können; hierzu müssen grundsätzlich offene Systeme modelliert werden, die obendrein die Transportgleichungen für Spülung und Fluide enthalten. Sie müssen das thixotrope Stoffverhalten der Bohrspülung mit ihren Strömungs-, Temperatur- und Druckeinflüssen auf die Bohrlochstabilität realistisch nachbilden können.

Nach den bisherigen Abschätzungen und Berechnungen ist die Stabilität der Kontinentalen Tiefbohrung und der daraus zu gewinnenden Kerne ab halber bis zwei Drittel Endteufe nicht mit Sicherheit nachzuweisen. Quantitative Prognosen der Bohrlochrandausbrüche, der kritischen Teufen und der Auswirkung der technischen Wechsellasten durch den Bohrvorgang mit periodischen Torsionsbeanspruchungen und Werkzeugwechseln müssen ebenso wie geeignete Maßnahmen zur Stützung des Bohrlochs und Sicherstellung der Kernprobengewinnung entwickelt werden, wobei sich die Zeitabhängigkeit der verschiedenen Einflußgrößen als Schlüsselfaktor erweist.

Schließlich gilt es zu beachten, daß der mechanische *Betrachtungsbereich* bei der Kontinentalen Tiefbohrung in der Querschnittsebene eine Größenordnung kleiner und nach der Tiefe hin eine Größenordnung höher ist als bei den herkömmlichen felsbaumechanischen Anwendungen. Diese Fakten müssen sich demnach sowohl im Grad der physikalischen als auch der numerischen Auflösung der Modellrechnungen niederschlagen. Eine direkte, pragmatische Übertragung der vorhandenen ingenieurmäßigen Berechnungsansätze und -methoden aus dem Felsbau wird darum für die Stabilitätsanalyse dieser Tiefbohrung in den unteren Krustenbereichen mit großer Wahrscheinlichkeit bei weitem nicht ausreichen. Die offenen Probleme stecken hauptsächlich in der Forderung nach hoher, dreidimensionaler Auflösung der petrographischen Strukturen am Bohrloch, Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Materialeigenschaften (Temperaturgradient, Abkühlungsgeschwindigkeit, Entlastungsgeschwindigkeit, Relaxationsvermögen) und der begrenzten residuellen Festigkeiten sowie der noch weitgehend unbekannt, gekoppelten thermo-hydro-mechanischen Bewegungsgleichungen des durchteuften Gebirges.

Alle Berechnungen sind zweifelhaft, wenn sie nicht eng mit den Messungen und Beobachtungen in situ verbunden werden. Zu diesem Zweck müssen neben den Materialuntersuchungen im Labor vor allem auch die geometrischen Daten der Bohrlochrandausbrüche räumlich und zeitlich genau und systematisch unter möglichst gleichbleibenden Spülungs- und Bohrbetriebsbedingungen erfaßt werden. Nur so kann auf Dauer eine realistische Interpretation und Extrapolation der mechanischen Stabilität der Kontinentalen Tiefbohrung erfolgen.

5. LITERATUR

- ANDERSSON,H.(1977): Analysis of a Model for Void Growth and Coalescence ahead of a Moving Crack Tip. *Mech.Phys.Solids*, 25, 217-233, Pergamon Press
- ANDRIANOV,N.I., VOROZHBITOV, and VUGIN,R.B.(1987): Stability of the Borehole Wall Rock Mass. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*, 427-432, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo
- ATTEWELL,P.B. and FARMER,I.W.(1973): Fatigue Behavior of Rock. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 10, 1-9
- BANDIS,S.C., LINDMAN,J., and BARTON,N.(1987): Three-Dimensional Stress State And Fracturing Around Cavities in Overstressed Weak Rock. In: Herget,G. and Vongpaisal,S.(eds.): *Proc.6th Int.Congr.ISRM*, Montreal, 769-767, Balkema, Rotterdam
- BATHE,K.J.(1986): *Finite Elemente Methoden*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo
- BAYUK,E.I., BELIKOV,B.P. VERNIK,L.I., VOLAROVITCH,M.P., KUZNETSOV,Y.I., KUZMENKOVA,G.E., and PAVLOVA,N.N.(1987): Rock Density, Porosity, and Permeability. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*, 332-338, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris
- BEHR,H.-J.(1987): KTB und kontinentale Krustenforschung - Warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm? In: *KTB-Report 87-1*, 1-35
- BIENIAWSKI,Z.T.(1967a): Mechanism of Brittle Fracture of Rock. Part II - Experimental Studies. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 4, 407-423
- BIENIAWSKI,Z.T.(1967b): Mechanism of Brittle Fracture of Rock. Part III - Fracture in Tension and Under Long-Term-Loading. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 4, 356-438
- BIOT,M.A.(1973): Nonlinear and Semilinear Rheology of Porous Solids. *J.Geophys.Res.*, 78(23), 4924-4937
- BLACK,J.H.(1983): Treating Granites as Fissured Porous Media.*Proc. Int.Symp.Field Measurements Geomech. Zurich*, 1299-1308, Balkema, Rotterdam
- BLÜMLING,P., FUCHS,K., and SCHNEIDER (1985): In Situ Stress and Borehole Breakouts. In: *Proc.2nd Int.Symp.Obs.Cont.Crust through Drilling*, 75, Seeheim
- BORM,G.(1987): Rheologische Gebirgsspannungen und -entspannungen beim bergmännischen Felshohlraumbau. *Felsbau*, 5, H.4, 175-181.
- BORM,G. und NATAU,O. (1988): Bohrlochstabilität der Kontinentalen Tiefbohrung - Materialuntersuchungen und statische Berechnungen. *KTB-Report 88-9*
- BORM,G. and HAUPT,M.(1988): Constitutive Behaviour of Rock Salt: Power Law or Hyperbolic Sine Creep?, In Swoboda,G.(ed.): *Proc.ICONMIG 88 Innsbruck*, 3, 1883-1894, A.A.Balkema, Rotterdam.
- BRACE,W.F.(1972): Pore Pressure in Geophysics. In: *Flow and Fracture of Rocks*, *Geophys.Monogr.* 16, 265-273, Amer.Geophys.Union, Washington, D.C.
- BRACE,W.F.(1980): Permeability of Crystalline and Argillaceous Rocks. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 17, 241-251
- BUDIANSKY,B. and O'CONNELL,R.J.(1976): Elastic Moduli of a Cracked Solid. *Int.J.Solids Struct.*, 12, 81-97

- CARTER,N.L., ANDERSON,D.A., HANSEN,F.D., and KRANZ,R.L.(1981): Creep And Creep Rupture of Granite Rocks. In: Mechanical Behaviour of Crustal Rocks, Geophys.Monogr. 24, Amer.Geophys. Union, Washington, D.C.
- CHO,T.F. and HAIMSON,B.C.(1987): Effect of Cyclic Loading on Circular Openings - Results of a Laboratory Simulation. In: Proc.28th U.S.-Symp. Rock Mech. Tucson, 805-812, A.A.Balkema, Rotterdam - Boston
- COSTIN,L.S. and HOLCOMB,D.J.(1981): Time-Dependent Failure of Rock Under Cyclic Loading. Tectonophysics, 79, 279-296
- CROUCH,S.L. and STARFIELD,A.M.(1983): Boundary Element Methods in Solid Mechanics. George Allen and Unwin, London
- DETOURNAY,E. and CHENG,A.D.H.(1988): Poroelastic Response of a Borehole in a Non-Hydrostatic Stress Field. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., 25(3), 171-182
- DIETRICH,H.G. und HEINISCH,M.(1987): Die Geowissenschaftliche Bohrungsbe-
arbeitung vor Ort unter Einbeziehung des Feldlabors. In: KTB-Report 87-1, 146-163
- EGGER,P.(1973): Einfluß des Post-Failure Verhaltens von Fels auf den Tunnelausbau. Veröff.Nr.57, Inst.Bodenmech.Felsmech.Univ.Karlsruhe
- EMMERMANN,R.(1986): Das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm. For-
schungskonzeption und Zielsetzungen. Geowissenschaften unserer Zeit, 4(1), 19-33
- ENGESER,B. und UJMA,K.-H.(1987): Spülungssysteme in der Vor- und Haupt-
bohrung. In: KTB-Report 87-1, 69-83
- EWY,R.T., KEMENY,J.M., ZHENG,Z. and COOK,N.G.W.(1987): Generation and
Analysis of Stable Excavation Shapes Under High Rock Stresses. In: Herget,G. and
Vongpaisal,S.(eds.): Proc.6th Int.Congr.ISRM, Montreal, 875-881, A.A.Balkema,
Rotterdam
- FLORENCE,A.L. and SCHWER,L.E.(1978): Axisymmetric Compression of a Mohr-
Coulomb Medium Around a Circular Hole. Int.J.Num. & Analyt.Meth.Geomech.2,
367-379
- GALDIN,N.E., LUBIMOVA,E.A., NARTIKOEV,V.D., POPOV,Y.A., SEMAS-
HKO,S.A., SKORNYAKOV,V.M., and SMIRNOVA,E.V.: Rock Thermal Proper-
ties. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): The Superdeep Well of the Kola Peninsula, 383-
386. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo
- GARG,S.K. and NUR,A.(1973): Effective Stress Laws for Fluid-Saturated Porous
Rocks. J.Geophys.Res., 78, 5911-5921
- GAY,N.C.(1973): Fracture Growth Around Openings in Thick-Walled Cylinders of
Rock Subjected to Hydrostatic Compression. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geo-
mech.Abstr., 10, 209-233
- GEERTSMA,J.(1966): Problems of Rock Mechanics in Petroleum Production Engi-
neering. Proc. 1st Int.Congr.Int.Soc.Rock Mech., Lisbon, 1, 585-594
- GRIGGS,D.T.(1974): A Model of Hydrolytic Weakening in Quartz. J. Geophys. Res.,
79, 1653-1661
- HÄNEL,R.(1987): Das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm - eine Herausforde-
rung an die Bohrlochgeophysik. In: KTB-Report 87-2, 1-19
- HANDIN,J. and CARTER,N.(1979): Rheological Properties of Rocks at High Tempe-
ratures. Proc.4th Int.Congr.Int.Soc.Rock Mech. Montreux, 3, 97-106

- HAUPT,W.(1988): Entwicklung eines Stoffgesetzes für Steinsalz auf der Basis von Kriech- und Relaxationsversuchen. Veröff.Nr.110., Inst. Bodenmech.u. Felsmech. Univ.Karlsruhe
- HEUZE,F.(1983): High-Temperature Mechanical, Physical, and Thermal Properties of Granitic Rocks - A Review. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 20(1), 3-10
- HOLCOMB,D.J.(1981): Memory, Relaxation, and Microfracturing in Dilatant Rock. *J.Geophys.Res.*, 86(B7), 6235-6248
- HOLZHAUSEN,G.R and JOHNSON,A.M.(1979): Analyses of Longitudinal Splitting of Uniaxially Compressed Rock Cylinders. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 16, 163-177
- HORII,H. and NEMAT-NASSER,S.(1985): Compression-Induced Microcrack-Growth in Brittle Solids: Axial Splitting And Shear Failure. *J.Geophys.Res.*, 90(B4), 3105-3125
- KASTNER,H.(1971): Statik des Tunnel- und Stollenbaus. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg
- KAZANSKY,V.I., SMIRNOV,Y.P., and KUZNETSOV,Y.I.(1987): Shear Zones And Mineralized Fissures. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*, 223-242, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo
- KESSELS,W.(1987): Das Spannungsfeld der Erdkruste und seine Wirkung auf eine übertiefe Bohrung. In: HÄNEL,R. und SCHOPPER,J.R.(ed.) *KTB-Report 87-2: Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik*, 183-208
- KIRSCH,G.(1898): Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. *Z.VDI*, 40, 797-807
- KOSLOVSKY,Y.A.(1984): The World's Deepest Well. *Sci.Amer.*, Dec.84, 106-112
- KRANZ,R.L.(1979): Crack-Crack and Crack-Pore Interactions in Stressed Granite. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 16, 37-47
- KURITA,K., GETTING,I.C., and SPETZLER,H.A.(1980): The Effect of Thermal Cycling on Volumetric Strain. *EOS, Trans.Amer.Geophys.Union*, 61, T112
- LAMA,R.D. and VUTUKURI,V.S.(1978): *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Vols.II, III, IV, TransTech Publ., Clausthal
- LEE,Y.S. and SMITH,L.C.(1988): Analysis of Power Law Creep Materials Containing a Single Hole and an Inclusion Subject to Various Combinations of Unequal Biaxial Stress. In Print.
- LEMPP,Ch. (1988): Significance of Material Softening for the Analysis of Deep Borehole Stability. In: BODÉN A. and ERIKSON,K.G.(ed.): *Deep Drilling in Crystalline Bedrock. Vol.2: Review of Deep Drilling Projects, Technology, Science, and Prospects for the Future*, 333-348, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York
- LEMPP,Ch. und NATAU,O.(1985): Mechanische Eigenschaften von Störungen und Verwitterungszonen im Granitgebirge und deren genetische Charakterisierung. In: HEITFELD,K.-H. (ed.): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*, 174-193, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- LEMPP,Ch. und NATAU,O.(1987): Festigkeitsverhalten von kristallinen Gesteinen unter hohen Drücken und Temperaturen. In: *Berichtsband 1984-1986 des SFB 108: Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre*, 233-278, Universität Karlsruhe

- LUX, K.-H., ROHKAHR, R. und ZANDER-SCHIEBENHÖFER, D. (1987): Spannungsmessungen - Interpretation. Zwischenbericht zum Forschungsvorh. Lu 328/1-1
- MALINA, H. (1969): Berechnung von Spannungsumlagerungen in Fels und Boden mit Hilfe der Elementenmethode. Veröff.Nr.40, Inst. Bodenmech. u. Felsmech. Univ. Karlsruhe
- MARTIN III, R.J. (1972): Time Dependent Crack Growth in Quartz and Its Application to the Creep of Rocks. *J.Geophys.Res.*, 77(8), 1406-1419
- MAURY, M. (1987): Observations, recherches et résultats récents sur les mécanismes de ruptures autour de galeries isolées. In: Herget, G. and Vongpaisal, S. (eds.): Proc. 6th Int. Congr. ISRM, Montreal, 1119-1128, Balkema, Rotterdam
- MÖHRING-ERDMANN, G. (1987): Numerische Simulation der Wechselwirkung von Rissen. In: HÄNEL, R. und SCHOPPER, J.R. (ed.) KTB-Report 87-2: Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik, 173-182
- MÜHLHAUS, H.-B. (1987): Stability of Deep Underground Excavations in Strongly Cohesive Rock. Proc. 6th Int. Conf. Rock Mech., ISRM, Montreal, 1157-1161; Balkema, Rotterdam.
- MÜLLER, L. (1960): Brechen und Fließen in der geologischen und mechanischen Terminologie. *Geol. u. Bauwesen*, 25(2/3), 218
- MÜLLER, L. (1963): Der Felsbau. Erster Band: Felsbau Übertage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- NADAI, A. (1963): Theory of Flow and Fracture of Solids. Vol. II; McGraw Hill, New York
- NUR, A. and BYERLEE, J.D. (1971): An Exact Effective Stress Law for Elastic Deformation of Rocks with Fluids. *J.Geophys.Res.*, 76(26), 6414-6419
- PASCAL, H. (1986): Rheological Behaviour Effects of Non-Newtonian Fracturing Fluids on Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 10, 443-448
- PENG, S. and JOHNSON, A.M. (1972): Crack Growth and Faulting in Cylindrical Specimens of Chelmsford Granite. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 9, 37-86
- PENG, S. and PODNIEKS, E.R. (1972): Relaxation And the Behavior of Failed Rock. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 9, 699-712
- RICHTER, D. and SIMMONS, G. (1974): Thermal Expansion of Igneous Rocks. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.*, 11, 403-411
- RICE, J.R. (1975): On the Stability of Dilatant Hardening for Saturated Rock Masses. *J.Geophys.Res.*, 80(11), 1531-1536
- RICE, J.R. and CLEARY, M.P. (1976): Some Basic Stress-Diffusion Solutions for Fluid Saturated Elastic Porous Media With Compressible Constituents. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 14(2), 227-241
- RICE, J.R. and SIMONS, D.A. (1976): The Stabilization of Spreading Shear Faults by Coupled Deformation-Diffusion Effects in Fluid-Infiltrated Porous Materials. *J. Geophys. Res.*, 81(29), 5322-5334
- RISCHMÜLLER, H. (1987): Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, eine technische Herausforderung. In: KTB-Report 87-1, 36-49
- RUDNICKI, J.W. (1985): Effect of Pore Fluid Diffusion on Deformation and Failure of Rock. In: BAZANT, Z. (ed.) *Mechanics of Geomaterials*, 315-347, J.Wiley, London - New York

- RUDNICKI, J.W. and RICE, J.R. (1975): Conditions for Localization of Deformation in Pressure Sensitive Dilatant Materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 23, 371-394
- RUMMEL, F. (1969): Studies of Time-Dependent Deformation of Some Granite and Eclogite Samples Under Uniaxial, Constant Compressive Stress and Temperatures up to 400°C. *Z. Geophys.*, 35, 17-42.
- SALUSTOWICZ, A. (1965): Der Gebirgsdruck auf den Streckenausbaue als Funktion der Zeit. *Abh. Dt. Akad. Wiss.*, 6. Ländertreffen Internat. Büro Gebirgsmech., 85-109. Akademie Verlag, Berlin
- SANTARELLI, F.J. and BROWN, E.T. (1987): Performance of Deep Wellbores in Rock Having a Confining Pressure-Dependent Elastic Stiffness. In: Herget, G. and Vongpaisal, S. (eds.): *Proc. 6th Int. Congr. ISRM*, Montreal, 1217-1222, Balkema, Rotterdam
- SCHÄDEL, K. und DIETRICH, H.-G. (1982): Results of the Fracture Experiments at the Geothermal Research Borehole Urach 3. *The Urach Geothermal Project*, 323-343, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- SCHOLZ, C.H. (1988): The Brittle-Plastic Transition and the Depth of Seismic Faulting. *Geol. Rundschau*, 77/1, 319-328
- SCHOLZ, C.H. and KOCZYNSKI, T.A. (1979): Dilatancy Anisotropy and the Response of Rock to Large Cyclic Loads. *J. Geophys. Res.*, 84(B10), 5525-5534
- SIMMONS, G.R. (1985): In Situ Experiments in Granite in Underground Laboratories. In: CÔME, B., JOHNSTON, P., and MÜLLER, A. (Eds.): *Design and Instrumentation of In Situ Experiments in Underground Laboratories for Radioactive Waste Disposal*. A.A. Balkema, Rotterdam Boston
- SNYDER, M.D. and BATHE, K.J. (1977): *Formulation and Numerical Solution of Thermo-Elastic-Plastic And Creep Problems*. MIT Rep. 82448-3, Cambridge, Mass.
- TEUFEL, L.W. (1985). Insights into the Relationship between Wellbore Breakouts, Natural Fractures, and In-Situ Stress. *Proc. 26th US Symp Rock Mech.* Rapid City, 1199-1206, A.A. Balkema, Rotterdam - Boston
- VAN DILLEN, D.E., FELLNER, R.W., and EWING, D.E. (1981): *Modernization of the BMINES Computer Code. Vol. I: User's Guide (BMINES Computer Program for Analytical Modeling of Rock/Structure Interaction)*. Agbabian Associates, Rep. U-7910-5117, El Segundo, CA
- VARDAR, M. (1977): Zeiteinfluß auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln. *Veröff. Nr. 72*, Inst. Bodenmech. Felsmech. Univ. Karlsruhe
- VARDOULAKIS, I., SULEM, J., and GUENOT, A. (1988): Borehole Instabilities as Bifurcation Phenomena. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, 159-170
- VERNIK, L.I., KUZNETSOV, Y.I., MEDVEDEV, R.V., and TURTCHANINOV, I.A. (1987): Physico-Mechanical Properties. In: KOSLOVSKY, Y.A. (ed.): *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*. 394-404, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo
- WALLNER, H., GRÜN, G.U. und NEUGEBAUER, H.J. (1987): Der Einfluß druckkontrollierter Permeabilität auf Fluidtransportphänomene im Gestein - Quantitative numerische FE-Simulation, In: HÄNEL, R. und SCHOPPER, J.R. (ed.) *KTB-Report 87-2: Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik*, 209-218
- WALSH, J.B. (1965a): The Effects of Cracks on the Compressibility of Rock. *J. Geophys. Res.*, 70(2), 381-389

- WALSH,J.B.(1965b): The Effects of Cracks in Rock on Poisson's Ratio. *J. Geophys. Res.*, 70(20), 5249-5257
- WALSH,J.B. and DECKER,E.R.(1966): Effect of Pressure and Saturating Fluids on the Thermal Conductivity of Compact Rock. *J.Geophys.Res.*, 71, 3053-3061
- WEERTMAN,J. and WEERTMAN,J.R.(1975): High-Temperature Creep of Rock and Mantle Viscosity. *Ann.Rev.Earth Planet.Sci.*, 3, 293-315
- WITTKKE,W. and ERBAN (1985): Borehole Stability and Borehole Convergency. In: *Proc.2nd Int.Symp.Obs.Cont.Crust through Drilling*, 88, Seeheim; AWS Bonn
- ZIENKIEWICZ,O.C. and CORMEAU,I.C.(1974): Visco-Plasticity, Plasticity, and Creep in Elastic Solids. A Unified Numerical Solution Approach. *Int.J. Num. Meth.Engng.*, 8, 821-845
- ZOBACK,M.D. and BYERLEE,J.D.(1975): The Effect of Cyclic Differential Stress on Dilatancy in Westerly Granite Under Uniaxial and Triaxial Conditions. *J. Geophys. Res.*, 80(11), 1526-1530