

Universität (TH) Fridericiana zu Karlsruhe  
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Richard-Willstätter-Allee 2  
7500 Karlsruhe 1

**Bohrlochstabilität der kontinentalen Tiefbohrung:  
Materialuntersuchungen und  
statische Berechnungen**

G. Borm  
O. Natau



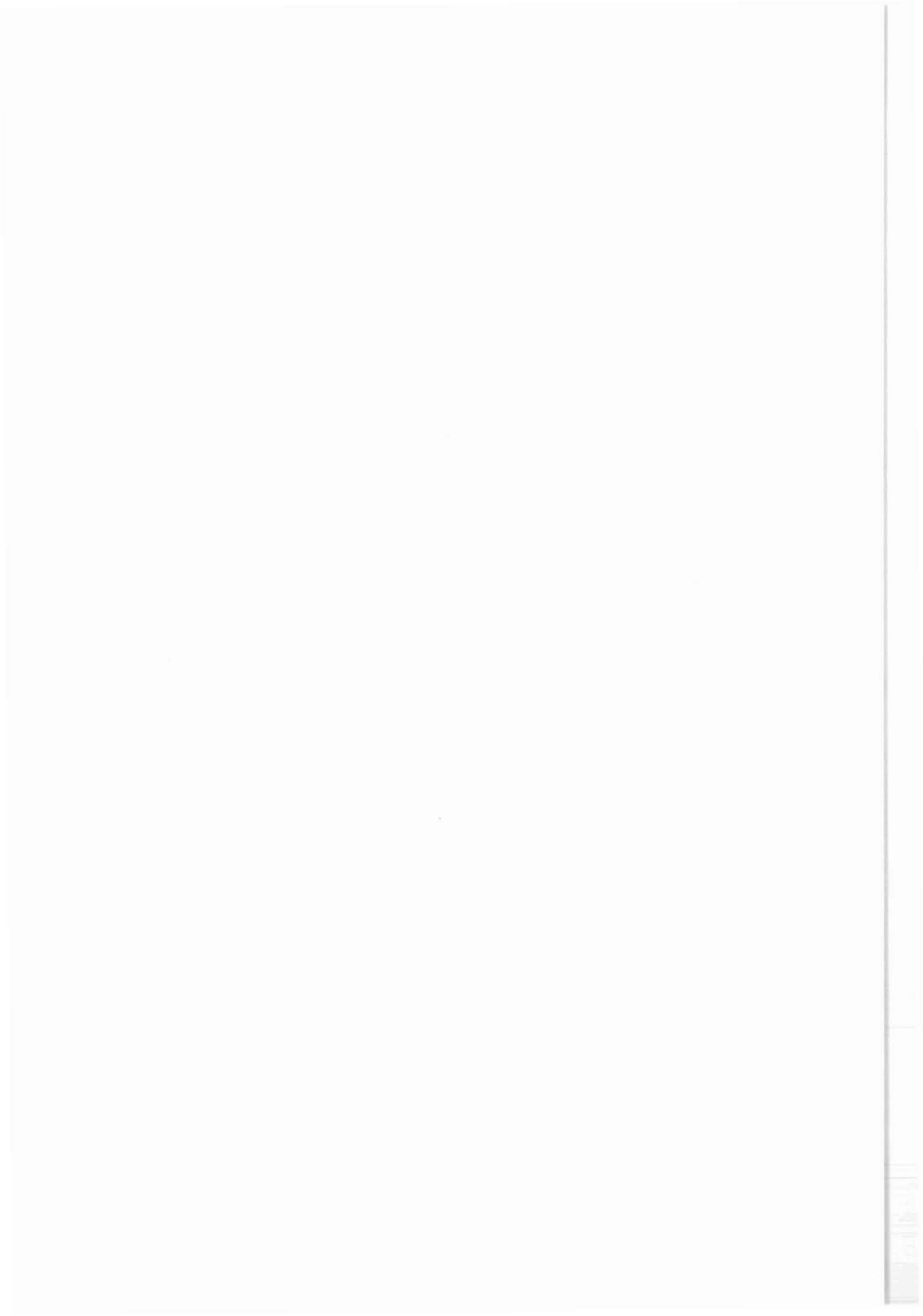
## VORWORT

Im vorliegenden Bericht wird eine erste Übersicht über Literatur und Stand des Wissens auf dem Gebiet der Materialuntersuchungen, Modellversuche und statischen Berechnungen zur Beurteilung der Stabilität der Kontinentalen Tiefbohrung gegeben.

Diese Zusammenstellung ist eine Ergänzung zu dem experimentellen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministers für Forschung und Technologie, Vertrags-Nr. 2-609 268 "Änderung von Festigkeitseigenschaften kristalliner Gesteine bei thermomechanischer Wechselbelastung im Hinblick auf die Bohrlochstabilität".

Die Ausführungen konzentrieren sich auf die zu erwartenden felsmechanischen Probleme in den mittleren und unteren Teufenbereichen der KTB-Hauptbohrung. Der Bericht ist so aufgebaut, daß er im Laufe der weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und der Diskussionen in der KTB-Arbeitsgruppe 3: "Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität" und den thematisch benachbarten Arbeitsgruppen 1, 4, 5, 7 und 9 ergänzt und fortgeschrieben werden kann. Mit Absicht wurde vermieden, ein theoretisches Formelwerk zusammenzutragen; für den interessierten Leser wird stattdessen eine umfangreiche Liste von Spezialliteratur zu diesem Themenkreis bereitgestellt.

Dem Bundesminister für Forschung und Technologie und der Projektleitung des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes beim Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung in Hannover danken wir für die Möglichkeit, an diesem wichtigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben beteiligt zu sein.



## INHALT

1.	EINFÜHRUNG .....	153
1.1	Problemstellung .....	153
1.1.1	Bohrlochstabilität .....	153
1.1.2	Bohrlochrandausbrüche .....	154
1.1.3	Bohrkernzerfall .....	154
1.2	Experimentelle Labormethoden .....	156
1.2.1	Felsmechanische Materialuntersuchungen .....	156
1.2.2	Felsmechanische Modellversuche .....	156
1.2.3	Mineralogische und petrographische Untersuchungen .....	157
1.2.4	Geophysikalische Labormethoden .....	157
1.2.5	Ingenieurgeologische Bohrkernaufnahmen .....	157
1.3	In-situ-Messungen .....	157
1.3.1	Gebirgsmechanische Parameter .....	157
1.3.2	Ingenieurgeologische Felduntersuchungen .....	158
1.3.3	Geophysikalische Bohrlochmessungen .....	158
1.4	Berechnungen zur Bohrlochstabilität .....	158
1.5	Bedeutung für KTB und allgemeine Geowissenschaften .....	159
2.	STOFFGESETZE, MODELLUNTERSUCHUNGEN .....	159
2.1	Raumgewicht .....	159
2.2	Thermische Eigenschaften .....	159
2.3	Materialmodelle .....	160
2.3.1	Elastisches Materialverhalten .....	160
2.3.2	Bruchmechanische Ansätze .....	160
2.3.3	Elastoplastisches Materialverhalten, Bruchformen .....	161
2.3.3.1	Trennbruch .....	161
2.3.3.2	Scherbruch .....	163
2.3.3.3	Materialentfestigung, Auflockerung, Dilatanz .....	163
2.3.3.4	Beulen, Knicken, Verzweigung .....	166
2.3.4	Rheologisches Materialverhalten .....	166
2.3.4.1	Linear viskoelastisches Materialverhalten .....	167
2.3.4.2	Nichtlinear viskoelastisches Materialverhalten .....	167
2.3.4.3	Temperatureinfluß .....	167
2.3.4.4	Kriechbruch .....	168
2.3.5	Porosität und Permeabilität .....	168
2.4	Festigkeitsuntersuchungen .....	168
2.4.1	Einachsige und dreiachsige Zylinderdruckversuche .....	169
2.4.2	Direkte Scherversuche an Trennflächen .....	169
2.4.3	Zugversuche .....	170
2.4.4	Kriech- und Relaxationsversuche .....	170
2.4.5	Wechselastversuche .....	170
2.4.6	Porositäts- und Permeabilitätsmessungen .....	172

2.5	Felsmechanische Modellversuche .....	175
2.5.1	Ebene Scheibenmodelle .....	175
2.5.2	Triaxiale Hohlzylinder-Druckversuche .....	175
<b>3.</b>	<b>ELASTISCHE BOHRLOCHMODELLRECHNUNGEN .....</b>	<b>179</b>
3.1	Analytische elastische Modelle .....	179
3.1.1	Ebener Verformungszustand .....	179
3.1.1.1	Dickwandiges elastisches Rohr .....	179
3.1.1.2	Poro-elastische Modelle .....	180
3.1.1.3	Bruchmechanische Modelle .....	181
3.1.2	Räumliche Modelle .....	181
3.1.2.1	Axialsymmetrische Modelle .....	181
3.1.2.2	Ungleichförmige äußere Gebirgsspannungen .....	181
3.2	Numerische Modelle .....	181
3.2.1	Ebene Finite Differenzen Modelle .....	182
3.2.2	Ebene Randintegral Element Modelle .....	182
3.2.3	Ebene Finite Element Modelle .....	184
3.2.3.1	Poroeelastische Modelle .....	184
3.2.4	Räumliche Modelle .....	184
3.2.4.1	Räumliche Randintegral Element Modelle .....	184
3.2.4.2	Räumliche Finite Elemente .....	184
<b>4.</b>	<b>ELASTOPLASTISCHE BOHRLOCHMODELLRECHNUNGEN .....</b>	<b>185</b>
4.1	Analytische oder semi-analytische Modelle .....	185
4.1.1	Ebener Verformungszustand .....	185
4.1.1.1	Lösungen für isotrope äußere Spannungen .....	185
4.1.1.2	Lösungen für biaxiale äußere Horizontalspannungen .....	185
4.1.2	Räumliche Modelle .....	187
4.2	Numerische elastoplastische Modelle .....	187
4.2.1	Charakteristikenverfahren .....	187
4.2.2	Ebene Finite Differenzen Modelle .....	187
4.2.3	Ebene Randintegral Element Modelle .....	188
4.2.4	Finite Element Modelle .....	188
4.2.4.1	Ebene Scheiben-Elemente .....	188
4.2.4.2	Räumliche Finite Element Modelle .....	189
4.3	Fels-hydraulische Modellrechnungen .....	190
<b>5.</b>	<b>RHEOLOGISCHE MODELLRECHNUNGEN .....</b>	<b>190</b>
5.1	Analytische viskoelastische Modelle .....	190
5.1.1	Ebener Verformungszustand bei isotroper äußerer Spannung .....	190
5.1.1.1	Lineare viskoelastische Modelle .....	190
5.1.1.2	Poroviskoelastisches Modell .....	191
5.1.1.3	Nichtlineare viskose Modelle .....	191
5.1.1.4	Elasto-viskoplastische Ansätze .....	191
5.1.2	Ebener Verformungszustand bei biaxialer äußerer Spannung .....	191
5.1.2.1	Lineare viskoelastische Modelle .....	191

5.1.2.2	Poro-viskoelastisches Modell .....	193
5.1.2.3	Nichtlineare viskose Modelle .....	193
5.1.2.4	Elasto-viskoplastische Ansätze .....	193
5.1.3	Räumliche Modelle .....	193
5.2	Numerische viskoelastische Modelle .....	194
5.2.1	Ebene Finite Differenzen Modelle .....	194
5.2.2	Ebene Randintegral Element Modelle .....	194
5.2.3	Ebene Finite Element Modelle .....	194
5.2.4	Räumliche Finite Element Modelle .....	194
5.2.5	Temperatureinfluß .....	194
6.	<b>PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG VON FINITE ELEMENT MODELL - BERECHNUNGEN ZUR BOHRLOCHSTABILITÄT .....</b>	<b>195</b>
6.1	Finite Element Programmsystem FELS .....	195
6.1.1	Preprozessorprogramm PREFELS .....	195
6.1.2	Hauptprogramm FELS .....	195
6.1.3	Postprozessorprogramme POSTFELS und ISOLA .....	196
6.2	Aufteilung der geometrischen Struktur in finite Elemente .....	196
6.2.1	Geometrie .....	196
6.2.2	Materialverteilung, Stoffgesetze und -parameter .....	196
6.2.3	Rand- und Anfangsbedingungen .....	198
6.3	Berechnung des primären Gebirgsspannungszustandes .....	198
6.3.1	Eigengewicht .....	198
6.3.2	Tektonische Spannungen .....	198
6.3.3	Thermische Anfangsspannungen .....	199
6.4	Bestimmung der sekundären Verformungs- und Spannungsfelder .....	199
6.4.1	Simulation des Bohrvorgangs .....	199
6.4.1.1	Elimination der Massen und Steifigkeiten .....	199
6.4.1.2	Spannungsumlagerungen und Konvergenzen .....	199
6.4.2	Thermomechanische Wechsellasten .....	200
6.4.3	Transportgleichungen für Spülung und Fluide .....	200
6.5	Darstellung der Ergebnisse .....	201
6.5.1	Verschiebungen und Verformungen .....	201
6.5.2	Spannungen und Festigkeits-Auslastungsquotienten .....	201
6.5.3	Plastische Zonen und Gleitlinien .....	201
6.6	Offene Probleme .....	202
7.	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION .....</b>	<b>203</b>
8.	<b>LITERATUR .....</b>	<b>208</b>



## 1. EINFÜHRUNG

Zusammen mit den hohen Drücken und Temperaturen in der tieferen Erdkruste und den dort zirkulierenden Gasen bewirken die hochgespannten wässrigen Lösungen, daß selbst die härtesten Gesteine verformbar und fließfähig werden. Die Fluide dringen in die Risse, Spalten und Poren ein und formen eine Zone erniedrigter Materialdichte und -festigkeit. Die Kontinentale Tiefbohrung soll diesen Bereich durchdringen und unverroht dauerhaft standsicher sein.

Im folgenden wird versucht, eine erste Übersicht über Literatur und Stand des Wissens auf dem Gebiet der Materialuntersuchungen und der statischen Berechnungen zur Beurteilung der Stabilität von Tiefbohrungen zu geben.

Einführende Literatur:

BEHR (1987), EMMERMANN (1986), KOSLOVSKY (1984), RISCHMÜLLER (1987)

### 1.1 Problemstellung

Die Bohrlochstabilität ist ein zentrales Problem für die technische Durchführung der Kontinentalen Tiefbohrung und die Gewährleistung eines geregelten Testprogramms. Sie betrifft die Verformungen und Spannungsumlagerungen am Bohrlochrand ebenso wie die thermisch und bohrtechnisch bedingten Einflüsse auf das Spannungsfeld im Bereich der Bohrlochwandung: Dort ist das Gebirge erheblichen thermo- und hydromechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt.

Die Spannungen im Gebirge lagern sich während und nach den Bohrarbeiten um. Durch Verformung des Gesteins verringert sich der Querschnitt des Bohrloches (Konvergenz), und durch Randausbrüche (Abschalungen und Scherbrüche) erweitert er sich.

Die Beobachtungen der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bohrlochgeometrie, die Interpretation der Randausbrüche und der Bohrlochablenkung, die Materialuntersuchungen zum Verformungs-, Festigkeits- und Entfestigungsverhalten unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen können zusammen mit den Spannungsmessungen und theoretischen Berechnungen wichtige Entscheidungshilfen für einen sicheren Bohrbetrieb und Erfolg bei der Kerngewinnung geben.

#### 1.1.1 Bohrlochstabilität

Die Standsicherheit des offenen Bohrloches ist eine Frage der Gesteinsfestigkeit, der mechanischen Beanspruchung, der Stützmaßnahmen und der Zeit. Mit der Zeit ermüdet das Material und verliert an Festigkeit; mit der Zeit relaxieren aber auch die deviatorischen Gebirgsspannungen und entlasten so die Bohrlochwand.

Die folgenden Aufgaben stehen im Zusammenhang mit Fragen zur Bohrlochstabilität:

- \* Quantitative Prognosen zur Standsicherheit der Tiefbohrung
- \* Analyse der Wirksamkeit von Stützmaßnahmen
- \* Untersuchung des Einflusses von Porendruckgradienten

- \* Erfassung der thermo-hydrmechanischen Effekte
- \* Berechnung der Randausbrüche in Abhängigkeit vom Stoffgesetz
- \* Bestimmung der Auskesselung durch Bohrspülungseffekte
- \* Ermittlung des Einflusses von gravitativen, tektonischen und bohrtechnisch bedingten Spannungen

Ausführliche allgemeine Übersichten zu Fragen der Bohrlochstabilität geben GUENOT (1987), KAISER & MALONY (1987) und MAURY (1987). Über einzigartige Erfahrungen mit der Stabilität der Kola-Tiefbohrung berichten ANDRIANOV et al.(1987).

ENGESER et al.(1987) beschreiben die physikalischen, chemischen und bohrtechnischen Eigenschaften der Spülmittel für die Kontinentale Tiefbohrung, die als thixotrope Flüssigkeiten die Bohrlochstabilität unterstützen sollen. KESSELS (1988) berichtet über deren Einfluß auf die Stabilität der KTB-Vorbohrung in den ersten 1500m.

### **1.1.2 Bohrlochrandausbrüche**

Bohrlochrandausbrüche stehen in direktem Zusammenhang zum Spannungszustand in situ und stellen sich vorwiegend in zwei diametral gegenüberliegenden Zonen an der Bohrlochwand in Richtung der kleinsten horizontalen Spannung ein (Abb.1). Ausbruchtiefe und -weite wachsen mit der Magnitude der horizontalen äußeren Spannungen.

Die Analyse der Bohrlochrandausbrüche umfaßt die theoretischen und experimentellen Untersuchungen von Scherbrüchen, Gleitkeilen, Trennrissen, Abschaltungen, Auskesselungen und hydraulischen Brüchen am Bohrlochrand.

Weiterführende Literatur:

BLÜMLING (1984), BLÜMLING et al.(1985), HAIMSON & HERRICK (1985), HICKMAN et al.(1985), PLUMB & HICKMAN (1985), TEUFEL (1985), ZOBACK et al.(1985)

### **1.1.3 Bohrkernzerfall**

Beim Freischneiden des Bohrkerns entspannt sich dieser und bildet überwiegend oberflächenparallele Extensionsrisse. Je nach ursprünglicher Einspannung und nach mechanischer Beanspruchung beim Herausbohren zerfällt der Kern in diskenförmige Scheiben (*Core Disking*) oder spaltet der Länge nach auf. Dazwischen gibt es Mischformen (Abb.2). Die Entspannungsdeformationen der Kerne aus großer Tiefe sind deutlich retardiert.

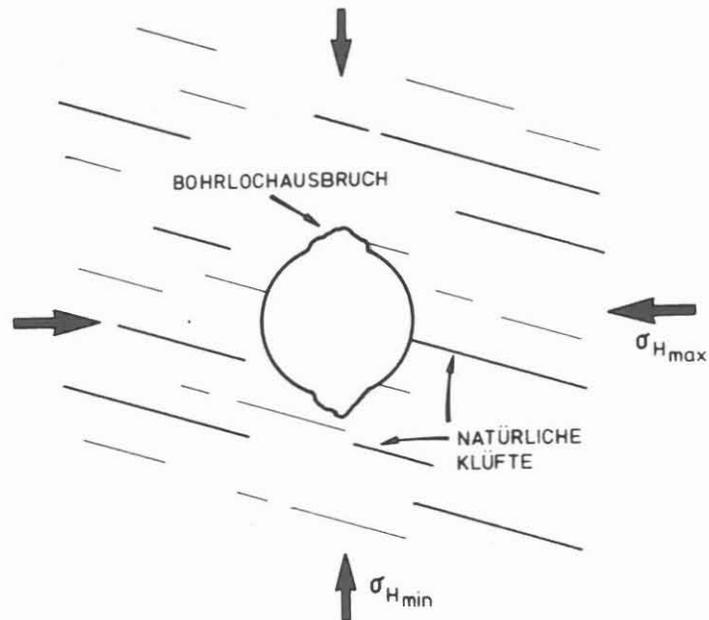


Abb.1: Schematische Orientierung der Bohrlochrandausbrüche im biaxialen horizontalen Spannungsfeld (TEUFEL, 1985)

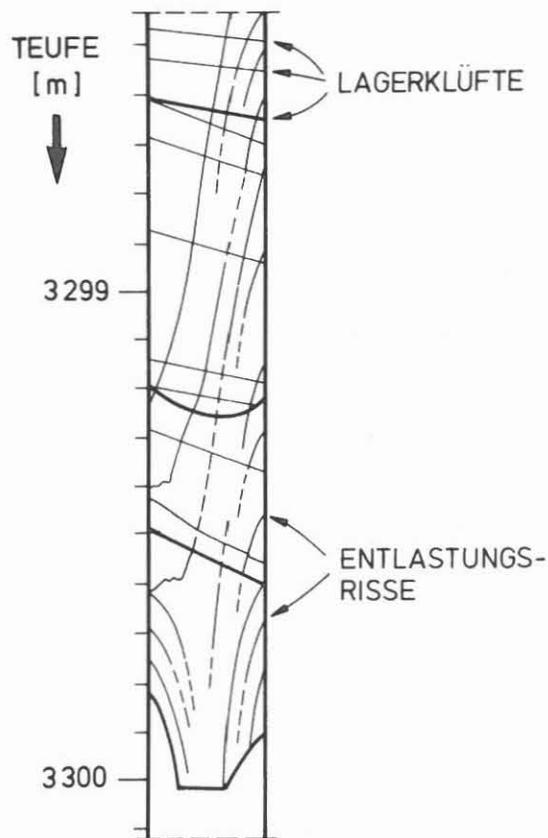


Abb.2: Entlastungsrisse an einem Granitbohrkern aus 3300m Tiefe (SCHÄDEL & DIETRICH, 1982)

Der Bohrkernzerfall hängt von Zusammensetzung, Gefüge (Textur, Trennflächenanordnung), Festigkeit, Anisotropie, Mikroriorientierung, in-situ-Spannungszustand und Gewinnungsteufe ab. Das Zerschlagen erfolgt schlagartig oder allmählich. Eine aufschlußreiche Zusammenstellung der Erfahrungen bei der Kerngewinnung der Kola-Tiefbohrung mit extensivem Core-Disking geben BASOVICH et al.(1987).

Weitere Literatur: BERCKHEMER et al.(1988), DURELLI et al.(1968), LEMPP & MÜHLHAUS (1985), OBERT & STEPHENSON (1965), SCHÄDEL & DIETRICH (1982), STACEY (1982), ZHU (1985)

## **1.2 Experimentelle Labormethoden**

Die experimentellen Labormethoden umfassen felsmechanische Materialuntersuchungen und Modellversuche, mineralogische und petrographische Untersuchungen, geophysikalische Methoden sowie ingenieurgeologische Bohrkernaufnahmen.

### **1.2.1 Felsmechanische Materialuntersuchungen**

Die felsmechanischen Materialuntersuchungen dienen der Bestimmung der Verformungs- und Festigkeitsparameter des kristallinen Gesteins bei höheren Drücken und Temperaturen.

In prozebrechnergesteuerten 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.

Im einfachsten Fall läßt sich die Gesteinsfestigkeit durch die Angabe von Kohäsion und Reibungswinkel beschreiben. Darüberhinaus hängt die Festigkeit von Temperatur, mittlerer Spannung, Gesteinsart, Be- oder Entlastungsgeschwindigkeit, Fluidgehalt, Porendruck, Mikrorißdichte, Verformung und Eigenspannung ab.

Zur Untersuchung des temperatur- und zeitabhängigen Materialverhaltens werden beheizte Kriech-, Relaxations- und Wechsellastversuche durchgeführt.

### **1.2.2 Felsmechanische Modellversuche**

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

### **1.2.3 Mineralogische und petrographische Untersuchungen**

Die Spannungen im Bohrlochnahbereich und bei der Kerngewinnung lassen sich über mikroskopisch gemessene Spannungskonzentrationen an kristallinen Korngrenzen bei Hochdruck-Untersuchungen abschätzen. Hierzu werden die Mikrorisse an Dünnschliffen analysiert, während Röntgenspektren die Möglichkeit zu Deformations- und Spannungs-Messungen mit Beugungsmethoden bieten. Ein Nachweis von Zug- und Druckzuständen an kristallinen Gesteinen ist möglich (HINZE, 1988). Die Spannungen verändern sich bei chemischen Reaktionen und Phasenumwandlungen.

### **1.2.4 Geophysikalische Labormethoden**

Die Eigenspannungen von Bohrkernen lassen sich aus Ultraschallmessungen über den Schließungsdruck von Mikrorissen oder durch retardiert elastische Verformungsmessungen ermitteln: BERKHEMER et al.(1985), HOLZHAUSEN & JOHNSON (1979b), REIK & VARDAR (1974)

Durch aktive und passive Ultraschallmethoden kann man darüberhinaus nachweisen, ob sich Dilatanz im Pre-Failure-Bereich einstellt und wann Trenn- oder Scherbruchbildung stattfindet: HADLEY (1975a,b).

Auch mit elektrischen Widerstandsmessungen an Kernproben kann man Informationen über Mikrorisse und Porosität gewinnen: BRACE (1975, 1977), KOWALLIS & WANG (1983).

### **1.2.5 Ingenieurgeologische Bohrkernaufnahmen**

Geochemische Korrosion und Lösungsvorgänge beeinflussen die Bohrlochstabilität. Die maßgeblichen Diffusionsmechanismen und Durchlässigkeiten werden ebenso wie der Einfluß von Gebirgsinhomogenitäten, Textur und Trennflächengefüge mit ingenieurgeologischen Methoden erkundet:

KAZANSKY et al. (1987), SCHETELIG & HEITFELD (1988), FECKER & REIK (1987)

## **1.3 In-situ-Messungen**

Die felsmechanischen, ingenieurgeologischen und geophysikalischen in-situ-Bohrlochmessungen geben die wichtigsten Aufschlüsse zu Fragen der Bohrlochstabilität.

### **1.3.1 Gebirgsmechanische Parameter**

Die Ermittlung der gebirgsmechanischen Parameter erfolgt über Bohrloch - Kalibermessungen, Durchlässigkeitsuntersuchungen, Dilatometermessungen und Bohrlochspannungsmessungen. Maßstabeffekte bei der Bestimmung der Verformungs- und Festigkeitsparameter beschreiben BIENIAWSKI (1967a) und HEUZE (1983) .

Weiterführende Literatur:

FECKER & REIK (1987), FUCHS & ZOBACK (1988), HEUZE (1980), KEHRER (1987), PRATT et al. (1977).

### **1.3.2 Ingenieurgeologische Felduntersuchungen**

Eine Übersicht über den aktuellen Wissensstand auf dem Gebiet der in-situ-Durchlässigkeitsmessungen in Granit untertage gibt SIMMONS (1985). Nach den in-situ-Messungen von BLACK (1983) unterscheiden sich die hydraulischen Eigenschaften von Gestein, Trennflächen und Rissen sehr; die hydraulische Leitfähigkeit ist eine Potenzfunktion der wirksamen äußeren Spannungen.

Weitere Literatur:

CARLSSON & OLSSON (1986), FECKER & REIK (1987), SCHETELIG & HEITFELD (1988)

### **1.3.3 Geophysikalische Bohrlochmessungen**

Die für die Bohrlochstabilität relevanten geophysikalischen Bohrlochmessungen sind neben der Bohrloch-Geothermik und den hydraulischen Bruchuntersuchungen die Bohrloch-Radar-, Televiever-, Akustik-Log- und akustischen Emissionsmessungen zum Nachweis von Auflockerung oder Bruchbildung.

Weiterführende Literatur:

BLÜMLING (1984), BLÜMLING et al. (1985), FRIEDMAN (1972), FUCHS & ZOBACK (1988), HÄNEL (1987), RUMMEL (1988), SENDER & THIERBACH (1987), TEUFEL (1985).

## **1.4 Berechnungen zur Bohrlochstabilität**

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.

Numerische Methoden werden verwendet, wenn keine entsprechenden analytischen vorhanden sind, z.B. bei unregelmäßiger Geometrie des Bohrlochs, heterogener Struktur des Gebirges, Auflockerungszonen und komplizierten Materialeigenschaften des Gesteins. Theoretisch können sie das thixotrope Stoffverhalten der Bohrspülung ebenso wie deren Temperatur- und Druckeinflüsse auf die Bohrlochstabilität berücksichtigen.

## **1.5 Bedeutung für KTB und allgemeine Geowissenschaften**

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 spröde/duktile-Übergangs von Geomaterialien (SCHOLZ, 1988).

Die Frage nach dem Einfluß von Permeabilität, Porendruck und Porendruckgradient auf die Stabilität von geologischen Körpern ist von übergeordneter Bedeutung auch für Seismologie, Tektonik und Lagerstättenkunde.

Die Erscheinung der hydraulischen Disaggregation von kristallinen Gesteinen bei der retrograden Metamorphose, die in situ erstmals in der Tiefbohrung auf der Halbinsel Kola beobachtet worden ist, hat möglicherweise einen signifikanten Einfluß auf die Interpretation der globalen Dynamik der kontinentalen Lithosphäre. Der Einfluß des Fluidgehalts auf Kriechen und Relaxation der Gesteine ist fundamental; er ist jedoch noch kaum erforscht.

Weitere Literatur:

BRACE (1972), KIRBY (1983), NEKUT et al. (1977), STACEY (1969)

## **2. STOFFGESETZE, MODELLUNTERSUCHUNGEN**

### **2.1 Raumgewicht**

Die Raumgewichte oder Materialdichten von Mineralien und Gesteinen sind tabelliert z.B. bei DÖRMANN (1952) oder DALY et al. (1966). Entsprechende Zahlenwerte für die durchteuften Gesteine der Kola-Tiefbohrung haben BAYUK et al. (1987) zusammengestellt.

### **2.2 Thermische Eigenschaften**

Die thermischen Eigenschaften beziehen sich auf Ausdehnungskoeffizient, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Zahlenwerte für Minerale und Gesteine gibt z.B. SKINNER (1966).

RICHTER & SIMMONS (1974) haben mehrere Ergußgesteine im Temperaturbereich zwischen 25°C und 500°C untersucht und festgestellt, daß die thermische Ausdehnung eine Funktion der Rißdichte, der Heizrate, der vorausgegangenen maximalen Temperatur ebenso wie der mineralogischen Zusammensetzung und der vorzugsweisen Kristall-Orientierung ist: Heizraten von über 2°C/min erzeugen neue Risse und bleibende Verformungen und reduzieren systematisch die Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Weiterführende Literatur:

CARSLAW & JAEGER (1960), CLARK (1966b), GALDIN et al. (1987), FRIEDMAN & LOGAN (1970), HEUZE (1983), VERNIK et al. (1987), WALSH & DECKER (1966).

## **2.3 Materialmodelle**

Grundlegende Einführungen in das Materialverhalten von Fels geben MÜLLER (1960,1963,1978) und JAEGER & COOK (1971).

### **2.3.1 Elastisches Materialverhalten**

Man unterscheidet 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.

Zahlenwerte sind z.B. bei GUTENBERG (1952), BIRCH (1966) und LAMA & VUTUKURI (1978, Vol.II, Ch.6 & 7) tabelliert.

Nichtlineare Elastizität wird als inkrementell linearisierte Spannungs-/Dehnungs-Beziehung mit veränderlichen Pseudo-Elastizitätsmoduln angenommen: BUDIANSKY & O'CONNELL (1976), HORII & NEMAT-NASSER (1983), WALSH (1965a,b).

### **2.3.2 Bruchmechanische Ansätze**

Lineare bruchmechanische Ansätze beschreiben Entstehung, Stabilität, Wachstum, Ausbreitung und Form von Mikrorissen und Sprödbrüchen. Die theoretischen Grundlagen sind von GRIFFITH (1920) und SIH & LIEBOWITZ (1968) entwickelt worden. Über felsmechanische Anwendungen berichten NEMAT-NASSER & HORII (1982) und HORII & NEMAT-NASSER (1985).

COSTIN (1983) zeigt, daß ein großer Teil der kontinuumsmechanisch interpretierten Verhaltensweisen von kristallinen Gesteinen unter monotonen Last- und Kriechbedingungen durch das Wachstum von Mikrorissen unter Zugbeanspruchung interpretiert werden kann. Die makroskopischen konstitutiven Gleichungen enthalten die Mikrorißdichte als innere Variable. Die Mikrorisse selbst sind vorzugsweise in Richtung der größten Kompressionsspannung orientiert.

KRANZ (1979b) erwähnt, daß die auf eine Felsprobe von außen aufgebrachte Spannung sich in Betrag und Richtung erheblich von den Mikrospannungen unterscheidet, die sich an den Korngrenzen einstellen. Nahezu alle Bruchformen im polykristallinen Gefüge seien Extensionsbrüche. KESSELS (1987) gibt eine Interpretation der Wirkung dieser Mikrospannungen auf die Stabilität des Gesteins bei der Tiefbohrung.

### 2.3.3 Elastoplastisches Materialverhalten, Bruchformen

Elastoplastisches Materialverhalten ist durch irreversible Verformungen gekennzeichnet. Es wird charakterisiert durch Bruchkriterium (Fließbedingung), Fließregel und Bruchform. Die elastoplastische Verformbarkeit und Festigkeit ist bei polykristallinen Gesteinen i.a. anisotrop.

Bruchkriterien beruhen auf Hypothesen der maximalen Spannung, maximalen Verformung oder der maximalen Energiedissipationsdichte. Die Fließregel ist zur Fließbedingung assoziiert oder - wie bei den meisten Gesteinen - nicht assoziiert (ZIENKIEWICZ & PANDE, 1977). Nach dem Bruch erfährt das Gestein eine Auflockerung (Dilatanz) und Entfestigung. Als Bruchformen von Gesteinen beobachtet man dabei Scherbruch, Zugriß und Mischformen. Sie sind über die Probe verteilt oder sind lokalisiert.

Kristalline Gesteinsproben erfahren bei der Belastung in vielen Fällen bereits vor dem Bruch deutliche plastische Verformungen sowohl in axialer wie in radialer Richtung. IRANI & KHAN (1987), die die Festigkeitseigenschaften von Granit-Hohlzylindern unter echt triaxialen Bedingungen geprüft haben, weisen darauf hin, daß für Granitgestein weder das Kriterium von MOHR (1900) noch das von DRUCKER & PRAGER (1952) das Bruchverhalten über den gesamten Spannungsbereich befriedigend beschreiben kann; es gelte hinreichend genau nur bei verhältnismäßig geringem Niveau der mittleren Spannungen. Dieses hatte bereits BIENIAWSKI (1967a) festgestellt. SANDLER & DiMAGGIO (1970) haben aus dergleichen Erfahrungen heraus das sog. Cap-Modell für Hochdruck-Verformung von Fels vorgeschlagen.

Grundlagenliteratur: MOHR (1900, 1914), VON MISES (1928), NADAI (1924, 1938, 1963), DRUCKER & PRAGER (1952).

Literatur über felsmechanische Materialuntersuchungen:  
BIENIAWSKI (1967b), HANDIN (1966, 1969), MOGI (1967, 1974), PENG & JOHNSON (1972), SCHOCK et al.(1973), TAPPONIER & BRACE (1976), WEVERSIK & BRACE (1971)

#### 2.3.3.1 Trennbruch

Der Trennbruch (Extensionsbruch) erfolgt überwiegend parallel zur Wirkungsrichtung der maximalen Druckspannung nach Überschreiten der Zugfestigkeit des Materials (Abb.3a, 4a).

Weitere Literatur:  
FRIEDMAN & LOGAN (1970), FRIEDMAN (1975), HOLZHAUSEN & JOHNSON (1979a), LEMPP & MÜHLHAUS (1985)

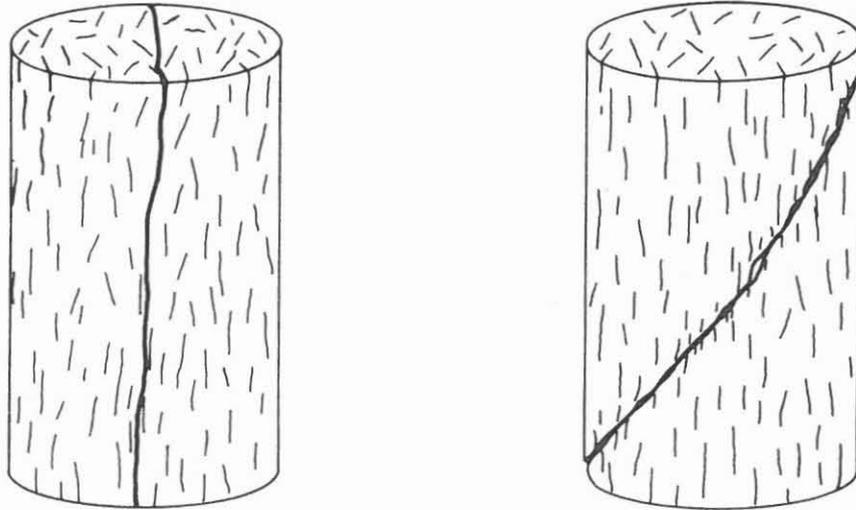


Abb.3: Schematischer Bruch einer Gesteinsprobe, (a) Trennfuge; (b) Scherfuge (HOLZHAUSEN & JOHNSON, 1979a)

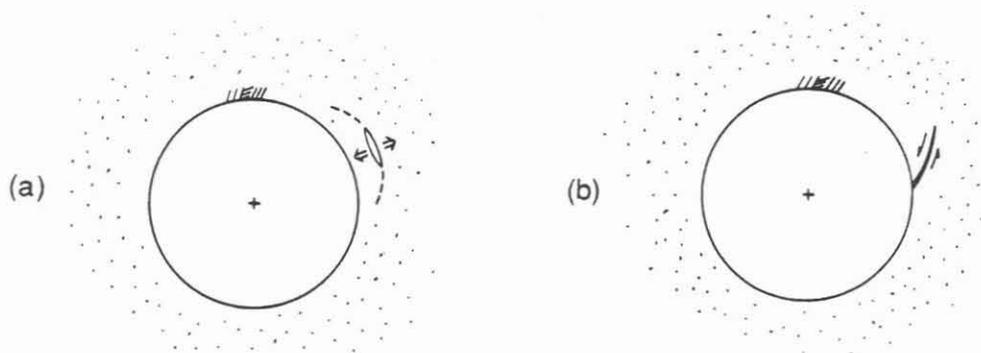


Abb.4: Schematischer Bruch am Bohrlochrand, (a) Trennfuge; (b) Scherfuge, (VARDOULAKIS et al., 1988)

### 2.3.3.2 Scherbruch

Der Scherbruch folgt tendenziell der Wirkungsrichtung der maximalen Schubspannung nach Überschreiten von Kohäsion und innerer Reibung des Materials (Abb.3b, 4b).

BRADLEY & FORT (1966), BYERLEE (1967), LOGAN (1975).

Weiterführende Literatur zur *anisotropen* Scherfestigkeit von Gesteinen findet man bei HILL (1950), JAEGER (1960), JOHN (1968), PARISEAU (1968), RUMMEL et al.(1978)

### 2.3.3.3 Materialentfestigung, Auflockerung, Dilatanz

Im Spannungsniveau um den Bruch findet bei kristallinen Gesteinen eine Gefügauflockerung statt, die mit einer ausgeprägten Änderung der festigkeitsmechanischen Parameter verbunden ist. Vor allem die starke Abnahme der Materialkohäsion bei vergleichsweise geringer Zunahme der plastischen Verformungen bewirkt einen erheblichen Festigkeitsverlust.

Nahe des Bruchpunktes des Gesteins werden bestehende Mikrorisse erweitert oder neu gebildet. Die induzierten Dilatanzrisse sind lang, schmal und überwiegend gerade mit scharfen Enden; neue Risse entstehen bevorzugt an Korngrenzen und verheilten, transgranularen Brüchen. Ab ca. 75% der Spitzenfestigkeit formieren sich neue transgranulare Brüche; die Rißdichte verdoppelt sich etwa bis zum Bruch (TAPONIER & BRACE, 1976). Die von den Mikrorissen im Gefüge ausgehenden Rißaufweitungen führen mit steigender Belastung zu Auflockerung mit Entfestigung (Abb.5 und 6).

Festes Material verliert rascher an Kohäsion als schwächeres. Gleichzeitig entstehen neue mechanisch wirksame Teilkörper; die Zahl der Rißflächen wächst, auf denen Reibung zwischen diesen Teilkörpern wirksam ist (LEMPP, 1988). Bei Belastungen der Probe bis zum Bruchpunkt bleibt in der Regel das Gefüge der Proben annähernd homogen und wird nicht durch weitreichende Brüche oder durchgehende Scherzonen verändert. Dennoch ist der Entfestigungsgrad erheblich. Wasserzugabe beschleunigt den Entfestigungsprozeß durch drastische Reduktion der inneren Reibung des Gesteins und durch Hydrolyse (GRIGGS, 1974). Der Einfluß des Wassers auf die Abnahme der Festigkeit ist nach den Untersuchungen von WONG (1982) bei höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur.

Im Bereich nach dem Bruch erfolgt die weitere Entfestigung je nach Art des Materials und nach Kinematik des Bruchs in unterschiedlicher Weise. Entweder tritt eine schlagartige Destabilisierung ein, oftmals gefolgt von einer erneuten Stabilisierung auf einem wesentlich niedrigeren Spannungsniveau, oder es erfolgt eine allmähliche Destabilisierung. Die Entfestigung verläuft bei fortschreitender Verformung nahezu kontinuierlich (Abb.7).

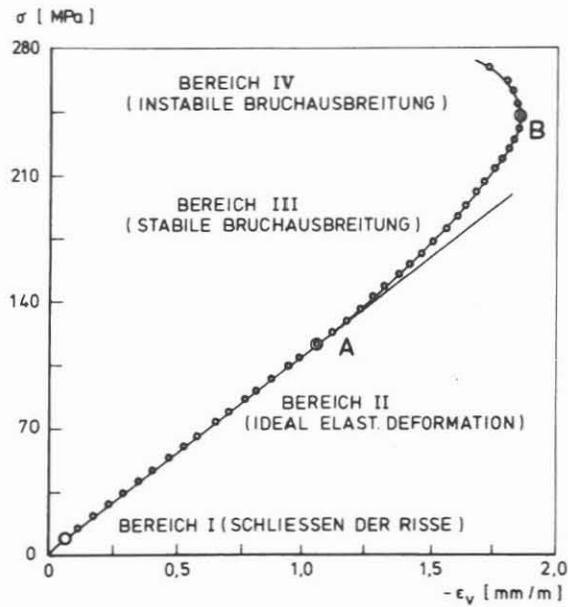


Abb.5: Schematische Kennlinie von volumetrischer Dehnung und axialer Spannung von kristallinem Gestein im einachsigen Zylinderdruckversuch (nach BIENIAWSKI, 1967a)

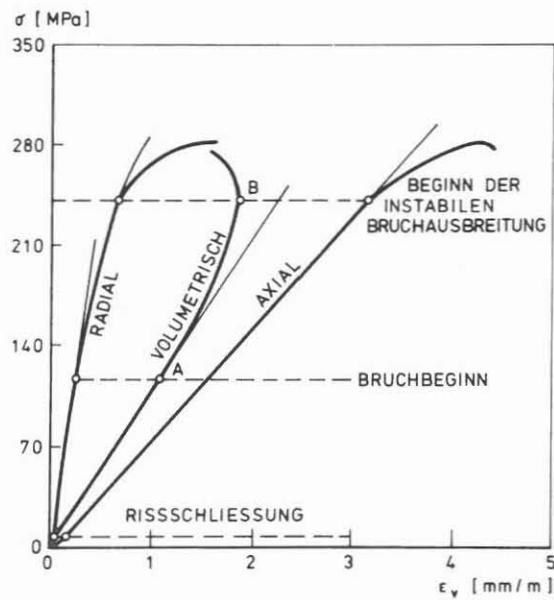
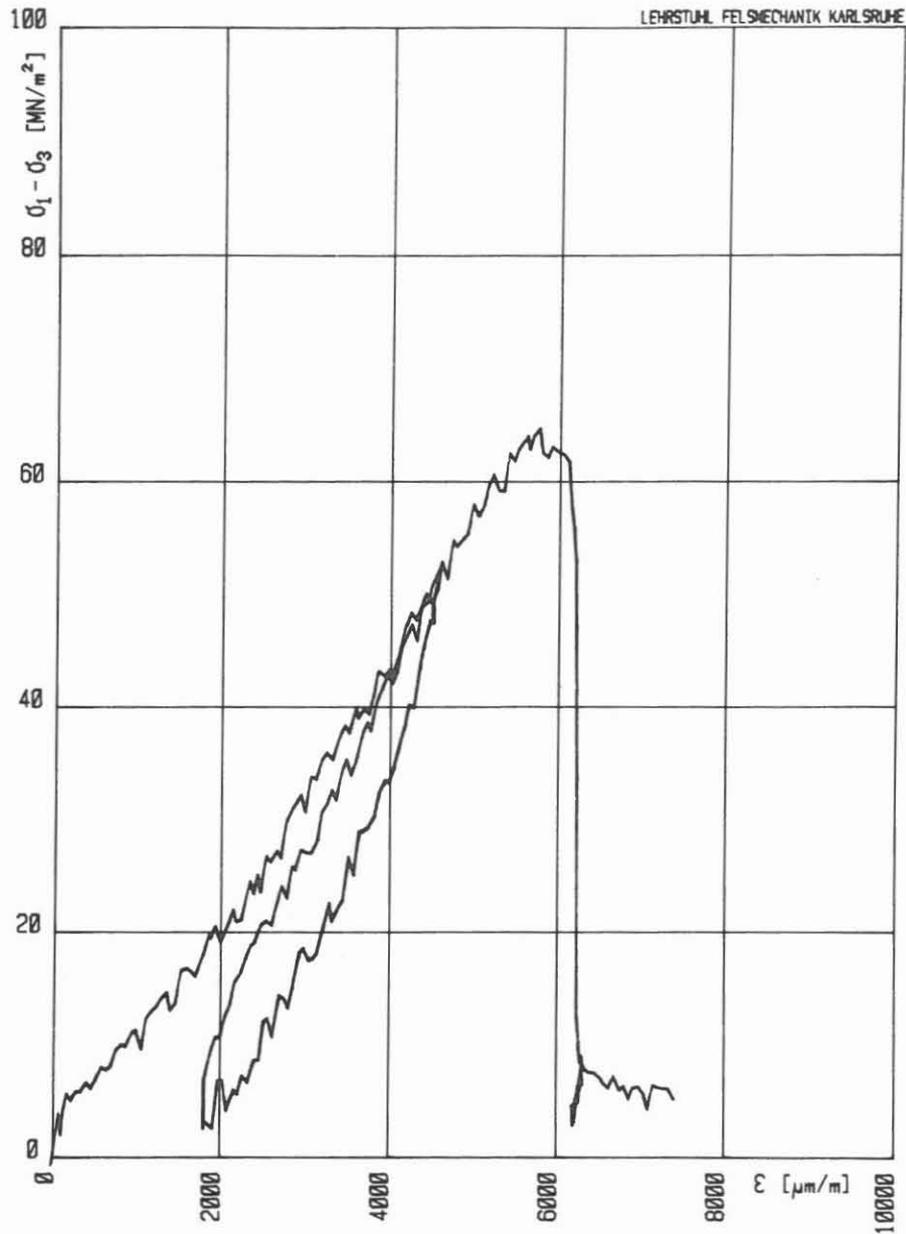


Abb.6: Schematische Kennlinien der radialen, axialen und volumetrischen Dehnungen und axialer Spannung von kristallinem Gestein im einachsigen Zylinderdruckversuch (nach BIENIAWSKI, 1967a)



HT-TRIAxIALVERSUCH: M1T25P65

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 650.2 bar Zelltemperatur: 249 °C

Max.  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ : 64.69 MN/m<sup>2</sup>

Abmessungen der Probe: H = 139.0 mm D = 70.2 mm H/D = 1.98

Abb.7: Einachsige Spannungs-/Dehnungs-Kennlinie von kristallinem Gestein im triaxialen Zylinderdruckversuch mit Entlastungszyklus und Entfestigungsphase (LEMPF & NATAU, 1988b)

Weiterführende Literatur:

ATKINSON (1980), BIENIAWSKI (1967a,b), BRACE et al.(1966), FRIEDMAN (1975), LEMPP & NATAU (1988a,b), PENG & PODNIEKS (1972), SCHOLZ (1972).

#### **2.3.3.4 Beulen, Knicken, Verzweigung**

Unter bestimmten Material- und Lastbedingungen ist bei einer monotonen Erhöhung der Belastung einer Gesteinsprobe neben der homogenen Deformation auch eine inhomogene Fortsetzung der Deformation möglich. Mathematisch spricht man von einer Verzweigung der Lösung. Da die inhomogene Deformation oft schon zu einem Stabilitätsverlust auf einem Niveau weit unterhalb der Festigkeit bei homogener Deformation führt, wird die Materialfestigkeit bei den konventionellen triaxialen Druckuntersuchungen in einigen Fällen systematisch unterschätzt.

Weiterführende Literatur:

CHENG et al.(1971), FAIRHURST & COOK (1966), MÜHLHAUS (1980), RICE (1975), RICE & SIMONS (1976), RUDNICKI (1977), RUDNICKI & RICE (1975), VARDOULAKIS (1988)

#### **2.3.4 Rheologisches Materialverhalten**

Einen Überblick über die zeitabhängigen Eigenschaften von Fels geben z.B. LAMA & VUTUKURI (1978, Vol.III, Ch.9).

Die zeitabhängigen Deformationen und Spannungsumlagerungen von natürlichem Gebirge werden durch die Stoffgleichungen der Rheologie bestimmt. Hinzu kommen die Anfangs- und Randbedingungen. Man unterscheidet zwischen visko-elastischem und viskoplastischem Verhalten. Dazwischen gibt es Übergänge.

Stoffe, die sich sowohl elastisch als auch viskos verhalten, heißen visko-elastisch. Viskoelastisches Verhalten wird durch linear oder nichtlineare Stoffansätze beschrieben. Häufig werden viskoelastische Stoffgesetze zunächst eindimensional formuliert und anschließend über die sog. Invariantentheorie (ODQVIST & HULT, 1962) dreidimensional erweitert. Dabei wird im allgemeinen vorausgesetzt, daß sich das Material volumentreu und isotrop verhält und der überlagerte isotrope Spannungsanteil keine Auswirkungen auf die Verzerrungen hat, sodaß ausschließlich der deviatorische Spannungsanteil das Stoffgesetz bestimmt. Man muß jedoch kritisch prüfen, ob die volumentreue Verformung des polykristallinen Gesteins in der Kriechphase wirklich realistisch ist, denn die Dilatanz wird bei solchen Materialansätzen ignoriert.

Die zeitabhängige Deformation unter konstanter Spannung heißt Kriechen: Es kann transient oder stationär sein oder durch progressive Beschleunigung in einen Kriechbruch münden. Das transiente Kriechverhalten wird durch logarithmische Ansätze oder durch zeit- oder dehnungsverfestigende Ansätze beschrieben. Für das stationäre Kriechen werden dagegen bevorzugt Potenz- oder Hyperbelsinus-Ansätze gewählt (vgl. Kap. 2.3.4.2).

#### **2.3.4.1 Linear viskoelastisches Materialverhalten**

Analogmodelle mit Feder- und Dämpfersystemen helfen der Anschauung bei der Beschreibung isothermer visko-elastischer Deformationen. Schon die einfachsten Modelle von MAXWELL, KELVIN und BURGERS vermögen zusammen, die Erscheinungsformen der elastischen Nachwirkung, des Kriechens und der Relaxation qualitativ wiederzugeben: JAEGER (1969), REINER (1971).

Die rheologischen Analogmodelle können bei passender Wahl der freien Parameter jeweils so eingestellt werden, daß sie die Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeiten von der Zeit für Laborproben unter konstanter Last oder nach Deformation zahlenmäßig hinreichend genau wiedergeben. Sie sind erfahrungsgemäß umso komplizierter, je mehr Meßreihen zur Verfügung stehen. Da sie aber keine Stoffgesetze im strengen Sinne darstellen, lassen sich ihre Ergebnisse nur in Sonderfällen auf Beobachtungen unter geänderten Spannungsbedingungen extrapolieren.

Zahlenwerte für Viskositätskonstanten von Gesteinen gibt z.B. CLARK (1966a).

#### **2.3.4.2 Nichtlinear viskoelastisches Materialverhalten**

Die rheologischen Deformationen der Gesteine hängen allgemein in nicht-linearer Weise von den Spannungen ab, wie zahlreiche experimentelle Beobachtungen gezeigt haben. Danach wird das Kriechen treffend durch logarithmische, Potenz-, Sinus hyperbolicus- oder kombinierte Ansätze beschrieben.

Weiterführende Literatur:

CARTER (1975, 1978), GRIGGS (1939), ROBERTSON (1964), SCHOLZ (1968), WEERTMAN & WEERTMAN (1975).

#### **2.3.4.3 Temperatureinfluß**

Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit und zu einem Verlust an Festigkeit (HANDIN & CARTER, 1979). Der Einfluß der Erhitzung auf die mechanischen Eigenschaften des Gesteins variiert jedoch stark je nach Zusammensetzung und Textur der Gesteine.

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, 1970).

#### 2.3.4.4 Kriechbruch

Durch Dauerbelastung oder häufige Lastwechsel verliert das Material mit der Zeit an Festigkeit; es ermüdet. SCHOLZ (1972) untersuchte experimentell die statische Ermüdung von monokristallinem Quarz in einachsigen Druckversuchen; er beobachtete zwar keine Kriechdeformation, aber daß die Geschwindigkeit der Mikrorißbildung einem Gesetz folgte, das dem transienten Kriechen mit Zeitverfestigungseffekt formal sehr ähnlich ist. Er schloß daraus, daß die statische Ermüdung von Gesteinen wohl das Ergebnis von Spannungskorrosion sei. Dieses fanden auch CRUDEN (1970, 1974) und MARTIN III (1972).

Weiterführende Literatur:

CARTER & KIRBY (1978), CARTER et al.(1981), ANDERSON & GREW (1976), KACHANOV (1961, 1986), KRANZ & SCHOLZ (1977), KRANZ (1979a, 1980), LAU et al.(1983), SAVAGE & MOHANTY (1969)

#### 2.3.5 Porosität und Permeabilität

GARG & NUR (1973) stellen fest, daß bei Gesteinen die konventionellen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen auf der Basis der effektiven Spannungen nach TERZAGHI den Effekt des Porendrucks weit überschätzen. Daher beschreiben RICE & CLEARY (1976) Ansätze für poroelastisches Materialverhalten von *verformbarem* Gestein mit *kompRESSIBlen* Fluiden.

Für kristalline Gesteine beträgt nach BRACE (1980) die Unsicherheit bei der Prognose von Permeabilitätskennwerten nicht weniger als fünf Zehnerpotenzen wobei die Permeabilität stark vom Spannungszustand in situ abhängt.

Weitere Literatur:

BRACE et al.(1968), BRACE (1972, 1980), BRACE et al.(1972), BLACK (1983), BAYUK et al.(1987), DEBSCHÜTZ et al.(1987), LAMA & VUTUKURI (1978) Vol.IV, Ch.12, RUDNICKI (1985), TEUFEL (1987), WALLNER et al.(1987)

#### 2.4 Festigkeitsuntersuchungen

Felsmechanische Materialuntersuchungen dienen der Ermittlung der thermomechanischen Verformungs- und Festigkeitsparameter der Gesteine in ein- und dreiachsigen Zylinderdruckversuchen, direkten und indirekten Zugversuchen, Scherverversuchen und Dauerstandsversuchen. Eine Literaturübersicht über Zahlenwerte der mechanischen, physikalischen und thermischen Eigenschaften von Granitgesteinen gibt z.B. HEUZE (1983).

### 2.4.1 Einachsige und dreiachsige Zylinderdruckversuche

Die Versuchssteuerung erfolgt über Kraft-, Weg- oder Energiesteuerung mit Hilfe von Prozeßrechnern und Servoreglern. Welche Prozeßsteuerung die mechanischen Vorgänge bei der Tiefbohrung nun am besten simuliert, ist noch nicht endgültig bestimmt.

BIENIAWSKI (1967a) und PENG & JOHNSON (1972) weisen darauf hin, daß durch den Einfluß der Endflächeneinspannung bei den triaxialen Standard-Druckversuchen sehr inhomogene Deformationen in den Probekörpern induziert werden können; auch würden Probenform und -größe das Festigkeitsverhalten von Fels in erheblichem Maß beeinflussen. Nach den Untersuchungen von BRADY (1969) ist die Bruchbildung dagegen relativ unabhängig von der Größe der mittleren Hauptspannung.

Besser als bei einachsiger Belastung läßt sich ein Gesteinsprüfkörper im triaxialen Kompressionsversuch durch mehrfache Belastung bis zum Bruchpunkt bei unterschiedlichen Seitendrücken allmählich destabilisieren. Das post-failure Verhalten kann man im Triaxialversuch mit Weg- oder Energieregulation detailliert untersuchen. Eine Reihe solcher Mehrstufentriaxialversuche an gleichartigen Prüfkörpern ermöglicht es, die festigkeitsmechanischen Veränderungen unmittelbar im Spannungsniveau des Bruches zu verfolgen.

Versuchstechnisch ist es sehr schwierig und aufwendig, den vollständigen Pfad des Entfestigungsprozesses, d.h. die laufenden Veränderungen der Parameter Reibungswinkel und Materialkohäsion, in systematischen Schritten mit zunehmender plastischer Gestaltsänderung über den Bruch hinaus bis hin zur endgültigen Destabilisierung der Probe unter kontrollierten Bedingungen nachzufahren. Von Versuchsstufe zu Versuchsstufe nehmen die plastischen Verformungen zu; meßbar ist eine Porositätsänderung des kristallinen Gefüges.

Standardversuchswesen:

(a) Einachsige Druckfestigkeit:

ISRM (1979), DGEG (1979a), VUTUKURI et al. (1974, Ch.2)

(b) Triaxiale Druckfestigkeit: DGEG (1979b), VUTUKURI et al. (1974, Ch.2)

Weitere Literaturlauswahl:

BIENIAWSKI (1967a), BRADY (1969), HOLZHAUSEN & JOHNSON (1979a), LEMPP & NATAU (1988a,b), DGEG (1979a,b), SPENCER & NUR (1976), WONG & BRACE (1979), WONG (1982)

### 2.4.2 Direkte Scherversuche an Trennflächen

Internationale Empfehlungen für die Durchführung von direkten Scherversuchen an natürlichen Gesteinstrennflächen gibt die ISRM (1974). Über experimentelle wissenschaftliche Untersuchungen zur Spitzen- und Restscherfestigkeit von Klufflächen berichtet LEICHNITZ (1981). Es ist aus heutiger Sicht jedoch eher unwahrscheinlich, daß das Trennflächengefüge für die Bohrlochstabilität in größeren Teufen eine entscheidende Rolle spielt.

### 2.4.3 Zugversuche

Direkte Zugversuche: BIENIAWSKI (1967b)

Empfehlungen zur Prüfung der Zugfestigkeit unter einachsiger Punktbelastung geben VUTUKURI et al. (1974, Ch.3) und DGEG (1982). Zugfestigkeitsprüfungen unter biaxialer Punktbelastung schlagen KUTTER & JÜTTE (1987) vor.

Gegenüber den direkten Zugversuchen und Punktlastversuchen haben die indirekten Zugversuche (*Extensionsversuche* durch Reduzierung der Axialspannung im triaxialen Zylinderdruckversuch bei hohem Radialdruck) eine erhebliche Bedeutung bei Materialuntersuchungen zur Bohrloch- und Bohrkernstabilität.

### 2.4.4 Kriech- und Relaxationsversuche

Kriechversuche werden standardmäßig als ein- oder dreiachsige Zylinderdruck-Dauerstandsversuche durchgeführt.

Stationäre Kriechversuche können unter konstanten Spannungen oder unter konstanten Dehnungsgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Nach KRANZ (1979) ergeben sich dabei jedoch sehr unterschiedliche Resultate.

Literaturauswahl:

CRUDEN (1970, 1974), LOMNITZ (1956), HEARD (1972), MISRA & MURRELL (1965), RUMMEL (1969), WU & THOMSEN (1973).

Relaxationsversuche sind wegen der großen Schwierigkeit ihrer Durchführung noch verhältnismäßig selten: HAUPT (1988). Man unterscheidet zwischen Spannungs- und Temperatur-Relaxationsversuchen. BIENIAWSKI (1967b) und PENG & PODNIEKS (1972) stellen die Theorie auf, daß man aus dem Spannungsrelaxationsverhalten sogar auf die Dauerfestigkeit des Gesteins schließen könne.

In polykristallinem Gestein ist die Spannungsrelaxation von sehr komplizierten Mechanismen (gefügebedingte Spannungsspitzen und slip-slick-Effekte) bestimmt (LEMPP & NATAU, 1987). Es tritt eine rege Wechselwirkung von intragranularer Kriechbewegung, Spannungsrelaxation sowie Mikrorißbildung auf. Die Kriech- und Relaxations-Kennlinien haben deshalb einen sehr un stetigen Verlauf (Abb.8).

### 2.4.5 Wechsellastversuche

LEMPP (1988) konnte experimentell nachweisen, wie sich die Materialentfestigung bei kristallinen Gesteinen vollzieht und wie sich Reibungswinkel und Kohäsion in der Bruchphase verändern: In den Wechsellastversuchen stellt man eine Abnahme der Kohäsion über mehrere Versuchsstufen fest; bezogen auf den ersten Bruch nimmt die Kohäsion durch die nachfolgenden, jeweils wiederum bis zum Bruch gesteigerten Belastungen sehr gleichmäßig ab.

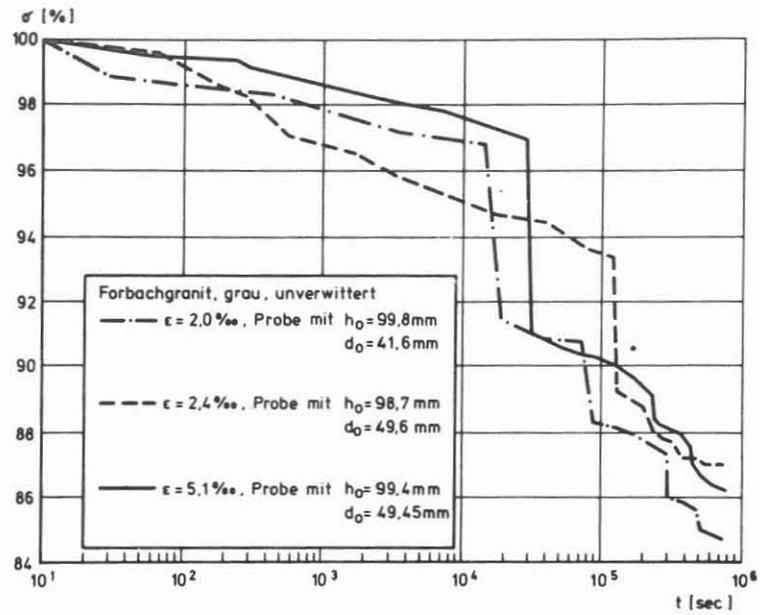


Abb.8: Spannungsrelaxations-Kennlinien von Granit bei Raumtemperatur (LEMPP & NATAU, 1987)

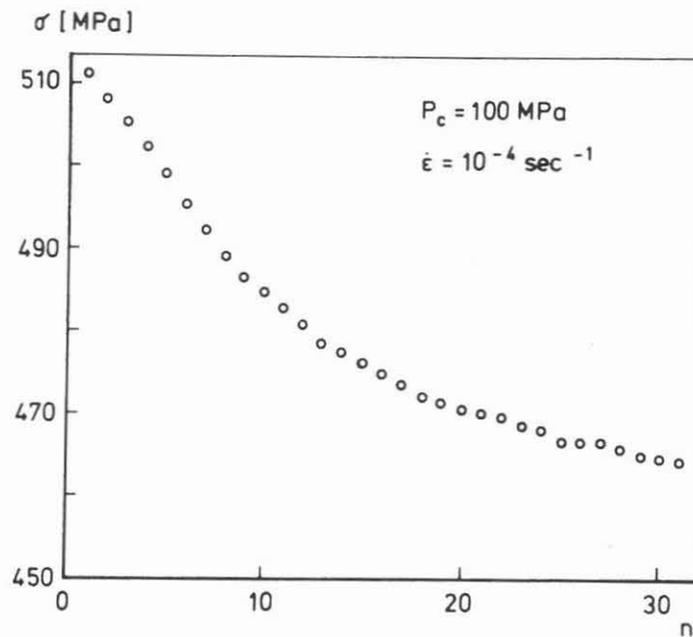


Abb.9: Spannungsrelaxations-Kennlinien von Granit im Wechsellastversuch unter Verschiebungsrandbedingungen (SCHOLZ & KOCZYNSKI, 1979)

SCHOLZ & KRANZ (1974) und SCHOLZ & KOCZINSKI (1979) untersuchten die Anisotropie des dilatanten Materialverhaltens und die Spannungsrelaxation unter Wechsellasten bei konstanten Verschiebungsrandbedingungen: Der Spannungsabbau erfolgte mit der Anzahl der Lastwechsel in gleicher Weise wie bei dem Ermüdungsverhalten unter Spannungswechselbedingungen (Abb.9, 10, 11).

Nach CHO & HAIMSON (1987) hängt die Materialermüdung an einem Bohrloch von der Spannungsamplitude und der Lastwechselfrequenz ab. Eine Festigkeitsabnahme tritt sowohl bei höheren Spannungsamplituden als auch bei längeren Lastwechselperioden ein. Die Energiedissipation pro Lastzyklus ist dabei ebenso wie die plastische tangentielle Dehnung etwa proportional zum Logarithmus der Zeit bis zum Erreichen des endgültigen Bruches.

HOLCOMB (1981) bestätigt die Ergebnisse von SCHOLZ & KRANZ (1974) und bemerkt, daß die Dilatanz reversibel ist: Das Material habe ein Gedächtnis für frühere Belastungen. Das Gedächtnis geht durch Überschreiten des ehemaligen maximalen Spannungszustandes oder durch exzessive Lastwechselanzahl verloren. Dieses kann man sich durch Messung der akustischen Emissionen nachweisen, die immer dann verstärkt auftreten, wenn das Gedächtnis verloren gegangen ist. Hierauf beruht der sog. *Kaiser-Effekt*, der für Eigenspannungsmessungen eine gewisse Rolle spielt.

Weitere Literatur:

BRACE & BOMBALAKIS (1963), ATTEWELL & FARMER(1976), COSTIN & HOLCOMB (1981), CHO & HAIMSON (1987), HADLEY (1976), KURITA et al.(1980), LEMPP & NATAU (1988a,b), WONG (1982), ZOBACK & BYERLEE (1975a)

#### **2.4.6 Porositäts- und Permeabilitätsmessungen**

Eine umfassende Übersicht zu Porositäts- und Permeabilitätseigenschaften von westamerikanischen Granitgesteinen gibt HEUZE (1983). Grundlegende Spezialuntersuchungen zu diesem Problembereich haben u.a. auch NUR & BYERLEE (1971) und ZOBACK & BYERLEE (1975b) ausgeführt.

TEUFEL (1987) hat in drainierten triaxialen Druckversuchen an vorgebrochenen Sandsteinproben festgestellt, daß die Permeabilität auf den Bruchflächen wegen der Bildung von feinen Mylonitzonen mit zunehmender Scherdeformation abnimmt. Er konnte aber auch beobachten, daß sich parallel zur Scherzone schmale Kanäle mit hoher Permeabilität ausbildeten.

RUTTER (1972) hat bei Verformungsuntersuchungen an Kalk- und Sandsteinen unter Variation des Flüssigkeitsdruckes herausgefunden, daß sich das Gestein bei hohem Porenwasserüberdruck selbst bei extremen äußeren Belastungen weitgehend elastisch und spröde verhält.

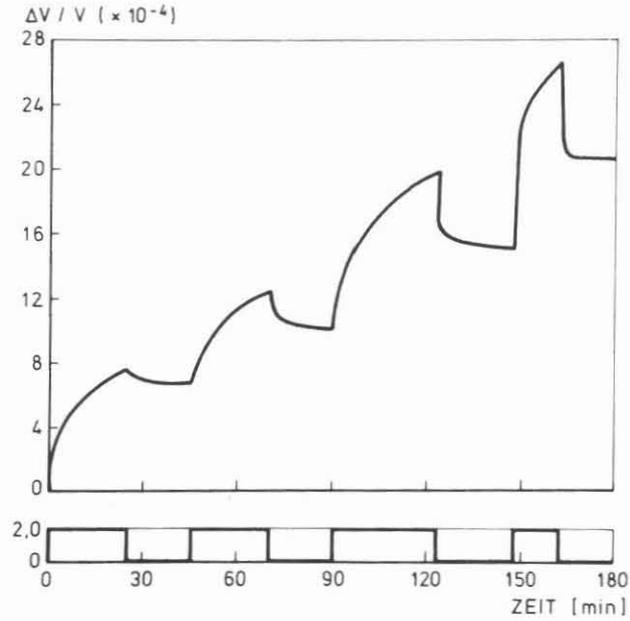


Abb.10: Dilatanz einer Granitprobe im Kriech-/Relaxations-Versuch. nach (SCHOLZ & KRANZ, 1974). Auf der Zeitachse ist zusätzlich die Belastungsgeschichte aufgetragen

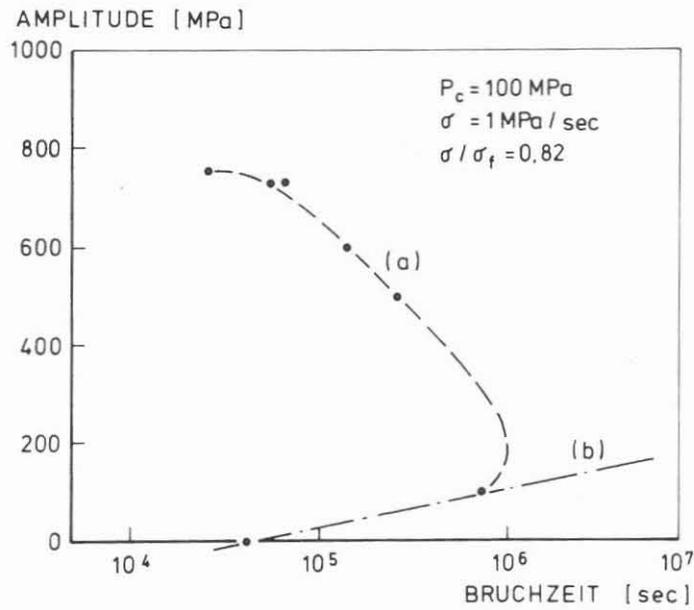
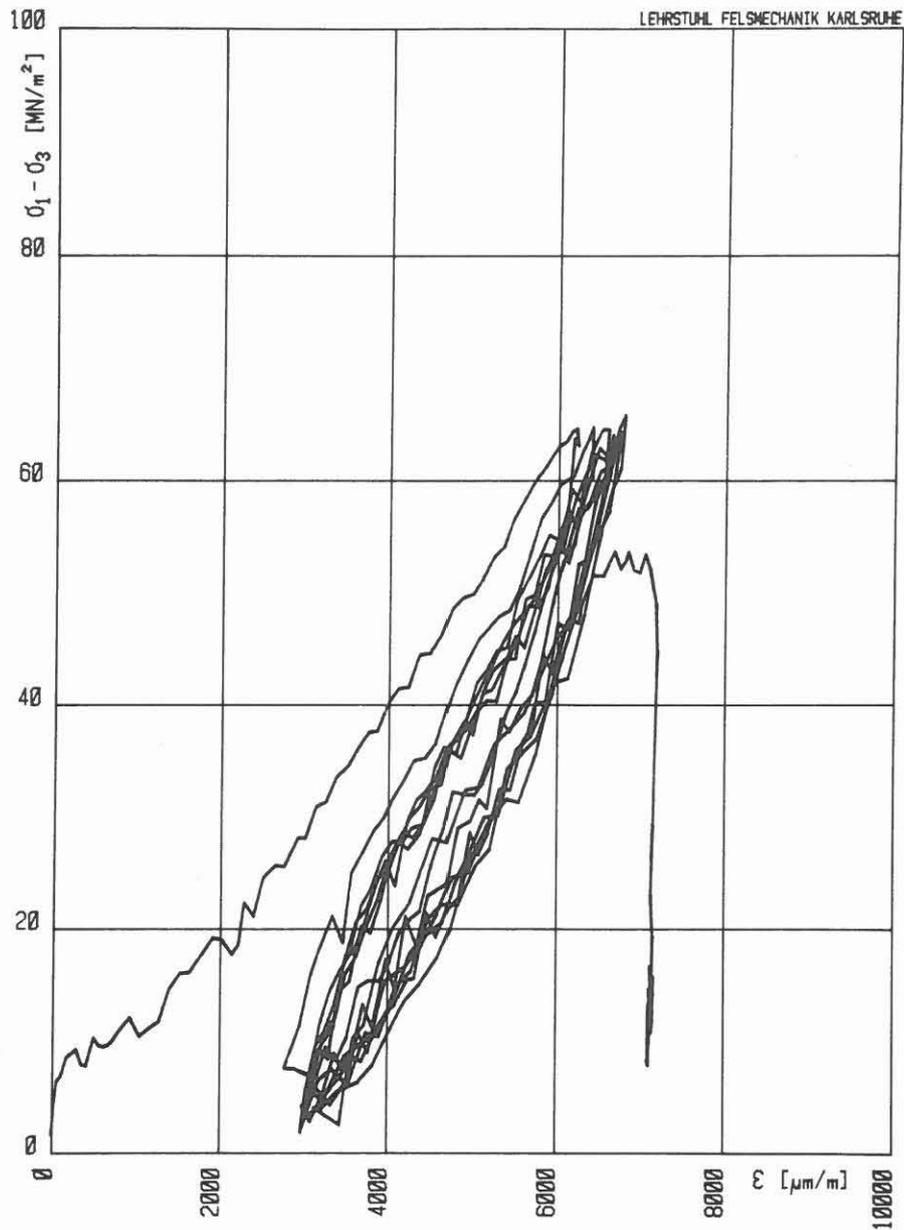


Abb.11: Einfluß der Amplitude von Wechsellasten auf die Zeit bis zum Bruch von Granit. (a) dynamische Ermüdung; (b) statische Ermüdung, nach (SCHOLZ & KOCZYNSKI, 1979)



HT-TRIAxIALVERSUCH: M5T25P65 von 0 bis 14 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 646.9 bar Zelltemperatur: 250 °C

Max.  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ : 65.87  $\text{MN/m}^2$

Abmessungen der Probe: H = 133.9 mm D = 70.0 mm H/D = 1.91

Abb.12: Spannungs-/Dehnungs-Hysteresen beim triaxialen Wechsellastversuch an Granitproben (LEMPP & NATAU, 1988b)

## 2.5 Felsmechanische Modellversuche

Felsmechanische Modellversuche sind z.T. photoelastisch an Plexiglasstrukturen, z.T. durch biaxiale Druckversuche an Rechteckscheiben aus synthetischem Material oder durch biaxiale und triaxiale Druckversuche an Gesteinsquadern, die eine Bohrung enthalten, durchgeführt worden. Korrekte Modellgesetze für die Dimensionsanalyse haben z.B. GAY (1973) und GÖRTLER (1975) zusammengestellt.

### 2.5.1 Ebene Scheibenmodelle

(a) Photoelastische Modelle (Abb.13): VARDAR (1972); ZHENG (1988).

(b) Biaxiale Druckversuche: FEDER (1978), RUMMEL (1975).

Die biaxialen Modellversuche von VARDAR (1972) zeigen Neubrüche in der Umgebung des Hohlraumes erwartungsgemäß immer dann, wenn unmittelbar nach dem Ausbruch die Tangentialspannung in der Nähe der einachsigen Druckfestigkeit des Materials liegt. Hauptmerkmal bei diesen Bruchprozessen ist, daß die Bruchfortpflanzung nicht kontinuierlich sondern in bestimmten Zeitabständen erfolgt. Beim homogenen und isotropen System werden je nach Verhältnis der Spannungen radial gerichtete, konzentrische und ohrenförmige Brüche festgestellt (Abb.14).

Ein kuriose Beispiel für einen Modellversuch liefern PÉRIÉ et al.(1988): In einen Sack voller Weizenmehl wird ein zylindrisches Hohlrohr gesteckt und wieder herausgezogen, wobei ein temporär relativ standfestes kreisförmiges Bohrloch entsteht. Durch seitliches Zusammendrücken des Mehlsackes mit den Händen entstehen am Bohrloch ungleichförmige Spannungskonzentrationen, die zu anschaulichen Abplattungen und Ausbrüchen an der Bohrlochwand führen.

### 2.5.2 Triaxiale Hohlzylinder-Druckversuche

(a) Hohlzylinder-Druckversuche:

FJÆR et al.(1987), GAY (1973), HOSKINS (1969), IRANI & KHAN (1987)

GAY (1973) berichtet, daß der Bruch an den kreisförmigen Modellbohrlöchern durch Scherung an diametral gegenüberliegenden Bereichen beginnt und sich durch Abschaltungen so lange fortsetzt, bis die gesamte Probe kollabiert (Abb.19).

(b) Quader mit Bohrung:

BANDIS et al.(1987), EWY et al.(1987), DEY & KRANZ (1987), HAIMSON & HERRICK (1985)

BANDIS et al.(1987) werteten die Bruchkonturen mit Hilfe einer elastoplastischen Gleitlinienkonstruktion aus, wie sie z.B. NADAI (1924) formuliert hat: Als Gleitlinien ergeben sich Scharen von logarithmischen Spiralen, deren Verschneidungswinkel direkt vom Reibungsbeiwert des Materials abhängen (Abb.15).

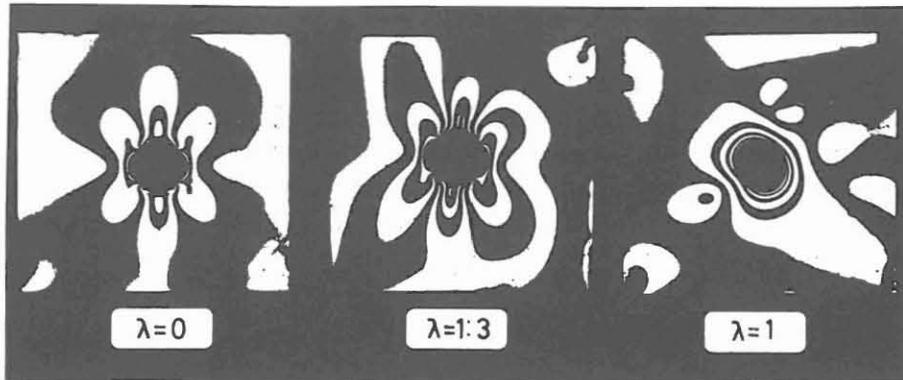


Abb.13: Photoelastische Aufnahmen einer gelochten Plexiglasscheibe unter verschiedenen Seitendruckverhältnissen (VARDAR, 1973)

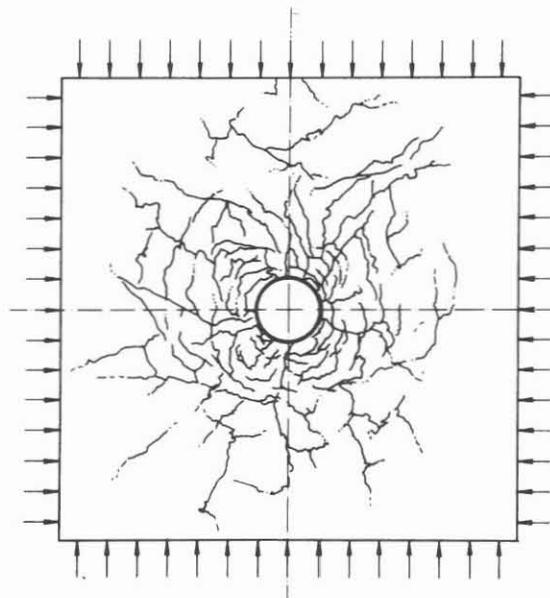


Abb.14: Brucherscheinungen um einen Modellhohlraum im biaxialen Druckversuch mit einem Seitendruckverhältnis von 1:3; (VARDAR, 1973)

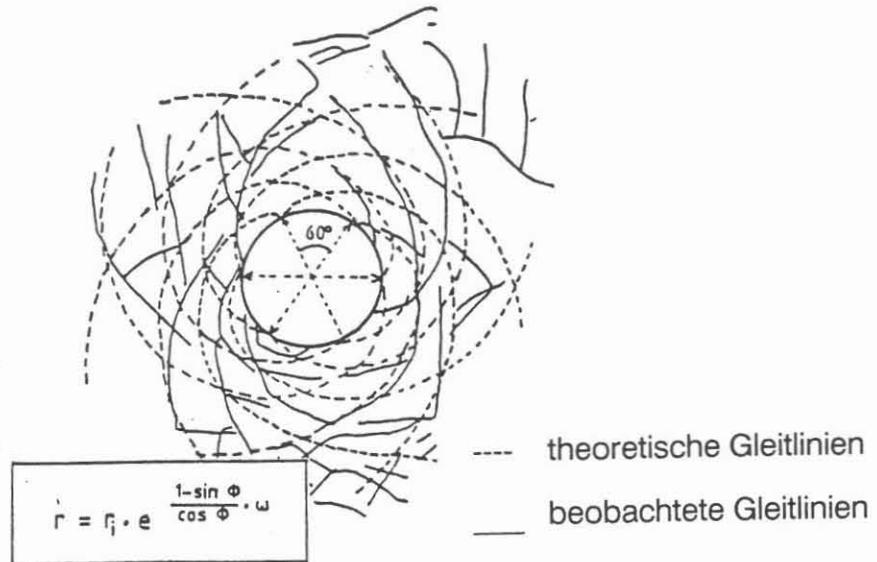


Abb.15: Beobachtete und theoretische Gleitlinien im Bohrlochmodellversuch von BANDIS et al. (1987)

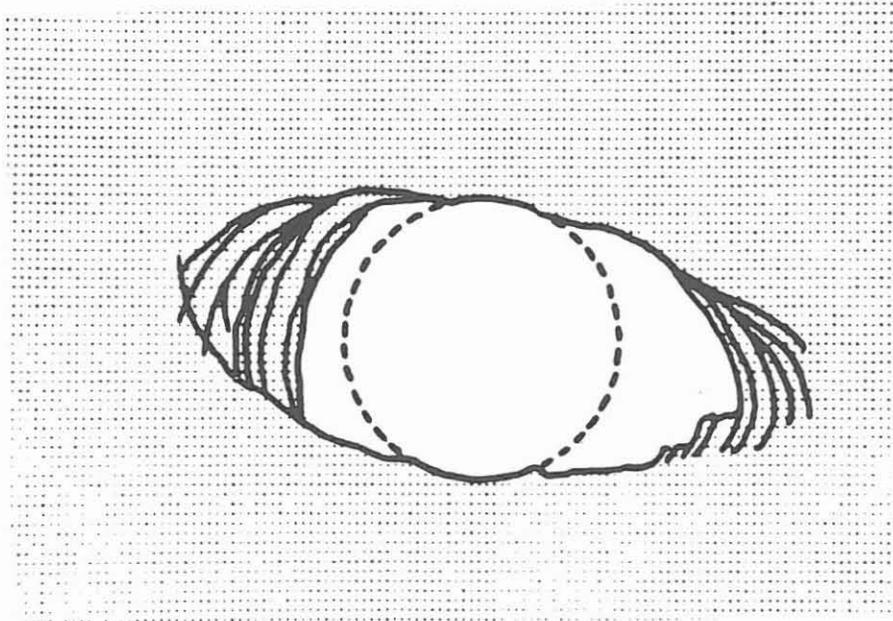


Abb.16: Bohrlochrandausbrüche im Hohlzylinderdruckversuch von FJÆR et al. (1987)

## BRUCHFORMEN AN DER BOHRLOCHWAND

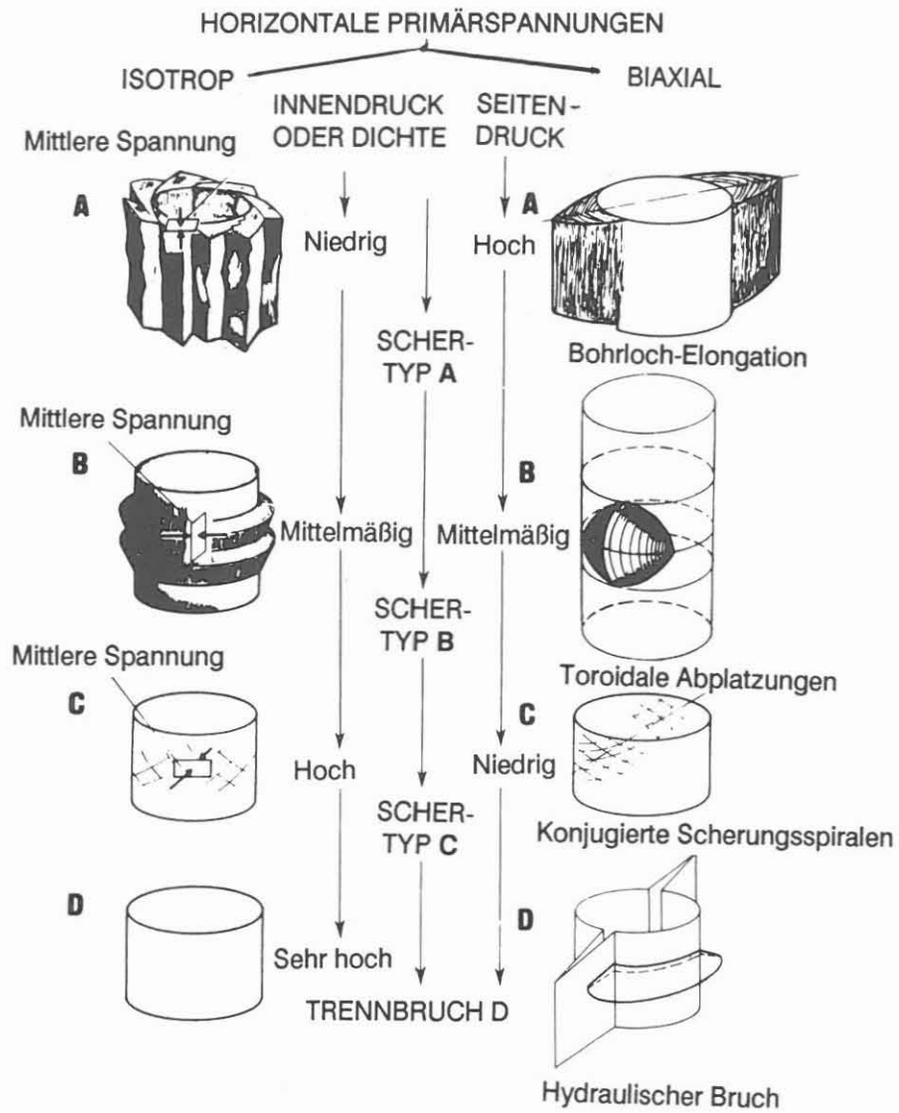


Abb.17: Schematische Bruchformen am Bohrlochrand für (links) isotrope und (rechts) biaxiale äußere horizontale Gebirgsspannungen nach MAURY (1987)

Die Betrachtung von isolierten Gleitlinien vereinfacht die Verhältnisse in der Natur erheblich; tatsächlich muß man das Zusammenspiel aller auftretenden Diskontinuums-Elemente beachten: Die Gleitzonen entfalten sich scharenweise gestaffelt zum Teil simultan, zum Teil sequentiell und progressiv. Die Gleitflächen können auch übergangslos in Abtrennungsflächen umschlagen (Abb.16).

MAURY (1987) faßt die Analysen von GUENOT (1987) von Bohrlochmodelluntersuchungen bei isotropen und anisotropen äußeren Spannungen zusammen (Abb.17):

**Bruchtyp A:** Die mittlere Spannung ist die axiale Spannung, und der Innendruck ist vernachlässigbar. Der Bruch entsteht in Scherflächen, die parallel zur Axialspannung ausgerichtet sind. Wenn die horizontalen Spannungen anisotrop sind, nimmt das Bohrloch eine elliptische Form an.

**Bruchtyp B:** Die mittlere Spannung ist die tangentielle Spannung, und der Innendruck ist mäßig. Die Ausbrüche haben eine toroidale Form.

**Bruchtyp C:** Die mittlere Spannung ist die radiale Spannung, und der Innendruck ist hoch. Die Bohrlochrandausbrüche haben die Form von mehrscharigen Scherflächen, die einander radien-parallel schneiden.

**Bruchtyp D:** Sehr hoher Innendruck induziert einen hydraulischen Bruch mit isolierten, vertikal stehenden Extensionsflächen, die sich parallel zur Richtung der äußeren Hauptdruckspannung orientieren.

### **3. ELASTISCHE BOHRLOCHMODELLRECHNUNGEN**

Die Gestalts- und Volumenänderungen von Festkörpern unter dem Einfluß äußerer Kräfte werden in der Kontinuumsmechanik durch die konstitutiven Gleichungen (Stoffgleichungen) 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. Die einfachste Näherung für das Spannungs- / Verformungsverhalten von Fels ist der elastische Ansatz: Bei ideal elastischen Körpern sind die Spannungskomponenten lineare Funktionen der Verformungskomponenten.

#### **3.1 Analytische elastische Modelle**

##### **3.1.1 Ebener Verformungszustand**

###### **3.1.1.1 Dickwandiges elastisches Rohr**

Erstaunlicherweise wurde ausgerechnet nach dieser elastischen Methode die Stabilität der Kola-Tiefbohrung abgeschätzt (ANDRIANOV et al., 1987).

Angenommen wird:

- (1) Ebener Formänderungszustand im Berechnungsquerschnitt
- (2) kreisförmige Geometrie des Bohrlochs
- (3) Isotroper Innendruck im Bohrloch
- (4) Isotropes, isothermes, elastisches Verhalten des Gebirges

Gesucht sind:

- (a) Radiale, tangentielle und axiale Spannungen am Bohrlochrand und im Gebirge
- (b) Radiale und tangentielle Verschiebungen am Bohrlochrand.

Lösungen:

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 (LURJE, 1963).

Lösungen für die Spannungen am Bohrloch bei variablen, druckabhängigen Elastizitätsmoduln des Gebirges geben SANTARELLI et al.(1987), die zu qualitativ ähnlichen Spannungsverteilungen wie bereits NADAI (1963) kommen, der ein Potenzgesetz für die elastoplastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung angenommen hatte.

Bei biaxialer äußerer Horizontalspannung führt man man die Berechnungsaufgabe zweckmäßigerweise auf das Randwertproblem der einachsigen gezogenen, gelochten elastischen Scheibe zurück, das für die Spannungsverteilung erstmals von KIRSCH (1898) vollständig gelöst worden ist. OBERT & DUVALL (1967) haben für diesen Fall auch die radialen und tangentialen Verschiebungen berechnet.

### 3.1.1.2 Poro-elastische Modelle

Die Theorie der poroelastischen Modelle entwickelte BIOT zu Anfang der 40-er Jahre; die Ansätze wurden später von ihm ergänzt und modifiziert (BIOT, 1973). Auf dieser Grundlage beschreibt GEERTSMA (1966) ausführlich die formalen Analogien zwischen poroelastischen und thermoelastischen Randwertproblemen und deren Lösungen.

DETOURNAY et al.(1987) und DETOURNAY & CHENG (1988) untersuchen das Problem der gekoppelten Diffusion und Deformation durch Anwendung der Theorie von BIOT (1973) auf *biaxiale* äußere Spannungsfelder. Sie berechnen damit potentielle Mechanismen für verzögerte Bohrloch-Instabilität und Scherbruch-Initiierung im Gebirge.

### **3.1.1.3 Bruchmechanische Modelle**

Als bruchmechanische Modelle werden bevorzugt linear elastische Modelle mit elastoplastischen und bruchmechanischen Spannungsgrenzbedingungen herangezogen: HUBBERT & WILLIS (1957) geben erstmals eine bruchmechanische Interpretation für die Theorie des hydraulischen Bruches. DEY & KRANZ (1987) untersuchen den einachsigen Aufspaltungs- und Knickmechanismus an einer Bohrlochwand und finden, daß die Dicke der Abschalungen um eine Größenordnung kleiner als der Durchmesser des Bohrlochs ist. (vgl. auch Kap.4.2.3).

### **3.1.2 Räumliche Modelle**

#### **3.1.2.1 Axialsymmetrische Modelle**

Der einfachste Fall bei einem zylindrischen Bohrloch mit Kreisquerschnitt ist die gleichmäßige, rotationssymmetrische Belastung der Bohrlochwand durch lithostatische Überlagerung (Eigengewicht).

DREYER (1967) hat das Problem eines axialsymmetrischen Schachtes im isotropen, elastischen Halbraum unter Eigengewicht berechnet. Seine Lösung erfüllt jedoch die Gleichgewichtsbedingungen nicht und enthält auch Schreibfehler bei den Fourier-Koeffizienten. Eine korrekte Lösung ließe sich z.B. mit den Ansätzen von BRADY (1971) oder PENG (1971) herleiten; das Ergebnis würde sich aber quantitativ nur wenig von DREYER's Lösung unterscheiden, da der Beitrag der hier relevanten Zylinderfunktionen zur elastischen Spannungsverteilung in keiner Weise signifikant ist.

#### **3.1.2.2 Ungleichförmige äußere Gebirgsspannungen**

Der allgemeine Fall einer nicht-rotationssymmetrischen Belastung des Bohrlochs ist für die Praxis maßgeblich. Analytische Lösungen sind hierzu zwar nicht bekannt, lassen sich aber prinzipiell nach dem Verfahren von Kap.3.1.2.1 herleiten, indem man für die tangentielle Verschiebung eine Fourier-Transformation (2.Ordnung für den Fall biaxialer äußerer Horizontalspannungen) durchführt. Sinnvollerweise lassen sich solche Lösungen jedoch nur für den Fall einer horizontalen Schichtung des Gebirges mit elastischem Materialverhalten des Gesteins anwenden.

### **3.2 Numerische Modelle**

Die numerischen Verfahren werden überwiegend nach der Methode der finiten Elemente für kontinuumsmechanische Anwendungen, der finiten Differenzen für hydro-mechanische Berechnungen und der Randintegral-Elemente für bruchmechanische Probleme durchgeführt.

Einen umfangreichen Katalog von felsmechanischen Computer-Programmen hat kürzlich die ISRM (1988) aufgestellt.

### 3.2.1 Ebene Finite Differenzen Modelle

Finite Differenzen Modelle zur näherungsweise Lösung von partiellen Differentialgleichungen für Randwertprobleme der Geomechanik, wie sie z.B. von WILKINS (1969) oder DEMUTH et al.(1985) vorgeschlagen worden sind, haben sich in der Felsmechanik gegenüber den Finite Element Methoden bisher noch nicht recht durchsetzen können. Voraussichtlich werden sie jedoch an Bedeutung gewinnen, wenn die zeitabhängigen thermo-hydro-mechanischen Ansätze für das Materialverhalten der Gesteine am Bohrloch in großer Tiefe stärkere Beachtung finden als bisher.

### 3.2.2 Ebene Randintegral Element Modelle

Die Randintegral Element (Boundary 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. Man unterscheidet im wesentlichen drei Varianten: (a) Methode der fiktiven Spannungen, (b) Verschiebungs - Diskontinuitäts-Methode und (c) direkte Randintegral Element Methode: BRADY (1979), CROUCH & STARFIELD (1983).

Die Bohrlochmodelle von EWY et al.(1987) und ZHENG & COOK (1985) sind von der Theorie her demnach prinzipiell elastische Modelle: Bereiche, in denen Grenzbedingungen erreicht oder überschritten ist, werden in einem folgenden Iterationsschritt geometrisch durch Veränderung der Kontur des offenen Bohrloches ausgespart. Das Verfahren wird solange wiederholt, bis eine stabile Bohrlochform gefunden worden ist. Die berechneten Abplatzungsformen führen zu der Ausbildung definierter Ausbruchsbereiche, die hinsichtlich Abspaltung und Scherbrüchen stabil sind (Abb.18). 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.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob Abschalungen als Extensionserscheinungen mit dem Bruchkriterium nach MOHR-COULOMB überhaupt realistisch erfaßt werden können, da dieses ja nur für Scherbrüche gilt. Wenigstens entsprechen die berechneten Formen der Ausbrüche *qualitativ* denen, die schon GAY (1973) in Hohlzylinderdruckversuchen beobachtet hat (Abb.19).

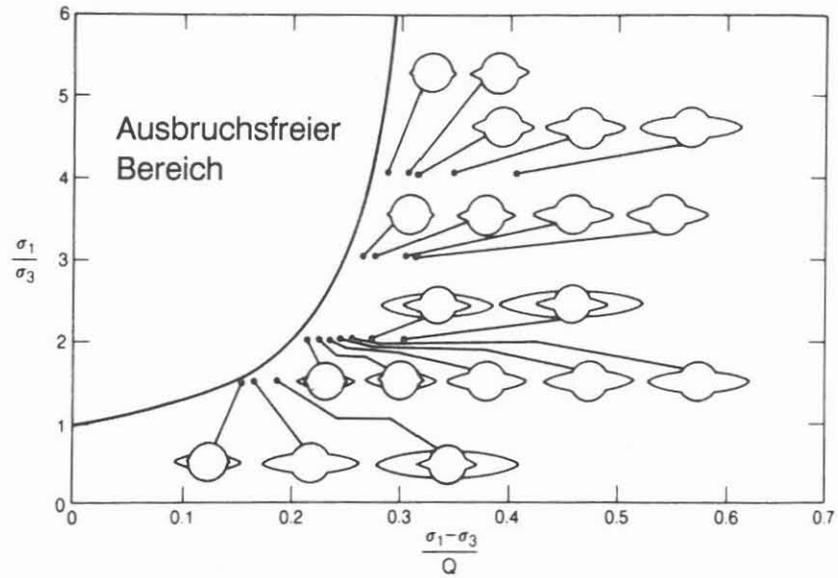


Abb.18: Numerisch ermittelte stabile Bohrlochausbruchsformen in Abhängigkeit von Seitendruckverhältnis und einachsiger Druckfestigkeit Q (EWY et al., 1987)

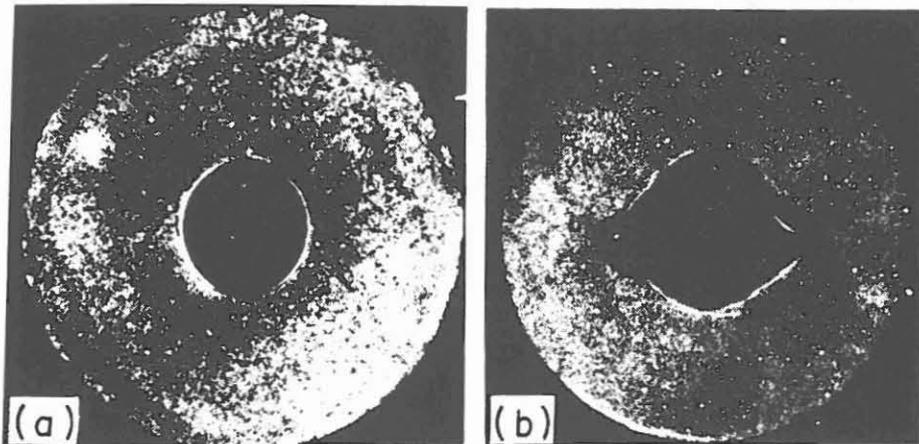


Abb.19: Randausbrüche bei biaxialen Hohlzylinder-Druckversuchen von GAY (1973)

### **3.2.3 Ebene Finite Element Modelle**

In der Theorie der finiten Elemente werden die Verschiebungen im Inneren der einzelnen Elemente durch eine Linearkombination der Verschiebungen ihrer Knotenpunkte angenähert. Die Elementverformungen ergeben sich aus den Gradienten dieser Verschiebungen, und die Elementspannungen folgen aus den Elementverformungen über das Stoffgesetz.

Man verwendet vorteilhaft isoparametrische Scheiben- und Zylinder-Elemente mit parabolischen oder kubischen Verschiebungsansätzen: BATHE (1986).

#### **3.2.3.1 Poroelastische Modelle**

WALLNER et al.(1987) untersuchen das Phänomen der elastischen Kompaktion zwischen Gesteinsmatrix und Fluidbewegung. In einem ebenen Finite Element Programm wird der Fließvorgang durch eine nichtlineare zeitabhängige Permeabilität bestimmt, die eine Funktion von Gesteinsdruck und Fluidüberdruck ist: Einerseits induziert die Deformation des Gebirges die Bewegung der Fluide, andererseits ist diese Fluidbewegung von der Permeabilität des Systems bestimmt; die Permeabilität des Systems hängt aber wiederum vom lithostatischen und hydraulischen Druck ab. Die Permeabilitätswechselwirkungen sind deshalb räumlich und zeitlich unterschiedlich stark ausgeprägt.

### **3.2.4 Räumliche Modelle**

#### **3.2.4.1 Räumliche Randintegral Element Modelle**

Die Theorie der dreidimensionalen Randintegral Element Methode für Randwertprobleme der Elastizitätstheorie ist z.B. bei LACHAT & WATSON (1976) oder NEUREITER (1983) beschrieben. Felsmechanische Anwendungen davon sind jedoch bisher kaum bekanntgeworden.

#### **3.2.4.2 Räumliche Finite Elemente**

Dreidimensionale numerische Berechnungen sind unumgänglich bei der Analyse des Spannungs-, Verformungs- und Bruchverhaltens im Nahbereich der Bohrlochsohle und bei der Kernentnahme einschließlich der Normal- und Scherbeanspruchung durch das Bohrwerkzeug. Eine Berechnung läßt sich mit der Methode der räumlichen finiten Zylinder- oder Quader-Elemente bei unterschiedlichen Randbedingungen als dreidimensionales Modell durchführen, wobei statt des elastischen eher ein elasto-plastisches Materialverhalten zugrunde gelegt werden sollte.

## **4. ELASTOPLASTISCHE BOHRLOCHMODELLRECHNUNGEN**

### **4.1 Analytische oder semi-analytische Modelle**

#### **4.1.1 Ebener Verformungszustand**

Angenommen wird:

- (1) Ebener Formänderungszustand im Berechnungsquerschnitt
- (2) kreisförmige Geometrie des Bohrlochs
- (3) Isotroper Innendruck im Bohrloch
- (4) Isotropes, isothermes, elastoplastisches Verhalten des Gebirges

Gesucht sind:

- (a) Radiale, tangentielle und axiale Spannungen am Bohrlochrand und im Gebirge
- (b) Radiale und tangentielle Verschiebungen am Bohrlochrand (Bohrlochkonvergenz)

##### **4.1.1.1 Lösungen für isotrope äußere Spannungen**

Die Spannungsumlagerungen nach Öffnung des kreisförmigen Querschnittes im elastoplastischen Gebirge mit Entfestigung sind für den Fall isotroper äußerer Spannung aus der Theorie von EGGER (1973) bekannt. HENDRON & AIYER (1972) berücksichtigen zusätzlich den Einfluß der Dilatanz bei der plastischen Verformung des Gebirges.

FLORENCE & SCHWER (1978) zeigen bei Anwendung des MOHR'schen Festigkeitskriteriums, daß die Ausweitung der plastischen Zone außer von Kohäsion und Reibung auch entscheidend von der Wahl der POISSON'schen Querkontraktionszahl abhängt. Weitere elastoplastische Lösungen geben BIOT (1974) und FEDER & ARWANITAKIS (1976).

Oberflächen-Instabilitäten und lokalisierte Scherbandbildung (Abb.20) am Bohrlochrand mit spannungsabhängigen Verformungsmoduln untersuchen SANTARELLI & BROWN (1987), SANTARELLI et al.(1986), SULEM & VARDOULAKIS (1988) und VARDOULAKIS & PAPANASTASIOU (1988): Sie zeigen, daß die Bohrlochstabilität nicht allein eine Frage der Materialeigenschaften ist, sondern daß sie sehr von dem Spannungspfad bei der Herstellung der Bohrung und von den Randbedingungen des Systems abhängt. Näherungslösungen für das Stabilitätsversagen unter bestimmten Spannungszuständen werden in Abhängigkeit vom gewählten spannungsabhängigen starr-plastischen Stoffgesetz hergeleitet.

##### **4.1.1.2 Lösungen für biaxiale äußere Horizontalspannungen**

KASTNER (1971) benutzte die Lösung von KIRSCH (1898), um durch Vergleich mit der Grenzbedingung nach MOHR (1900) die sog. plastischen Zonen um einen kreisförmigen Tunnelquerschnitt zu lokalisieren. Plastische Verformungen und Spannungsumlagerungen werden bei dieser Methode jedoch nicht berücksichtigt.

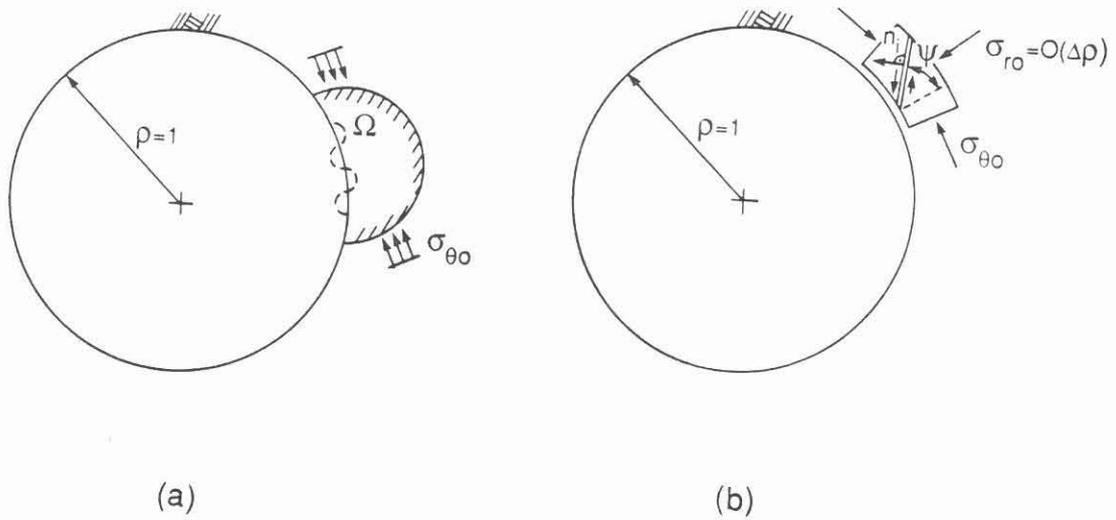


Abb.20: (a) Oberflächeninstabilität und (b) Scherbandbildung; (VARDOULAKIS et al.(1988))

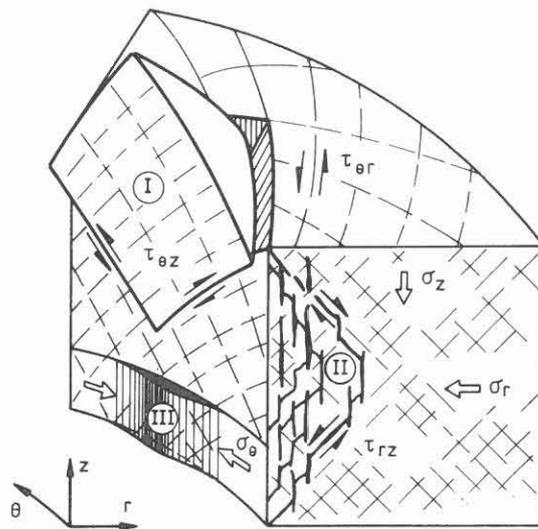


Abb.21: Schematische Bohrlochausbruchsformen: (I) Gleitkeil, (II) Scher- und Trennbruchbildung, (III) Oberflächenbeulung

DETOURNAY (1983) gibt eine theoretisch vollständige Lösung für das elastoplastische Gebirge in der Umgebung eines kreisförmigen Bohrloches unter der Annahme eines ebenen Formänderungszustandes und biaxialen äußeren Spannungen; sie ist jedoch auf bestimmte Verhältnisse der horizontalen Spannungsintensitäten begrenzt. DETOURNAY & St.JOHN (1986) berücksichtigen zusätzlich den Einfluß der Dilatanz: Die Dilatanzrate nimmt darin mit zunehmender plastischer Verformung ab.

#### **4.1.2 Räumliche Modelle**

Analytische räumliche elastoplastische Berechnungsmodelle zur Bohrlochstabilität sind bisher nicht bekannt. Einen möglicherweise gangbaren Weg hierfür zeigen WONG & KAISER (1988) auf.

#### **4.2 Numerische elastoplastische Modelle**

Angenommen wird:

- (1) Ebener Formänderungszustand im Berechnungsquerschnitt
- (2) Beliebige, zweidimensionale Geometrie des Bohrlochs
- (3) Isotroper Innendruck im Bohrloch
- (4) Isotropes, isothermes, elastoplastisches Verhalten des Gebirges
- (5) Elastoplastische Fließbedingung mit assoziierter oder nicht-assoziierter Fließregel

Gesucht sind:

- (a) Radiale, tangential und axiale Spannungen am Bohrlochrand und im Gebirge
- (b) Radiale, tangential und axiale Verschiebungen am Bohrlochrand
- (c) Ausbreitung der plastischen Zonen

##### **4.2.1 Charakteristikenverfahren**

Die Stabilität eines tiefen Bohrlochs ist immer dann gefährdet, wenn die Spannungen in seiner Umgebung die Grenzbedingung erreicht haben und sich ein gerade noch statisch zulässiges Spannungsfeld finden läßt. Solch ein Spannungsfeld erfüllt (a) die Gleichgewichtsbedingungen im Inneren des betrachteten Körpers, (b) die statischen Randbedingungen auf dessen Oberfläche und hält (c) die Grenzbedingung ein. Das Stabilitätsversagen setzt ein, wenn ein Bruchmechanismus unter diesem Spannungszustand kinematisch möglich ist. Der Vergleich von statischen und kinematischen Lösungen bildet somit die Grundlage für alle Vorhersagen zur Bohrlochstabilität bei elastoplastischem Materialverhalten, wobei Spannungs-Verformungs-Beziehungen außer Acht gelassen werden können.

GROB (1984): Ebenes Scheibenmodell, lineare Optimierung mit Simplex-Algorithmus

KAUTHER (1984): Axialsymmetrisches räumliches Schachtmodell

##### **4.2.2 Ebene Finite Differenzen Modelle**

WILKINS (1969), DEMUTH et al.(1985): siehe Kap. 3.2.1

### 4.2.3 Ebene Randintegral Element Modelle

Randintegral-Element-Modelle sind numerische Verfahren, die vorteilhaft in der Bruchmechanik angewendet werden, also auch für die Analyse der Bohrlochrandausbrüche und des Bohrkernzerfalls. Sie vermögen, die Entstehung, Form, Ausbreitung und Wechselwirkung von Brüchen sowie die Rißstabilität mikroskopisch und makroskopisch qualitativ wirklichkeitsgetreu zu beschreiben. Hiermit läßt sich die Bildung makroskopisch beobachteter Brüche phänomenologisch aus der Wechselwirkung mehrerer Risse unter Druckbelastung simulieren.

Die Forderungen an die numerische Methode, daß (a) jeder Riß Kenntnis von allen übrigen Rissen hat und (b) sich gegenüberliegende Rißseiten auch bei größerem Normaldruck nicht überlappen, lassen sich mit der Verschiebungs-Diskontinuitäts-Randelementmethode unter den Voraussetzungen erfüllen, daß die Differentialgleichungen für das Spannungsgleichgewicht und die Kompatibilitätsbedingung linear sind und der Bereich zwischen den einzelnen Rissen mit der linearen Elastizitätstheorie beschrieben werden kann. Über die numerische Simulation von Rißwechselwirkungen nach dieser Methode im KTB-Programm berichten RUMMEL & MÖHRING-ERDMANN (1984) und MÖHRING-ERDMANN (1987).

### 4.2.4 Finite Element Modelle

Kontinuumsmechanisch formulierte Randwertprobleme der Bohrlochstabilität werden i.a. nach der Methode der finiten Elemente mit elastoplastischer Steifigkeitsmatrix gelöst; sie kann prinzipiell auch den Entfestigungsprozeß der Gesteine einbeziehen.

Spannungsänderungen durch Temperaturdifferenzen von Gebirge und Bohrspülung selbst bei zyklischer thermischer Belastung sowie Rißbildung durch Abkühlung ließen sich theoretisch ebenso berücksichtigen wie veränderliche Porendruckgradienten im Gestein.

Die Grundlagen der Finite Element Methode sind für elastoplastische Randwertprobleme z.B. von BATHE (1986), OWEN & HINTON (1980) oder ZIENKIEWICZ & PANDE (1977) zusammengestellt.

#### 4.2.4.1 Ebene Scheiben-Elemente

REYES & DEERE (1966) geben wohl erstmals die Finite Element Lösung für einen Kreistunnel in einem elastoplastischen Gebirge mit isotroper Festigkeit im ebenen Formänderungszustand an. Anisotrope Festigkeiten für das sonst gleiche Randwertproblem berücksichtigen DAHL & VOIGHT (1969), MALINA (1969), KOVARI (1977) und PARISEAU (1968).

In einem Entfestigungsmodell von MÜHLHAUS (1987), bei dem mit nicht-assoziierter Fließregel gearbeitet wird, werden die ursprünglich *lastgeregelten* Randwertprobleme in äquivalenter Weise - aber numerisch erheblich vorteilhafter - durch die sog. Multiple Constraint Technique (BATHE, 1986) *verschiebungsgeregelt* berechnet.

Diskontinuitäten bei geologischen Formationswechsellern und tektonischen Störungszonen lassen sich grundsätzlich durch diskrete Trennflächen-Elemente mit reduzierten Festigkeiten und ausgeprägten Materialanisotropien berücksichtigen (MALINA (1969), VAN DILLEN et al.(1984), WITTKKE & ERBAN (1985)); ihr Stellenwert bei der Stabilitätsanalyse für die *größeren* Teufenbereiche der Kontinentalen Tiefbohrung ist jedoch noch unbestimmt.

#### 4.2.4.2 Räumliche Finite Element Modelle

Eine der ersten Anwendungen von räumlichen Zylinder-Elementen für ein Problem der Schachtstabilität bei elastoplastischem Materialverhalten des Gebirges beschreiben DESAI & REESE (1970).

Isoparametrische räumliche Quader-Elemente sind z.B. bei BATHE (1986), OWEN & HINTON (1980) oder VAN DILLEN et al.(1981) ausführlich dokumentiert.

Maßgeblich für die Bohrloch- und Bohrkernstabilität ist der allgemeine Fall der Belastung des Bohrlochs in einem räumlichen Spannungsfeld mit unterschiedlich großen primären Horizontalspannungen. Besonders kompliziert wird das felsmechanische Verhalten, wenn die Hauptachsen des äußeren Spannungstensors nicht mit den Achsen des Bohrlochs übereinstimmen oder wenn durch räumlich unterschiedliche Bohrlochrandausbrüche die Spannungskonzentrationen dort sehr heterogen sind.

Während aus einem dreidimensionalen Rechenmodell bei entsprechender Parametervariation Rückschlüsse auf das Spannungs- und Verformungsverhalten des Bohrlochs gezogen werden können, sind direkte Angaben zur *Stabilität* des Hohlraumes noch nicht 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 unter rotationssymmetrischen äußeren Spannungsbedingungen kein Stabilitätsversagen eintreten, solange das Entfestigungsverhalten und der zusätzliche Verlust an Reibung z.B. 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. Damit Aussagen über die Bohrlochstabilität aus solchen Berechnungen abgeleitet werden können, muß das im Laborversuch stets beobachtete Entfestigungsverhalten im Stoffgesetz enthalten sein.

Die Materialentfestigung ist darum erst einmal zu quantifizieren und dann in den Algorithmus des Stoffgesetzes zu implementieren. Auch müssen die Entstehungsursachen für die unterschiedlichen Formen der Bohrlochrandausbrüche wie (I) Scherbruch, (II) Trennbruch und Mischbruch sowie (III) für das Knicken (Abb.21) numerisch simuliert werden können. Dazu sind extrem hohe geometrische Auflösungen der Netzstruktur und Verformungsansätze von höherer als linearer Ordnung erforderlich.

### **4.3 Fels-hydraulische Modellrechnungen**

Sickerströmungen zum Bohrloch hin oder vom Bohrloch weg müssen ebenso selbstverständlich wie der Einfluß von Spülungsdruck, Porendruck und Porendruckgradient in der Modellrechnung berücksichtigt werden können.

Numerische Grundlagen hierfür sind z.B. bei HILBER & TAYLOR (1976), LOUIS et al.(1977), OHNISHI et al.(1987), RODATZ (1973), WALLNER et al.(1987) und WILSON (1977) formuliert. Den Einfluß von nicht-linear viskosen Druckflüssigkeiten auf den hydraulischen Bruch des Gesteins berechnet PASCAL (1986).

CHEATHAM et al.(1987) untersuchen den Zusammenhang von Permeabilität und Bohrlochstabilität für den Fall isotroper äußerer Belastung unter der Annahme poroelasto-plastischen Materialverhaltens des Gebirges: Das Fließen des Wassers ist darin über eine angenommene Abhängigkeit der Permeabilität von der Verformung des Porenvolumens gekoppelt.

Die Materialentfestigung durch Wassers (*Hydrolyse*) ist dagegen in keiner fels-hydraulischen Berechnung bisher berücksichtigt worden, ebensowenig wie die Erhöhung der Duktilität des Gesteins durch die Reduktion der Materialreibung infolge des Gehalts an Fluiden.

## **5. RHEOLOGISCHE MODELLRECHNUNGEN**

### **5.1 Analytische viskoelastische Modelle**

SALUSTOWICZ (1965) stellt treffend fest, daß die Gesteinsmassen der Erdkruste sich auf eine von der Teufe abhängende Weise verhalten: (1) In kleinen Teufen sei das Gestein elastisch oder plastisch; (2) in größeren Teufen weise es eine verzögerte Elastizität auf: dem entspreche das KELVIN'sche Modell; (3) in sehr großen Teufen wachsen die Verformungen unbegrenzt an: dem entspreche das MAXWELL'sche Modell.

#### **5.1.1 Ebener Verformungszustand bei isotroper äußerer Spannung**

##### **5.1.1.1 Lineare viskoelastische Modelle**

(a) Retardierte Elastizität (Kelvin-Modell): SALUSTOWICZ (1965)

(b) Stationäres Kriechen (Maxwell-Modell): SALUSTOWICZ (1965)

(c) Kombinierte viskoelastische Modelle: SCHAMP (1985): Burgers-Modell

*Anmerkung:* Die linearen viskoelastischen Modelle haben nur eine theoretische 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.

### 5.1.1.2 Poro-viskoelastisches Modell

BIOT (1973) gibt für das poro-viskoelastische Verhalten eine Lösung an, die jedoch ursprünglich nur für wassergesättigte *poröse Sedimentgesteine* vorgesehen war. Es bleibt zu klären, ob und in welchem Umfang auch das mechanische Verhalten von *entfestigten kristallinen* Gesteinen mit dieser Theorie beschrieben werden kann.

### 5.1.1.3 Nichtlineare viskose Modelle

Am Bohrlochrand relaxieren die sekundären Differenzspannungen chronisch. Dabei verlagern sich die Maxima der tangentialen Spannungsintensitäten allmählich in das Innere des Gebirges, wo sie eine temporäre *Schutzhülle* um den Hohlraum aufspannen. Durch die Relaxation der Gebirgsspannungen klingt die tangentielle Spannung am Bohrlochrand mit der Zeit monoton ab (Abb.22). Ebenso verringern sich damit die Deformationsraten in allen Gebirgsbereichen, es sei denn, es käme vorher zum Bruch.

Die transienten Verformungen des umgebenden Gebirges stehen in reger Wechselwirkung mit der Relaxation der deviatorischen Spannungen am Bohrlochrand (BORM, 1980, 1987a,b). Dieses Relaxationsverhalten ist sehr maßgeblich für die Stabilität der Tiefbohrung, da die Festigkeit der kristallinen Gesteine voraussichtlich schon in mittleren Teufen für die Aufnahme elastischer Spannungskonzentrationen nicht mehr ausreicht.

Grundlagen:

ODQVIST & HULT (1962), ODQVIST & ERIKSON (1963), LEE & SMITH (1980)

### 5.1.1.4 Elasto-viskoplastische Ansätze

Grundlagen: z.B.: OWEN & HINTON (1980), PERZYNA (1966)

FRITZ (1984) betrachtet dilatante elasto-visko-plastische Deformationen des Gebirges um einen kreiszylindrischen Hohlraum als Weiterentwicklung der Lösungsansätze von NONAKA (1978) mit rheologischen Analogmodellen. Es bleibt das Problem der Bestimmung entsprechend verwertbarer Gebirgsparameter.

## 5.1.2 Ebener Verformungszustand bei biaxialer äußerer Spannung

### 5.1.2.1 Lineare viskoelastische Modelle

(a) Retardierte Elastizität (Kelvin-Modell): ADACHI et al.(1969)

(b) Stationäres Kriechen (Maxwell-Modell)

(c) Kombinierte viskoelastische Modelle

Die generelle Anmerkung zu Kap. 5.1.1.1 gilt auch hier.

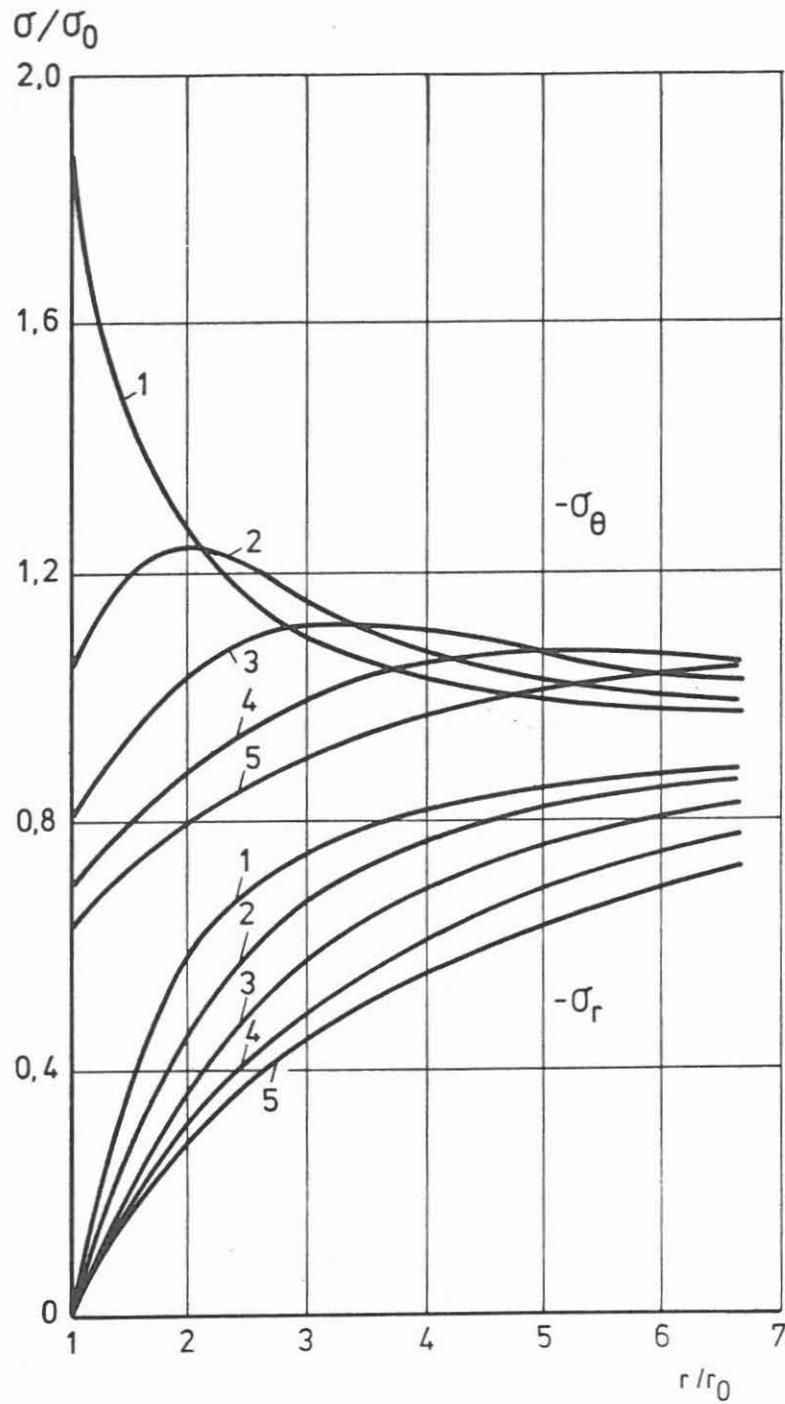


Abb.22: Spannungsrelaxation am Bohrlochrand: Normierte Tangentialspannungen (oben) und Radialspannungen (unten). Aufsteigende Zahlen der Kennlinienparameter bedeuten exponentiell zunehmende Zeiten

### 5.1.2.2 Poro-viskoelastisches Modell

DETOURNAY & CHENG (1988) lösen das poro-viskoelastische Randwertproblem der gelochten Scheibe im ebenen Formänderungszustand unter biaxialen äußeren Spannungen durch Erweiterung der Theorie von BIOT (1973).

### 5.1.2.3 Nichtlineare viskose Modelle

Betrachtet wird eine unendlich ausgedehnte, gelochte Scheibe im ebenen Formänderungszustand unter biaxialen äußeren Horizontalspannungen; das Kriechgesetz des Materials sei vom Potenztyp. 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 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.

### 5.1.2.4 Elasto-viskoplastische Ansätze

Die Anwendung analytischer, elasto-viskoplastischer Materialansätze bei der Lösung von Randwertproblemen mit biaxialen äußeren Spannungen ist aus der Literatur bisher nicht bekannt. Sie sollte aber grundsätzlich möglich sein, indem man die in Kap.4.1.1.2 erwähnten elasto-plastischen Ansätze nach der Methode von PERZYNA (1966) zeitabhängig macht und wie zuvor löst. Nur sind entsprechende Materialparameter für das viskoplastische Stoffverhalten der Gesteine mit Ausnahme von Steinsalz so gut wie nicht bekannt.

### 5.1.3 Räumliche Modelle

Bei *linearer* Viskoelastizität wendet man das viskoelastische Korrespondenzprinzip (BLAND, 1960) auf die elastische Lösung von Kap.3.1.2 an und erhält über eine LAPLACE-Transformation der Bewegungsgleichungen die Lösung auch für das räumliche viskoelastische Modell.

BUDIANSKY et al.(1982) berechnen das Wachstum eines sphärischen Hohlraumes in einem *nichtlinear* viskosen Vollraum. Unter ausgeprägt triaxialen Spannungsbedingungen ist das Verformungsverhalten im nichtlinear viskosen oder starr plastischem Material qualitativ und quantitativ sehr viel anders als bei einem linear viskosen Material: Die Elongation der Hohlraumgeometrie wächst bevorzugt in einer Richtung, die senkrecht zur Wirkungsrichtung der maximalen Zugspannung steht; mit der Zeit stellt sich ein echter Trennriß ein (vgl. Kap.5.1.2.3).

## **5.2 Numerische viskoelastische Modelle**

Linear viskoelastische Modelle können durch Anwendung des viskoelastischen Korrespondenzprinzips (z.B. BLAND, 1960) wie linear elastische Berechnungen behandelt werden. Die explizite oder implizite numerische Zeitintegration der Bewegungsgleichungen geschieht i.a. nach der Anfangsverformungsmethode von ZIENKIEWICZ (1971).

### **5.2.1 Ebene Finite Differenzen Modelle**

WILKINS (1969), DEMUTH et al.(1985): vgl. Kap.3.2.1

### **5.2.2 Ebene Randintegral Element Modelle**

Durch Anwendung der Methode der Anfangsverformungen (ZIENKIEWICZ, 1971) auf die elastische Lösung von Kap.3.2.2 löst VENTURINI (1983) linear viskoelastische Randwertprobleme auch mit Hilfe der Randintegral Element Methode.

### **5.2.3 Ebene Finite Element Modelle**

Die Einbeziehung der rheologischen Bewegungsgleichungen und ihre Integration nach der Zeit ermöglichen Prognosen zur Dauerstandfestigkeit der Tiefbohrung und zur Kriechkonvergenz. Die Berechnungen erfolgen auf der Basis der Methode der Anfangsverformungen mit konstanter Struktursteifigkeit (ZIENKIEWICZ, 1971). Praktische Rezepte für die Wahl numerisch stabiler Zeitintegrationsverfahren geben ZIENKIEWICZ & CORMEAU (1974) und SNYDER & BATHE (1977).

### **5.2.4 Räumliche Finite Element Modelle**

Theoretische Grundlagen für räumliche rheologische Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente stellen OWEN & HINTON (1980) und BATHE & SNYDER (1977) bereit. Solche Modellrechnungen sind leider extrem zeit- und kostenaufwendig.

### **5.2.5 Temperatureinfluß**

LUX et al.(1987) entwerfen ein numerisches Bohrlochmodell, in dem die Spannungsänderungen durch Temperaturdifferenzen zwischen Bohrspülung und Gebirge bei zyklischer thermischer Belastung berechnet wird. Dabei stellen sie erwartungsgemäß fest, daß die Vertikal- und Tangentialspannungen an der Bohrlochwand sowohl durch Spannungsrelaxation als auch durch Abkühlungskontraktion des Gebirges mit der Zeit abnehmen.

## **6. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG VON FINITE ELEMENT MODELL - BERECHNUNGEN ZUR BOHRLOCHSTABILITÄT**

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 darin nicht berücksichtigt sind.

Im folgenden wird das felsmechanische Programmsystem FELS stellvertretend auch für andere (ISRM, 1988) beschrieben, um einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit solcher Programme zu vermitteln. Dabei soll skizzenhaft aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten für Bohrlochstabilitätsberechnungen heute schon in den Finite Element Methoden stecken und welche Weiterentwicklungen noch notwendig sind.

### **6.1 Finite Element Programmsystem FELS**

FELS (Finite Elements of Large Systems) ist ein am Lehrstuhl für Felsmechanik der Universität Karlsruhe verwendetes statisches Finite Element Monitor Programmsystem mit modularem Aufbau; es besteht aus den Teilprogrammen PREFELS, FELS, POSTFELS und ISOLA.

#### **6.1.1 Preprozessorprogramm PREFELS**

Das Teilprogramm PREFELS diskretisiert einfach und mehrfach zusammenhängende Bereiche eines Kontinuums in finite Elemente. Die Netzerzeugung erfolgt je nach der Geometrie des Randwertproblems manuell, automatisch oder gemischt. Ebene und räumliche Strukturen, Anfangsspannungen und automatische Erzeugung von Lastkoeffizienten aus Randspannungen sind darstellbar; Bandbreitenoptimierung und Restart sind möglich. Das Unterprogramm ADFELS steuert die Abfolge des Ausbruchs der Gebirgs-Elemente und des Einbringens der Ausbau-Elemente.

#### **6.1.2 Hauptprogramm FELS**

Das Hauptprogramm FELS berechnet ebene und räumliche Verformungs- und Spannungsrandwertprobleme der Felsbaumechanik. Es erlaubt die Simulation von Ausbruchs- und Einbau-Elementen. Die Elemente-Bibliothek enthält u.a. Schalenelemente für die Bohrlochverrohrung, Ring-Elemente für das Gebirge, ebene isoparametrische 8-Knoten-Scheibenelemente sowie ebene und räumliche Zwischenelemente für Gleitfugen, Trennflächen und Klüfte. Die Berechnung umfaßt Eigengewichtsbelastung, homogenes und inhomogenes, isotropes und anisotropes Stoffverhalten, nichtlineare konstitutive Materialgesetze einschließlich Plastizität und Krie-

chen, statische Gleichgewichts-Iterationen und Zeit-Integrationen für rheologische Rand- und Anfangswertprobleme.

### **6.1.3 Postprozessorprogramme POSTFELS und ISOLA**

Das Post Processor Programm POSTFELS ist ein graphisches System zur zeichnerischen Darstellung der statischen und kinematischen Berechnungsgrößen wie Verschiebungsvektor- und Spannungstensorfelder. Es enthält das Postprocessor Programm ISOLA (Isolinien-Auswahl), das die Verformungs- und Spannungs-Invarianten und die hiervon abhängigen Funktionswerte berechnet und deren Isolinienfelder zeichnet, z.B. für die Intensitäten der Schubspannungen, Normalspannungen, Scherungen, Volumenänderungen, Verformungsgeschwindigkeiten oder skalare Spannungs- und Verformungs-Invarianten sowie die Festigkeits-Auslastungsquotienten.

## **6.2 Aufteilung der geometrischen Struktur in finite Elemente**

### **6.2.1 Geometrie**

Das Finite-Element-Netz wird mit Hilfe des Schlüsseldiagrammverfahrens generiert. Bei dieser Methode wird der zu finitisierenden Struktur ein regelmäßiges Raster aus Reihen und Spalten aufgeprägt, die den geometrischen Zwangspunkten folgen. Die Reihen und Spalten des Schlüsseldiagrammes können individuell in mehrere Kolonnen von finiten Elementen unterteilt werden. Den einzelnen Reihen und Spalten werden dann selektiv die ihnen zukommenden Stoffgesetze und Materialparameter zugewiesen.

### **6.2.2 Materialverteilung, Stoffgesetze und -parameter**

Die Vielfalt der unterschiedlichen Materialfraktionen im anstehenden Gebirge muß hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften zu repräsentativen Materialtypen zusammengefaßt werden. Beim Entwurf des Finite-Element-Netzes wird nun versucht, die geologischen Materialgrenzen möglichst realistisch einzuhalten. Bei den Materialfraktionen wird je nach den geologischen Gegebenheiten angenommen, daß sie Foliationsflächen mit ausgeprägten Festigkeitsanisotropien aufweisen. Da sie möglicherweise erheblich aus der Horizontalen geneigt sind, kann sich eine dreidimensionale, steil einfallende Netzstruktur ergeben (Abb.23). Diskontinuitäten bei geologischen Formationswechsellern und tektonischen Störungszonen, die zu diskreten Gleitkeilbildungen am Bohrlochrand führen können, ließen sich durch spezielle Kluft-Elemente mit reduzierten Festigkeiten und ausgeprägten Materialanisotropien berücksichtigen.

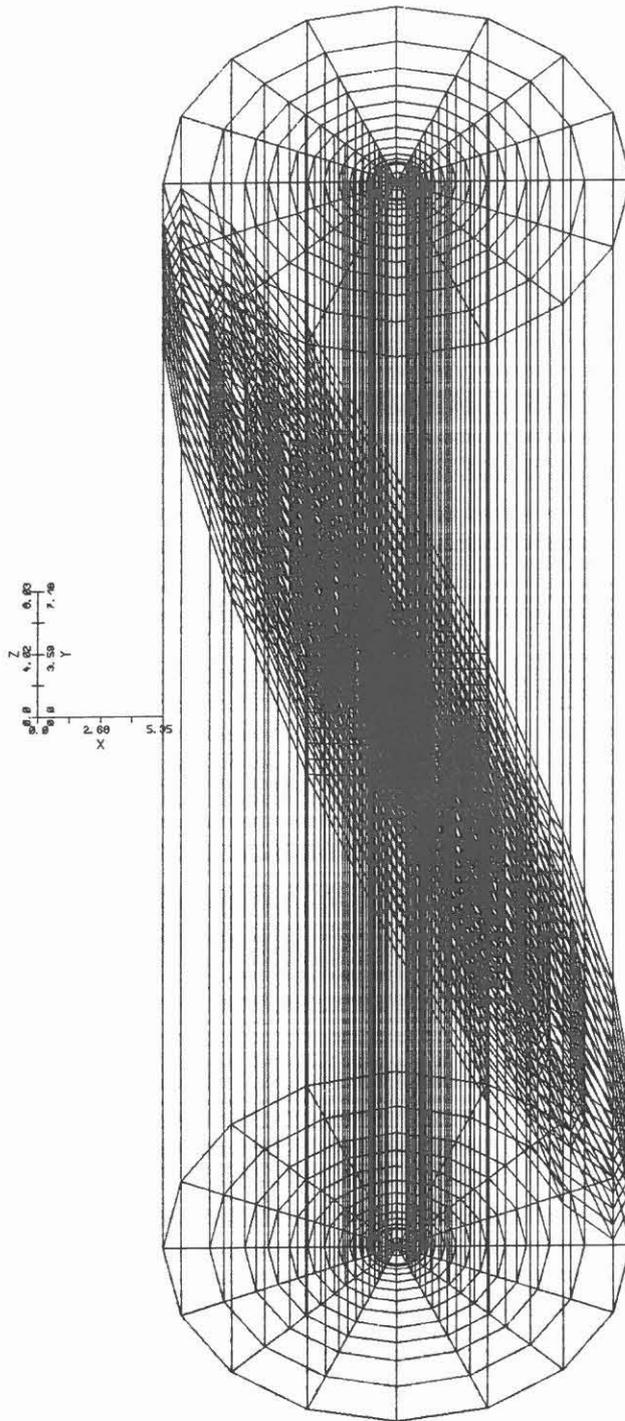


Abb.23: Beispiel eines (groben) räumlichen Finite Element Modells für ein Bohrloch unter steil einfallenden Gebirgsschichten

### **6.2.3 Rand- und Anfangsbedingungen**

Oben ist der Berechnungsausschnitt im allgemeinen Fall durch die Topographie des Geländes begrenzt. Den unteren Abschluß bildet ein horizontaler Schnitt in hinreichend großem Abstand von der tiefsten Aushubsohle. Die Basis des Modells wird als unverschieblich angenommen, um eine Bezugsgrundlage für die sonst unbestimmten Verschiebungen des Gebirges zu erhalten.

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 von sehr großer Entfernung her noch die Spannungskonzentrationen und die Kriechraten am Bohrlochrand signifikant beeinflussen können (BORM & HAUPT, 1988).

## **6.3 Berechnung des primären Gebirgsspannungszustands**

Als primären Spannungszustand bezeichnet man das Spannungsfeld im unverritzten Gebirge. Es kann neben den gravitativen auch tektonische, geothermische und geohydraulische Komponenten enthalten.

### **6.3.1 Eigengewicht**

Die Ermittlung des primären Verformungs- und Spannungszustands aus den Randbedingungen und Stoffgesetzen geschieht über eine stufenweise Steigerung der Rand- und Massenkräfte unter Annahme inkrementell linearen Materialverhaltens:

- (1) Berechnung der Systemsteifigkeit
- (2) Aufstellung und Lösung des statischen Gleichungssystems für die primären Verschiebungen
- (3) Ermittlung der primären Verformungen aus den Gradienten der Verschiebungen
- (4) Berechnung der Primärspannungen über die Stoffbeziehungen aus den primären Verformungen
- (5) Nullsetzen der primären Verschiebungen als Bezugsconfiguration

Bei homogenen horizontalen Verschiebungsrandsbedingungen an den lateralen Rändern (vertikale Gleitlager) stellt sich der primäre Gebirgsseitendruck durch die Behinderung der Querkontraktion bei der Setzung des geologischen Materials unter Eigengewicht je nach Wert der POISSON'schen Querkontraktionszahl ein. Das Feld der primären Hauptspannungen folgt der Materialverteilung und den unterschiedlichen Wichten der einzelnen Gesteinsfraktionen.

### **6.3.2 Tektonische Spannungen**

Tektonische oder residuelle Gebirgsspannungen können in der numerischen Modellanalyse in der gleichen Weise wie die gravitativen Spannungen als Anfangsspannungen berücksichtigt werden (ZIENKIEWICZ, 1972).

### **6.3.3 Thermische Anfangsspannungen**

Thermische primäre Gebirgsspannungen können in der numerischen Modellanalyse ebenfalls als Anfangsspannungen eingegeben werden (ZIENKIEWICZ, 1972).

## **6.4 Bestimmung der sekundären Verformungs- und Spannungsfelder**

Die Berechnungen werden unter Variation der wesentlichen Einflußparameter (Materialfestigkeiten, Geometrien und Randbedingungen) durchgeführt. Aus den Ergebnissen (Spannungs- und Verschiebungsfelder, Gleitlinien und potentielle Bruchzonen) können Modelle möglicher Versagensformen für Grenzgleichgewichtsbetrachtungen abgeleitet werden.

### **6.4.1 Simulation des Bohrvorgangs**

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.

#### **6.4.1.1 Elimination der Massen und Steifigkeiten**

Die Simulation des stufenweisen Abbaus erfolgt in der Finite Elemente Analyse durch Inaktivieren der Steifigkeiten und Massen derjenigen Elemente, die in den Bereich des jeweiligen Aushubs fallen.

#### **6.4.1.2 Spannungsumlagerungen und Konvergenzen**

Nach der Ermittlung des Primärspannungszustandes wird der Bohrvorgang in einer Reihe weiterer Lastschritte simuliert:

- (1) Elimination der Steifigkeiten und Massen der Ausbruchs-Elemente
- (2) Aufstellen und Lösen des neuen statischen Gleichungssystemes für die sekundären Verschiebungen, die aus der Veränderung der Struktursteifigkeit und der Umlagerung der Anfangsspannungen resultieren
- (3) Berechnung der sekundären Verformungen aus den sekundären Verschiebungen
- (4) Bestimmung des sekundären Spannungen aus den sekundären Verformungen über die Stoffgesetze
- (5) Prüfung des statischen Gleichgewichtes: Differenzen im Kräftegleichgewicht zwischen den äußeren Kräften und den aus der Formänderung herrührenden inneren Spannungen dienen als Korrekturlasten für nachfolgende Gleichgewichts-Iterationen
- (6) Berechnung des nächsten Lastschrittes bzw. der folgenden Ausbruchsstufe

- (7) Aufsummieren der sekundären Verformungen und Spannungen, bis der Endzustand erreicht ist
- (8) Wenn erforderlich, Aktualisierung der Steifigkeits- und Festigkeitsparameter in Abhängigkeit vom momentanen Verformungs- und Spannungsniveau

Mit zunehmender Entfernung vom Hohlraumrand geht die Orientierung des sekundären Spannungsfeldes in die des Primärspannungszustandes über. Im Fernfeld herrscht nahezu der primäre Spannungszustand mit Werten, die der Überlagerungsspannung aus der Eigengewichtsberechnung und ggf. tektonischen Zusatzspannungen entsprechen.

Die Verschiebungswerte werden relativ zum primären Verschiebungsfeld dargestellt. Durch die Wirkung des Aushubes können sich neben den radialen Konvergenzen theoretisch auch vertikale Hebungen einstellen.

#### **6.4.2 Thermomechanische Wechsellasten**

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 Temperaturlausbreitung 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 angemessene Näherungsverfahren zu beschränken.

#### **6.4.3 Transportgleichungen für Spülung und Fluide**

*Sickerströmungen* zum Bohrloch hin oder vom Bohrloch weg müssen 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. Eine ebene Finite Element Modellierung der Permeabilitätswechselwirkung stellen WALLNER et al.(1987) vor. Im Programmsystem FELS sind gekoppelte Strömungsberechnungen dagegen bisher noch nicht enthalten.

Die Kopplung von Diffusion und Deformation liefert potentielle Mechanismen für die im allgemeinen retardierte Bohrloch-Instabilität und Scherbruchbildung im Gebirge. Die Grundlagen des klassischen Lösungsverfahrens von BIOT beruhen jedoch auf

den physikalischen Eigenschaften poröser, wassergesättigter Sedimentgesteine. Es ist noch nicht sicher, ob und in welchem Umfang auch das hydromechanische Verhalten von aufgelockerten kristallinen Gesteinen mit dieser Theorie beschrieben werden kann.

## **6.5 Darstellung der Ergebnisse**

Die Darstellung der Ergebnisse in Form von schier endlosen Zahlenlisten hat sich nicht bewährt. Man wird sich auf die Ausgabe ausgewählter Tabellen beschränken. Viel sinnvoller erscheint darüberhinaus die graphische Darstellung der Strukturen, Spannungs- und Verformungsfelder auf einem farbigen Bildschirm Monitor, auf dem interaktiv nach der CAD-Technik selektive räumliche Schnitte erzeugt werden können. Die Zeichnungen lassen sich anschließend photographisch oder über einen Plotter ausgeben.

### **6.5.1 Verschiebungen und Verformungen**

Die Verschiebungen der Knotenpunkte der Finiten Elemente werden in Form von Verschiebungsvektor-Plots oder Schnittzeichnungen der Konvergenzen und Setzungen graphisch dargestellt. Durch elementweises Verbinden der Vektorspitzen der Knotenpunktverschiebungen erhält man in mehr oder weniger starker Überhöhung ein anschauliches Bild von der verformten Struktur des Elementen-Netzes.

### **6.5.2 Spannungen und Festigkeits-Auslastungsquotienten**

Die Spannungskomponenten werden in den Integrationspunkten der finiten Elemente ermittelt und auf ihre Hauptachsen transformiert. Diese Hauptkomponenten werden unter Beachtung ihrer Neigungen im Raum graphisch als Spannungstensor-Feld für den jeweils relevanten Modellausschnitt aufgetragen.

Die Darstellung der effektiven Spannungskonzentrationen im Gebirge erfolgt sehr übersichtlich durch das Isolinienfeld der Festigkeits-Auslastungsquotienten, die das Verhältnis von aktueller effektiver Spannung zur maximal zulässigen effektiven Spannung angeben. Die Auslastungsquotienten werden dabei für den Fels und für die Foliationsflächen separat definiert; der jeweils größere Wert ist für die Beanspruchung des Gebirges maßgeblich.

### **6.5.3 Plastische Zonen und Gleitlinien**

Als plastische Zonen werden diejenigen Bereiche markiert, in denen die Spannungskonzentrationen die Materialfestigkeiten erreicht haben. Die Festigkeits-Auslastungsquotienten betragen dort 100%.

Potentielle Scherflächen und Gleitkeile am Bohrlochrand werden numerisch-graphisch lokalisiert. Zur Bestimmung der Richtungen und Intensitäten der Hauptschubspannungen können die Airy'schen Spannungsfunktionen herangezogen werden,

die bei einem ebenen elastoplastischen Verformungszustand aus der Lösung einer hyperbolischen Differentialgleichung 2.Ordnung hervorgehen. Die Charakteristiken dieser Differentialgleichung können bei Finite Element Berechnungen graphisch dadurch konstruiert werden, daß man die Richtungen der Hauptschubspannungen von jeweils benachbarten finiten Elementen stückweise miteinander verbindet (BORM, 1980).

## 6.6 Offene Probleme

Die offenen Probleme der vorhandenen Methoden zur Analyse der Bohrlochstabilität für sehr tiefe Bereiche werden deutlich, wenn man den Bericht von KOSLOVSKI (1984) über die Stabilität der Kola-Tiefbohrung liest:

In 4500m Tiefe traf die Kola-Bohrung auf eine Zone von anomaler Zersetzung metamorphen Gesteins. Es stellte sich ein überraschend reichlicher Zufluß an heißen, hochgradig mineralisierten Kristallwässern ein, das freigesetzt wird, wenn die Bestandteile kristalliner Tiefengesteine einer Dissoziation bei der retrograden Dislokationsmetamorphose unterworfen sind. Da die Zugfestigkeiten des Gesteins nur einen Bruchteils dieses freigesetzten hydraulischen Drucks betragen, ist die Dehydration von extremer Mikrorißbildung begleitet. Das Abteufen des Bohrloches setzte auch Ströme von Gas wie Helium, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlendioxyd, Methan und andere Kohlenwasserstoffe frei. Die leichten Elemente in diesen Gasen kommen aus der Kristallstruktur der Gesteine aufgrund dergleichen metamorphen Prozesse, die das Wasser freisetzen. Da diese Gase wesentlich expansiver als die Fluide sind, ist die Gefahr der Auflockerung und Entfestigung der umgebenden kristallinen Gesteine besonders groß.

Die in den Laborversuchen gemessene statische wie auch dynamische Materialentfestigung des feuchten Gesteins muß quantifiziert und in ein thermodynamisch konsistentes, dreidimensionales Stoffgesetz umgesetzt werden, das man für makroskopische numerische Berechnungen verwenden kann.

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 somit die Bohrlochwand entlasten.

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 felsbau-mechanischen 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 und der begrenzten residuellen Festigkeiten sowie der noch weitgehend unbekannt, gekoppelten thermo-hydro-mechanischen Bewegungsgleichungen des durchteuften Gebirges.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Im vorliegenden Bericht wird versucht, eine erste Übersicht über Literatur und Stand des Wissens auf dem Gebiet der *Materialuntersuchungen* und der *statischen Berechnungen* zur Beurteilung der Stabilität von Tiefbohrungen zu geben.

Die *Bohrlochstabilität* ist ein zentrales Problem für die technische Durchführung der Kontinentalen Tiefbohrung und die Gewährleistung eines geregelten Testprogramms. Sie betrifft die Verformungen und Spannungsumlagerungen am Bohrlochrand ebenso wie die thermisch und bohrtechnisch bedingten Einflüsse auf das Spannungsfeld im Bereich der Bohrlochwandung. Dort ist das Gebirge erheblichen thermo- und hydromechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt.

Die Standsicherheit des offenen Bohrloches ist eine Frage der Gesteinsfestigkeit, der mechanischen Beanspruchung, der Stützmaßnahmen und der Zeit. Mit der Zeit ermüdet das Material und verliert an Festigkeit; mit der Zeit relaxieren aber auch die deviatorischen Spannungen und entlasten die Bohrlochwand. Die Spannungen im Gebirge lagern sich während und nach den Bohrarbeiten um. Sie führen zu Verformungen des Gesteins und zu einer Verringerung des Bohrlochquerschnittes; bei Überlastung entstehen aber auch Randausbrüche und somit erhebliche Querschnittserweiterungen.

Die *Bohrlochrandausbrüche* stehen in direktem Zusammenhang mit dem Spannungszustand in situ; sie stellen sich vorwiegend in zwei diametral gegenüberliegenden Zonen an der Bohrlochwand in Richtung der kleinsten horizontalen Spannung ein. Ausbruchtiefe und -weite wachsen mit der Magnitude der horizontalen äußeren Spannungen, wobei die Abplatzungen, Abschaltungen und Scherbrüche ebenso wie die Konvergenzen des Bohrlochs un stetige, zeitlich progressive Erscheinungen sind.

Die Bestimmung des thermomechanischen Verformungs- und Festigkeitsverhaltens des Gesteins geschieht in *felsmechanischen Laboruntersuchungen*. Dabei zeigt sich, daß die Elastizitätsmoduln der kristallinen Gesteine sich bei statischen und dynamischen Belastungsbedingungen grundsätzlich unterscheiden und darüberhinaus von der Intensität der Verformung abhängen. Die Festigkeit des Gesteins erscheint als Funktion der Temperatur, des Umgebungsdrucks, der Gesteinsart, der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit, des Fluidgehalts und Porendrucks sowie der Mikrorißdichte, Verformung und Eigenspannung. Die Versuchssteuerung erfolgt über Kraft-, Weg- oder Energieregulierung. Welche Prozeßsteuerung die mechanischen Vorgänge bei der Tiefbohrung am besten simuliert, ist jedoch noch nicht endgültig geklärt.

Im Spannungsniveau um den Bruch findet bei kristallinen Gesteinen eine Gefügeflockung statt, die mit einer ausgeprägten Änderung der festigkeitsmechanischen Parameter verbunden ist. Wasserzugabe beschleunigt den Entfestigungsprozeß durch Reduktion der Kohäsion und inneren Reibung des Gesteins und durch Hydrolyse. Der Einfluß des Wassers auf die Abnahme der Festigkeit ist bei höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur. Temperaturwechsel können neue Risse und bleibende Verformungen erzeugen und den Wärmeausdehnungskoeffizient des Gesteins systematisch reduzieren.

Durch Dauerbelastung oder häufige Lastwechsel verliert das Material mit der Zeit an Festigkeit: es ermüdet. Die Geschwindigkeit der Mikrorißbildung folgt einem Gesetz, das dem transienten Kriechen mit Zeitverfestigungseffekt formal sehr ähnlich ist. Die Ermüdung von kristallinen Gesteinen wird als ein Ergebnis von Spannungskorrosion angesehen, die von der Spannungsamplitude und der Lastwechselfrequenz abhängig ist. Eine Festigkeitsabnahme tritt bei höheren Spannungsamplituden und längeren Lastwechselperioden ein. Daneben beeinflussen geochemische Korrosion und Lösungsvorgänge die Bohrlochstabilität und erhöhen die Porosität und Permeabilität des Gesteins.

Die konventionellen Spannungs-/Dehnungs-Beziehungen auf der Basis der effektiven Spannungen nach TERZAGHI überschätzen den Effekt des Porendrucks in hohem Maße. Ansätze für poroelastisches Materialverhalten von verformbarem Gestein mit kompressiblen Fluiden kommen den Verhältnissen in der Natur schon wesentlich näher, doch enthalten auch sie noch nicht den exponentiellen Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Porosität bzw. Auflockerungsgrad. Die dafür maßgeblichen Diffusionsmechanismen und Durchlässigkeiten sind erst wenig bekannt. Schon gar nicht wird in den bisherigen Theorien das hochviskose, thixotrope Stoffverhalten der Bohrspülung oder deren Temperatur- und Druckeinflüsse auf die Bohrlochstabilität berücksichtigt.

Die rheologischen Deformationen der Gesteine hängen in exponierter Weise von den Spannungen ab. Temperaturerhöhung führt zu einer Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit und zu einem Festigkeitsverlust. Die Spannungsrelaxation ist bei polykristallinem Gestein von sehr komplizierten Mechanismen wie gefügebefindete Spannungsspitzen und slip-slick-Effekte bestimmt. Es tritt eine rege Wechselwirkung von intragranularer Kriechbewegung, Spannungsrelaxation und Mikrorißbildung auf, wodurch die Kriech- und Relaxations-Kennlinien sehr unregelmäßig ausfallen. Zusätzlich hat der Fluidgehalt einen erheblichen Einfluß auf Kriechen und Relaxation der Gesteine; er ist jedoch bisher noch kaum erforscht.

*Modellversuche* zeigen Neubrüche in der Umgebung des Hohlraumes immer dann, wenn die Tangentialspannung nahe der einachsigen Druckfestigkeit des Materials liegt. 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 und setzt sich durch Abschaltungen so lange fort, bis die gesamte Probe kollabiert. Als Gleitlinien ergeben sich Scharen von logarithmischen Spiralen, deren Verschneidungswinkel vom Reibungsbeiwert des Materials abhängen. Die Gleitzonen entfalten sich scharenweise gestaffelt zum Teil simultan, zum Teil sequentiell und progressiv; sie können auch übergangslos in Abtrennungsflächen umschlagen.

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.

Numerische Methoden werden verwendet, 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* zur näherungsweise Lösung partieller Differentialgleichungen für Randwertprobleme der Geomechanik haben sich in der Felsmechanik gegenüber den Finite Element Modellen bisher noch nicht recht durchsetzen können. Möglicherweise werden sie an Bedeutung gewinnen, wenn die zeitabhängigen thermo-hydro-mechanischen Ansätze für das Materialverhalten der Gesteine am Bohrloch in großer Tiefe stärkere Beachtung finden als bisher.

*Randintegral-Element-Modelle* sind numerische Verfahren, die vorteilhaft in der Bruchmechanik angewendet werden, somit auch für die Analyse der Bohrlochrandausbrüche und des Bohrkernzerfalls. Sie vermögen die Entstehung, Form, Ausbreitung und Wechselwirkung von Brüchen sowie die Reißstabilität mikroskopisch und makroskopisch realistisch zu beschreiben. Bevorzugt werden linear elastische Modelle mit elastoplastischen oder bruchmechanischen Spannungsgrenzbedingungen herangezogen.

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 Berechnungen werden unter Variation der wesentlichen Einflußparameter (Materialfestigkeiten, Geometrien und Randbedingungen) durchgeführt. Die Analyse konzentriert sich auf die Spannungen und Verformungen für die unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Zustände der Bohrung. Aus den Ergebnissen (Spannungs- und Verschiebungsfelder, Gleitlinien und potentielle Bruch-

zonen) können Modelle möglicher Versagensformen für Grenzgleichgewichtsbe-  
trachtungen abgeleitet werden.

Maßgeblich für die Bohrloch- und Bohrkernstabilität ist der allgemeine Fall der Bela-  
stung in einem räumlichen Spannungsfeld mit unterschiedlich großen primären Hori-  
zontalspannungen. 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 ei-  
ner sehr heterogenen Spannungskonzentration führen. Unumgänglich sind drei-  
dimensionale 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.

Das Abteufen der Tiefbohrung ist ein nicht-stationäres Problem: Die Störung des  
Kräftegleichgewichts beim Ausbruch, der Versuch des Gebirges, über seine spon-  
tane 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 Ein-  
fluß von bohrtechnisch bedingten Temperatur- und Lastwechseln erfassen zu kön-  
nen, muß die Berechnung diese hysteretischen Vorgänge realistisch nachzeichnen  
können.

Die in den Laborversuchen gemessene statische wie auch dynamische Materialent-  
festigung des feuchten Gesteins muß quantifiziert und in ein thermodynamisch konsi-  
stentes, dreidimensionales Stoffgesetz umgesetzt werden, das man für makro-  
skopische numerische Berechnungen verwenden kann. Um darüberhinaus die Ent-  
stehung 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.

Die Einbeziehung der rheologischen Bewegungsgleichungen und ihre Integration  
nach der Zeit ermöglichen Prognosen zur Dauerstandfestigkeit der Tiefbohrung und  
zur Kriechkonvergenz. Bei Ansatz eines nichtlinearen rheologischen Materialverhal-  
tens relaxieren die sekundären Differenzspannungen am Bohrlochrand chronisch;  
dadurch verlagern sich die Maxima der tangentialen Spannungsintensitäten allmäh-  
lich 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 middle-  
ren Teufen für die Aufnahme elastischer Spannungskonzentrationen nicht mehr aus-  
reichen wird. Auch stehen die zeitabhängigen Verformungen des Gebirges in enger  
Wechselwirkung mit der Spannungsrelaxation am Bohrlochrand.

*Sickerströmungen* zum Bohrloch hin oder vom Bohrloch weg müssen ebenso wie  
der Einfluß von Spülungsdruck, Porendruck und Porendruckgradient in der Modell-  
rechnung 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 wie-  
derum vom lithostatischen und hydraulischen Druck ab. Die Permeabilitätswechsel-  
wirkungen sind deshalb räumlich und zeitlich unterschiedlich stark ausgeprägt.

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.

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.

Unter der Voraussetzung, daß die Wahl des Schnittes, die Idealisierung der geologischen Verhältnisse, die Stoffgesetze und deren Parameter sowie die Rand- und Anfangsbedingungen für die tatsächlichen Gegebenheiten als hinreichend repräsentativ angesehen werden können, liefern die numerischen Modellrechnungen auf der Basis der finiten Elemente computergestützte Prognosen und Bemessungsgrundlagen für die Größenordnung der zu erwartenden Hebungen, Setzungen und Konvergenzen sowie quantitative Angaben über die wahrscheinliche Belastung des Gebirges im Bereich des offenen Bohrloches.

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 mehr mit Sicherheit nachzuweisen. Quantitative Prognosen der Bohrlochrandausbrüche, der kritischen Teufen und der Auswirkung der technischen Wechsellasten durch den Bohrvorgang mit periodischen Torsionsbeanspruchungen und Werkzeugwechseln werden gegenwärtig ebenso wie geeignete Maßnahmen zur Stützung des Bohrlochs und Sicherstellung der Kernprobengewinnung entwickelt, wobei die Zeitabhängigkeit der verschiedenen Einflußgrößen sich als Schlüsselfaktor erweist.

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 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.

## 8. LITERATUR

- ADACHI,T., SERATA,S., and SAKURAI,S.(1969): Determination of Underground Stress Field Based on Inelastic Properties of Rock. In: Rock Mechanics - Theory and Applications, Proc. 11th US Symp. Rock Mech. Berkeley, Ch.18, 293-328
- 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
- ANDERSON,O.L. and GREW,P.(1976): Stress Corrosion Theory of Crack Propagation with Application to Geophysics. Rev.Geophys.Space Phys., 15, 77-104
- 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
- ATKINSON,B.K.(1979): A Fracture Mechanics Study of Subcritical Tensile Cracking of Quartz in Wet Environment. PAGEOPH, 117, 1011-
- ATKINSON,B.K.(1980): Stress Corrosion and the Rate Dependent Failure of a Fine Grained Quartz Rock. Tectonophysics, 65(3/4), 281-
- 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
- BASOVITCH,O., BERGSTEIN,Y., VUGIN,R.B., KUZIN,B.V., KOCHERGIN,V.S., and FETKO,Y.A.(1987): Major Trends in Variation of Drilling Indices with Depth. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): The Superdeep Well of the Kola Peninsula. 521-547, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo
- 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-Tokyo
- BEHR,H.-J.(1987): KTB und kontinentale Krustenforschung - Warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm? In: KTB-Report 87-1, 1-35
- BERCKHEMER,H., AULBACH,E., BÄUMLER,P., SOBIESIAK,M., and BAUMANN, H.(1985): Residual Stress in Drill Cores. In: Proc.2nd Int.Symp.Obs.Cont.Crust through Drilling, 91, Seeheim; AWS Bonn
- 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
- BIOT,M.(1974): Exact Simplified Non-Linear Stress And Fracture Analysis Around Cavities in Rock. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 11, 261-266
- BIRCH,F.(1966): Compressibility, Elastic Constants. In: CLARK,S.P.Jr.(ed.) *Handbook of Physical Constants, Memoir 97, Sect.7, 97-174, Geol. Soc.Am., New York*
- BLACK,J.H.(1983): Treating Granites as Fissured Porous Media.Proc. *Int.Symp.Field Measurements Geomech. Zurich, 1299-1308, Balkema, Rotterdam*
- BLAND,D.R.(1960): *The Theory of Linear Viscoelasticity. Pergamon Press, Oxford*
- BLÜMLING,P.(1984): Bohrlochauskesselungen und ihre Beziehung zum regionalen Spannungsfeld. SFB 108 Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre, *Berichtsband 1981-1983, Universität Karlsruhe*
- 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; AWS Bonn*
- BOOKER,J.R. and CARTER,J.P.(1984): The Analysis of Deformations Caused by Loading Applied to the Walls of a Circular Tunnel. *Int.J.Num.& Anal. Meth.Geomech.*, 8, 445-455
- BORM,G.(1980): Zur Analyse chronischer Gebirgsverformungen beim Felshohlraumbau. *Veröff. Nr.88, Inst. Bodenmech. u. Felsmech. Univ.Karlsruhe*
- BORM,G.(1987a): Rheologische Gebirgsspannungen und -entspannungen beim bergmännischen Felshohlraumbau. *Felsbau, 5, H.4, 175-181.*
- BORM,G.(1987b): Bohrlochkonvergenz und Spannungsrelaxation im Steinsalzgebirge. In: *Herget,G. and Vongpaisal,S.(eds.): Proc.6th Int.Congr.ISRM, Montreal, 819-823, Balkema, Rotterdam*
- BORM,G.(1988): Bohrlochstabilität, Bohrlochrandausbrüche und Bohrkernzerfall. *Poster, Proc. 1.KTB-Schwerpunktkolloquium, 33, Giessen.*
- 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.(1975): Dilatancy-Related Electrical Resistivity Changes in Rocks. *PA-GEOPH, 113, 207-217*
- BRACE,W.F.(1977): Permeability from Resistivity and Pore Shape. *J.Geophys.Res.*, 82(23), 3343-3349

- BRACE, W.F. (1980): Permeability of Crystalline and Argillaceous Rocks. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, 17, 241-251
- BRACE, W.F. and BOMBALAKIS, E.G. (1963): A Note on Brittle Crack Growth in Compression. *J.Geophys.Res.*, 68(12), 3709-3713
- BRACE, W.F., PAULDING, B.W., and SCHOLZ, C.H. (1966): Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks. *J.Geophys.Res.*, 71(16), 3939-3953
- BRACE, W.F., SILVER, E., HADLEY, K., and GOETZE, C. (1972): A Closer Look at Cracks and Pores. *Science* 178, 162-163
- BRACE, W.F., WALSH, J.B., and FRANGOS, W.T. (1968): Permeability of Granite Under High Pressure. *J.Geophys.Res.*, 73, 2225-2236
- BRADLEY, J.J. and FORT, A.N. Jr. (1966): Internal Friction in Rocks. In: CLARK, S.P. Jr. (ed.) *Handbook of Physical Constants*, Memoir 97, Sect. 8, 175-194, Geol. Soc. Am., New York
- BRADY, B.T. (1971): An Exact Solution to the Radially End-Constrained Circular Cylinder Under Triaxial Loading. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, 8, 165-178
- BRADY, B.T. (1979): A Direct Formulation of the Boundary Element Method of Stress Analysis for Complete Plane Strain. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, 16, 235-244
- BRATLI, R., HORSRUD, P., and RISNES, R. (1983): Rock Mechanics Applied to the Region Near a Wellbore. *Proc. 5th Int. Congr. Int. Soc. Rock Mech.* Melbourne, Vol. F, 1-15, A.A. Balkema, Rotterdam
- BUDIANSKY, B. and O'CONNELL, R.J. (1976): Elastic Moduli of a Cracked Solid. *Int.J.Solids Struct.*, 12, 81-97
- BUDIANSKY, B., HUTCHINSON, J.W., and SLUTSKY, S. (1982): Void Growth and Collapse in Viscous Solids. *Mechanics of Solids*, 13-45, Pergamon Press, London
- BYERLEE, J.D. (1967): Frictional Characteristics of Granite Under High Confining Pressure. *J.Geophys.Res.*, 72(14), 3639-
- CARLSSON, A. and OLSSON, T. (1986): Large Scale In-Situ Tests on Stress and Water Flow Relationship in Fractured Rock. Vattenfall, Swedish State Power Board Design and Construction
- CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C. (1960): *Conduction of Heats in Solids*. 335-, Clarendon Press, Oxford
- CARTER, J.P. and BOOKER, J.R. (1983): Consolidation of Axi-Symmetric Bodies Subjected to Non-Axi-Symmetric Loading. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech. Abstr.*, 7, 273-281
- CARTER, N.L. (1975): High-Temperature Flow of Rocks. *Rev. Geophys. & Space Phys.*, 13(3), 344-349

- CARTER,N.L.(1978): Steady State Flow of Rocks. Rev.Geophys.& Space Phys., 14, 301-360
- CARTER,N.L. and KIRBY,H.(1978): Transient Creep and Semibrittle Behavior of Crystalline Rocks. PAGEOPH, 116, 806-839
- 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.
- CHEATHAM,J.B.(1984): Wellbore Stability. J.Petr.Techn., 36, 889-896
- CHEATHAM,J.B.Jr., LIN,Y.H., and PATILLO,P.D.(1986): Analysis of Borehole Stability Using a Strain Softening Model. Proc. 27th US Symp. Rock Mech., 521-561
- CHEATHAM,B.B. and WILHOIT,J.C.(1960): Stresses Caused by Bit Loading at the Center of the Hole. Amer.Inst.Mech.Engnrs., Paper No.1569-G
- CHEATHAM,J.B.Jr., LIN,Y.H., and PATILLO,P.D.(1987): Borehole Stability Prediction with Variable Permeability. Proc. 28th US Symp. Rock Mech. Tucson, 813-820, A.A.Balkema, Rotterdam - Boston
- CHENG,S.Y., ARIARATNAM,S.T., and DUBEY,R.N.(1971): Axisymmetric Bifurcation in an Elastic-Plastic Cylinder under Axial Load and Lateral Hydrostatic Pressure. Quart.Appl.Math., 41-51
- 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
- CLARK,S.P.Jr.(1966a): Viscosity, In: CLARK,S.P.Jr.(ed.) Handbook of Physical Constants, Memoir 97, Sect.12, 291-300, Geol. Soc.Am., New York
- CLARK,S.P.Jr.(1966b): Thermal Conductivity. In: CLARK,S.P.Jr.(ed.) Handbook of Physical Constants, Memoir 97, Sect.21, 459-482, Geol. Soc.Am., New York
- COSTIN,L.S.(1983): A Microcrack Model for the Deformation and Failure of Brittle Rock. J.Geophys.Res., 88(B11), 9485-9492
- 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
- CRUDEN,D.M.(1970): A Theory of Brittle Creep in Rock Under Uniaxial Compression. J.Geophys.Res., 75, 3431-3442
- CRUDEN,D.M.(1974): The Static Fatigue of Brittle Rock Under Uniaxial Compression. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., 11, 67-73
- DAFALIAS,Y.F. and POPOV,E.P.(1976): Plastic Internal Variables Formalism of Cyclic Plasticity. J.Appl.Mech., 98, 645-651

- DAHL,D. and VOIGHT,B.(1969): Isotropic and Anisotropic Plastic Yield Associated with Cylindrical Underground Excavations. In: BREKKE,T.L. and JORSTAD,F.A.(ed.) Proc.Int.Symp.Large Permanent Underground Openings, 105-110, Oslo
- DALY,R.A., MANGER,G.E., and CLARK,S.P.Jr.(1966): Density of Rocks. In: CLARK,S.P.Jr.(ed.) Handbook of Physical Constants, Memoir 97, Sect.4, 19-26, Geol. Soc.Am., New York
- DEBSCHÜTZ,W. and SCHOPPER,J.R.(1987): Druckeinflüsse auf die Permeabilität. In: HÄNEL,R. und SCHOPPER,J.R.(ed.) KTB-Report 87-2: Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik, 137-151
- DEMUTH,R.B., MARGOLIN,L.G., NICHOLS,B.D., ADAMS,T.F., and SMITH,B.W. (1985): SHALE: A Computer Program for Solid Dynamics. Los Alamos National Laboratory Rep. LA-10236/UC-32
- DESAI,C.S. and REESE,L.C.(1970): Stress-Deformation and Stability Analyses of Deep Boreholes. Proc.2nd Int.Congr.Int.Soc.Rock Mech. Beograd, 2, 475-484
- DETOURNAY,E.(1983): Two-Dimensional Elastoplastic Analysis of a Deep Cylindrical Tunnel Under Non-Hydrostatic Loading. PhD-Thesis, University of Minnesota
- DETOURNAY,E. and St.JOHN,C.(1986): Improved Model of Rock Mass Dilatation. Rep. DNA-TR-85-199, Agbabian Assoc., El Segundo, CA
- DETOURNAY,E., ROEGIERS,J.C., and CHENG,A.D.H.(1987): Some New Examples of Poroelastic Effects in Rock Mechanics. Proc. 28th US Symp.Rock Mech.Tucson, 575-583, A.A.Balkema, Rotterdam - Boston
- 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
- DEY,T.N. and KRANZ,R.L.(1987): Flake Mechanics, Borehole Breakouts, and Thermal Spallation. Proc. 28th US Symp.Rock Mech.Tucson, 413-432, A.A.Balkema, Rotterdam - Boston
- DGEG(1979a): Empfehlungen für die Versuchstechnik im Fels. Empfehlung Nr.1: Einaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. Bautechnik, 56, 217-220
- DGEG(1979b): Empfehlungen für die Versuchstechnik im Fels. Empfehlung Nr.2: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. Bautechnik, 56, 221-224
- DGEG(1982): Empfehlung Nr.5 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.: Punktlastversuche an Gesteinsproben. Bautechnik, (1), 13-15
- DGEG(1984): Empfehlung Nr.9 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.: Wasserdruckversuch in Fels. Bautechnik, (4), 112-116
- DIETRICH,H.G. und HEINISCH,M.(1987): Die Geowissenschaftliche Bohrungsbearbeitung vor Ort unter Einbeziehung des Feldlabors. In: KTB-Report 87-1, 146-163

- DÖRMAN,H.(1952): Dichte von Mineralen und Gesteinen, Porosität der Gesteine. In: EUCKEN,A.(Ed.): LANDOLT-BÖRNSTEIN. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik; III.Band: Astronomie und Geophysik, 313-325, Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- DRAXLER,J.K.(1987): Erfahrungen mit Bohrlochmessungen im Kristallin. In: KTB-Report 87-1, 130-145
- DREYER,W.(1967): Die Festigkeitseigenschaften natürlicher Gesteine insbesondere der Salz- und Karbongesteine. Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochemie der mineralischen Rohstoffe, Feft 5, Gebr.Bornträger, Berlin-Nikolassee
- DRUCKER,D.C. and PRAGER,W.(1952): Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quart.Appl.Math., 10(2), 157-165
- DURELLI,A.J., OBERT,L. and PARKS,V.J.(1968): Stress Required to Initiate Core Disking. Trans.Soc.Min.Eng., 241(Sept)
- 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. Forschungskonzeption und Zielsetzungen. Geowissenschaften in unserer Zeit, 4(1), 19-33
- ENGESER,B. und UJMA,K.-H.(1987): Spülungssysteme in der Vor- und Hauptbohrung. In: KTB-Report 87-1, 69-83
- ETHERIDGE,M.A., WALL,V.J., COX,S.F., and VERNON,R.H.(1984): The Role of the Fluid Phase During Metamorphism and Deformation. J.Metamorphic Geol., 1, 205-226
- EVANS,H.E.(1984): Mechanisms of Creep Fracture. Elsevier Appl. Sci.Publ., London-New York
- 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, Balkema, Rotterdam
- FAIRHURST,C. and COOK,N.G.W.(1966): The Phenomenon of Rock Splitting Parallel to the Direction of Maximum Compression in the Neighbourhood of a Surface. Proc.1st.Congr.Int.Soc.Rock Mech. Lisbon, 1, 687-692
- FECKER,E. und REIK,G.(1987): Baugeologie. Enke Verlag, Stuttgart
- FEDER,G. und ARWANITAKIS,M.(1976): Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlrumbauten. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 121(4) 103-117
- FEDER,G.(1978): Versuchsergebnisse und analytische Ansätze zum Scherbruchmechanismus im Bereich tiefliegender Tunnel. Rock Mech., Suppl.6, 71-102

- FERNANDEZ,G. and HENDRON,A.J.(1984): Interpretation of a Long-Term In Situ Borehole Test in a Deep Salt Formation, *Bull.Ass.Eng.Geol.*, Vol.21, No.1, 23-38
- FJÆER,E., MALMO,J.T., LÖKBERG,O.J., and HOLT,R.M.(1987): Optical Studies of Cavity Failure in Weak Sedimentary Rocks. In: Herget,G. and Vongpaisal,S.(eds.): *Proc.6th Int.Congr.ISRM, Montreal, 887-891, 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
- FRIEDMAN,M.(1972): Residual Elastic Strain in Rocks. *Tectonophysics*, 15, 297-
- FRIEDMAN,M.(1975): Fracture in Rock. *Rev.Geophys.& Space Phys.*, 13(3), 352-358
- FRIEDMAN,M. and LOGAN,J.M.(1970): Influences of Residual Elastic Strain on the Orientation of Experimental Fractures in Sandstone. *J.Geophys.Res.*, 75, 397-405
- FRITZ,P.(1984): An Analytical Solution for Axisymmetric Tunnel Problems in Elasto-Viscoplastic Media. *Int.J.Num.& Analyt.Meth.Geomech.*, 8, 325-342
- FUCHS,K. and ZOBACK,M.D.(1988): Untersuchung des Spannungsfeldes in der KTB-Tiefbohrung mit kombinierten Methoden. Forschungsantrag an DFG-Schwerpunkt KTB.
- FYFE,W.S., TURNER,F.J., and VERHOOGEN,J.(1958): Metamorphic Reactions and Metamorphic Facies. *Geol.Soc.Amer.Mem.*, 73
- GALDIN,N.E., LUBIMOVA,E.A., NARTIKOEV,V.D., POPOV,Y.A., SEMASHKO,S.A., SKORNYAKOV,V.M., and SMIRNOVA,E.V.: Rock Thermal Properties. In: KOSLOVSKY,Y.A.(ed.): *The Superdeep Well of the Kola Peninsula, 383-386. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo*
- GALLE,E.M. and WILHOIT,J.C.(1961): Stresses Around a Wellbore Due to Internal Pressure and Nonsymmetrical Geostatic Stresses. *Soc.Petr.Engrs.*, Paper No.168
- 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.& Geomech.Abstr.*, 10, 209-233
- GEERTSMA,J.(1966): Problems of Rock Mechanics in Petroleum Production Engineering. *Proc. 1st Int.Congr.Int.Soc.Rock Mech.*, Lisbon, 1, 585-594
- GÖRTLER,H.(1975): *Dimensionsanalyse. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York*
- GRIFFITH,A.A.(1920): The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Phil.Trans. Royal Soc. London, Series A*, 221, 163-198
- GRIGGS,D.T.(1939): Creep of Rocks. *J.Geol.*, 47, 225-251

- GRIGGS, D.T. (1974): A Model of Hydrolytic Weakening in Quartz. *J. Geophys. Res.*, 79, 1653-1661
- GROß, H. (1984): Standsicherheitsberechnung nach der Trajektorienmethode. Veröff. Nr. 95, Inst. Bodenmech. u. Felsmech., Univ. Karlsruhe
- GUENOT, A. (1987): Contraintes et ruptures autour des forages pétroliers. Proc. 6th Int. Conf. Rock Mech., ISRM, Montreal, 109-117; Balkema, Rotterdam.
- GUTENBERG, B. (1952): Elastische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. In: EUCKEN, A. (Ed.): *LANDOLT-BÖRNSTEIN. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik; III. Band: Astronomie und Geophysik*, 326-330, Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- HÄNEL, R. (1987): Das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm - eine Herausforderung an die Bohrlochgeophysik. In: *KTB-Report 87-2*, 1-19
- HADLEY, K. (1975a): Azimuthal Variation of Dilatancy. *J. Geophys. Res.*, 80(35), 4845-4850
- HADLEY, K. (1975): Vp/Vs Variations in Dilatant Rocks. *PAGEOPH*, 113, 1-23
- HADLEY, K. (1976): The Effect of Cyclic Stress on Dilatancy: Another Look. *J. Geophys. Res.*, 81(14), 2471-2474
- HAIMSON, B.C. and HERRICK, C.G. (1985): In Situ Stress Evaluation From Borehole Breakouts Experimental Studies. Proc. 26th US Rock Mech. Symp., 1207-1218, Balkema, Rotterdam
- HANDIN, J. (1966): Strength and Ductility. In: CLARK, S.P. Jr. (ed.) *Handbook of Physical Constants*, Memoir 97, Sect. 11, 223-290, Geol. Soc. Am., New York
- HANDIN, J. (1969): On the Coulomb-Mohr Failure Criterion. *J. Geophys. Res.*, 74(22), 5343-5348
- HANDIN, J. and CARTER, N. (1979): Rheological Properties of Rocks at High Temperatures. 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
- HEARD, H. (1972): Steady State Flow of Polycrystalline Halite at Pressure of 2 Kilobars. In: *Flow and Fracture of Rocks*. AGU Monograph No. 16, 191-209, Washington, D.C.
- HENDRON, A.J. and AIYER, A.K. (1972): Stresses and Strains Around a Cylindrical Tunnel in an Elasto-Plastic Material with Dilatancy. Tech. Rep. No. 10, Omaha District, Corps of Engrs., Contract DACA 45-69-C-0100
- HEUZE, F.E. (1980): Scale Effects of the Determination of Rock Mass Strength and Deformability. *Rock Mech.*, 12, 167-192
- 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

- HICKMAN,S.H., HEALEY,J.M. and ZOBACK,M.S.(1985): In Situ Stress, Natural Fracture Distribution, And Borehole Elongation in the Auburn Geothermal Well, Auburn, New York. *J.Geophys.Res.*, 90 (B7), 5497-5512
- HILBER,H.M. and TAYLOR,R.L.(1976): A Finite Element Model of Fluid Flow in Systems of Deformable Fractured Rock. Rep.UC SESM 76-5, Univ.Calif., Berkeley,CA
- HILL,R.(1950): *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford University Press, New York
- HILL,R.(1967): *The Essential Structure of Constitutive Laws for Metal Composites and Polycrystals*. *J.Mech.Phys.Solids*, 15, 79-95, London
- HINZE,E.(1988): Spannungsmessungen mit Texturgoniometer an Gesteinsbruchstücken. Forschungsantrag an DFG-Schwerpunkt KTB
- 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.(1979a): Analyses of Longitudinal Splitting of Uniaxially Compressed Rock Cylinders. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 16, 163-177
- HOLZHAUSEN,G.R. and JOHNSON,A.M.(1979b): The Concept of Residual Stress in Rock. *Tectonophysics*, 58, 237-267
- HORII,H. and NEMAT-NASSER,S.(1983): Overall Moduli of Solids With Microcracks: Load-Induced Anisotropy. *J.Mech.Phys.Solids*, 31(2), 155-
- 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
- HOSKINS,E.R.(1969): The Failure of Thick Walled Hollow Cylinders of Isotropic Rock. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 6, 99-125
- HUBBERT,M.K. and WILLIS,D.G.(1957): *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. *Trans.Amer.Inst.Min.Eng.*, 210, 153-
- IRANI,F.K. and KHAN,A.S.(1987): Failure Behaviour of Rocks at Ambient Temperature. *Mechanics of Materials*, 6, 271-283
- ISRM (1974): *Suggested Methods for Determining Shear Strength*. Comm. Stand. Lab.& Field Tests, Doc.No.1
- ISRM (1979): *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. Comm. Stand. Lab.& Field Tests, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 16, 135-140
- ISRM (1979): *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties, and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. Comm. Stand. Lab.& Field Tests, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 16, 141-156

- ISRM(1988): Rock Engineering Software. A Survey of Computer Programs in Rock Mechanics Research and Engineering Practice. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., 25(4), 183-251
- JAEGER,J.C.(1960): Shear Failure of Anisotropic Rocks. Geol.Magazine, 97(1), 65-72
- JAEGER,J.C.(1969): Elasticity, Fracture, and Flow. Methuen, London
- JAEGER,C. and COOK,N.G.W.(1971): Fundamentals of Rock Mechanics. Reprint, Science Paperbacks, Chapman and Hall
- JOHN,K.W.(1968): Festigkeit und Verformbarkeit von druckfesten, regelmäßig gefügten Diskontinuen. Veröff.Nr.37, Inst.Bodenmech.Felsmech.Univ.Karlsruhe
- KACHANOV,L.M.(1961): Rupture Time Under Creep Conditions. Problems of Continuum Mechanics, Vol. dedic. to N.I.Muskhelishvili 70th Birthday, S.I.A.M., 202-218, Philadelphia
- KACHANOV,L.M.(1986): Introduction to Continuum Damage Mechanics. Kluwer Academic Publ., Dordrecht-Boston-Lancaster
- KAISER,P.K. and MALONY,S.(1987): Factors Influencing the Stability of Deep Boreholes. In: Herget,G. and Vongpaisal,S.(eds.): Proc.6th Int.Congr.ISRM, Montreal, 675-680, Balkema, Rotterdam
- KASTNER,H.(1971): Statik des Tunnel- und Stollenbaus. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg
- KAUTHER,R.(1984): Ermittlung der freien Standhöhe eines zylindrischen Schachts nach dem Charakteristikenverfahren. Diplomarbeit, Inst.f.Bodenmech.& Felsmech., Univ.Karlsruhe
- 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
- KEHRER, P.(1987): Konzept einer optimalen Datenanalyse an Vor- und Hauptbohrung, KTB-Report 87-1: Vorträge der Bereiche Geowissenschaften, Operative Geologie und Technik der Projektleitung beim KTB-Kolloquium Seeheim 19.-21.9.1986, 104-116
- 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
- KESSELS,W.(1988): Bohrlochstabilität. In: KTB-Report 88-4, 179-195
- KIRBY,S.H.(1983): Rheology of the Lithosphere. Rev.Geophys.&Space Phys., 21, 1458-1487
- 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
- KOVARI, K. (1977): The Elasto-Plastic Analysis in the Design Practice of Underground Openings. In: G.Gudehus (ed.): *Finite Elements in Geomechanics*, 377-412, John Wiley & Sons; London - New York - Sydney - Toronto
- KOWALLIS, B.J. and WANG, H.F. (1983): Microcrack Study of Granitic Cores from Illinois Deep Borehole UPH3. *J.Geophys.Res.*, 88(B9), 7373-7380
- KRANZ, R.L. (1979a): Crack Growth and Development During Creep of Barre Granite. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, 16, 23-35
- KRANZ, R.L. (1979b): Crack-Crack and Crack-Pore Interactions in Stressed Granite. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, 16, 37-47
- KRANZ, R.L. (1980): The Effects of Confining Pressure and Stress Difference at the Onset of Tertiary Creep. *J.Geophys.Res.*, 85(B4), 1854-1866
- KRANZ, R.L. and SCHOLZ, C.H. (1977): Critical Dilatant Volume of Rocks at the Onset of Tertiary Creep. *J.Geophys.Res.*, 82(30), 4893-4898
- KURITA, K., GETTING, I.C., and SPETZLER, H.A. (1980): The Effect of Thermal Thermal Cycling on Volumetric Strain. *EOS, Trans.Amer.Geophys.Union*, 61, T112
- LACHAT, J.C. and WATSON, J.O. (1976): Effective Numerical Treatment of Boundary Integral Equations: A Formulation for Three-Dimensional Elasto-Static. *Int. J. Num.Meth.Engng.*, 10, 991-1005
- LAMA, R.D. and VUTUKURI, V.S. (1978): *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Vols.II, III, IV, TransTech Publ., Clausthal
- LAMÉ, G. (1852): *Leçon sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*. Paris
- LAU, C.W., ARGON, A.S., and McCLINTOCK, F.A. (1983): Application of the Finite Element Method in Micromechanical Analyses of Creep Fracture Problems. *Computers & Structures*, 17(5-6), 923-931
- LECKIE, F.A. and HAYHURST, D.R. (1977): Constitutive Equations for Creep Rupture. *Acta Metallurgica*, 25, 1059-
- LEE, Y.S. and SMITH, L.C. (1980): An Analysis of Power Law Viscous Materials Under a Plane Strain Condition Using Complex Stream Functions. *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs.*, 48, 486-492
- 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.
- LEICHNITZ, W. (1981): Mechanische Eigenschaften von Felstrennflächen im direkten Scherversuch. *Veröff.Nr.89, Inst. Bodenmech.u.Felsmech., Univ.Karlsruhe*
- LEMP, 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 Tokyo
- LEMPP,Ch. and H.-B.MÜHLHAUS (1985): Splitting and Core Discing in Deep Boreholes. In: Proc.2nd Int.Symp.Obs.Cont.Crust through Drilling, 94, Seeheim; AWS Bonn
- 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
- LEMPP,Ch. und NATAU,O.(1988a): Änderung des Verformungsverhaltens granitischer Gesteine bei zyklischer Wechselbelastung unter erhöhten Temperaturen. Poster, Proc. 1.KTB-Schwerpunktkolloquium, Gießen.
- LEMPP,Ch. und NATAU,O.(1988b): Änderung von Festigkeitseigenschaften kristalliner Gesteine bei thermomechanischer Wechselbelastung im Hinblick auf die Bohrlochstabilität. Schlußbericht BMFT 2-609 268 für KTB-PL
- LOGAN,J.M.(1975): Friction in Rocks. Rev.Geophys.& Space Phys., 13(3), 358-361
- LOMNITZ,C.(1956): Creep Measurements in Igneous Rocks. J.Geol., 64(5), 473-479
- LOUIS,C., DESSENNE,J.L., and FEUGA,B.(1977): Interaction Between Water Flow Phenomena And the Mechanical Behaviour of Soil or Rock Masses. In: G.Gudehus (ed.): Finite Elements in Geomechanics, 479-511, John Wiley & Sons; London - New York - Sydney - Toronto
- LURJE,A.T.(1963): Räumliche Probleme der Elastizitätstheorie. Akademie Verlag, Berlin
- LUX,K.-H., ROHKAHR,R. und ZANDER-SCHIEBENHÖFER,D.(1987): Spannungsmessungen - Interpretation. Zwischenbericht zum Forschungsvorh. Lu 328/1-1
- MAGARA,K.(1978): Compaction and Fluid Migration. Elsevier, Amsterdam, 319
- 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
- MARX,C.(1967): Über die Gesteinszerstörung beim drehenden Bohren. Erdöl-Erdgas Z., 83(10), 354-363
- 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
- MISRA,A.K. and MURRELL,S.A.F.(1965): An Experimental Study of the Effect of Temperature and Stress on the Creep of Rocks. Geophys.J.Roy.Astron.Soc., 9(5), 509-

- 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
- MOGI,K.(1967): Effect of the Intermediate Principal Stress in Rock Failure. J.Geophys.Res., 72, 5117-5131
- MOGI,K.(1972): Fracture and Flow of Rocks. Tectonophysics, 13, 541-
- MOGI,K.(1974): On the Pressure Dependency of Strength of Rocks and the Coulomb Fracture Criterion. Tectonophysics, 21, 273-
- MOHR,O.(1900): Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? Z.VDI, 44, 1572-1577
- MOHR,O.(1914): Abhandlungen aus dem Gebiet der technischen Mechanik. 2.Ed., W.Ernst & Sohn, Berlin
- MÜHLHAUS,H.-B.(1980): Berechnung von Verzweigungsmoden spröder Gesteine. Veröff.Nr.85, Inst.Bodenmech.Felsmech.Univ.Karlsruhe
- 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
- MÜLLER-SALZBURG,L.(1978): Der Felsbau. Dritter Band: Tunnelbau. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- NADAI,A.(1924): Über die Gleit- und Verzweigungsflächen einiger Gleichgewichtszustände bildsamer Massen und die Nachspannungen bleibend verzerrter Körper. Z.Phys., 30, 106-138
- NADAI,A.(1938): The Influence of Time Upon Creep; the Hyperbolic Sine Creep Law. Timoshenko Anniversary Volume, 155-170; Macmillan, New York
- NADAI,A.(1963): Theory of Flow and Fracture of Solids. Vol.II; McGraw Hill, New York
- NEKUT,A., CONNERNEY,J.E.P., and KUCKES,A.F.(1977): Deep Crustal Electrical Conductivity; Evidence for Water in the Lower Crust. Geophys.Res.Lett., 4(6), 239-242
- NEMAT-NASSER,S. and HORII,H.(1982): Compression-Induced Nonplanar Crack Extension With Application to Splitting, Exfoliation, And Rockburst. J.Geophys.Res., 87(B8), 6805-6821
- NEUREITER,W.(1983): Integralgleichungsmethode, FVV-Programmsystem BETSY (Boundary Element Code for Thermoelastic Systems), Dreidimensionale Version. Lehrstuhl für Mechanik(A), Techn.Univ. München

- NONAKA,T.(1978): An Elasto-Visco-Plastic Analysis for Spherically and Cylindrically Symmetric Problems. *Ingenieur-Archiv*, 47, 27-33
- 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
- OBERT,L. and STEPHENSON,D.E.(1965): Stress Conditions Under Which Core Disking Occurs. *Trans.Soc.Min.Eng.*, 232(Sept), 227-235
- OBERT,L. and DUVAL,W.I.(1967): *Rock Mechanics And the Design of Structures in Rock*. John Wiley and Sons, New York
- ODQVIST,F.K.G. und HULT,J.(1962): *Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe*, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg
- ODQVIST,F.K.G. and ERIKSON,J.(1963): Influence of Redistribution of Stress on Brittle Creep Rupture of Thick-Walled Tubes Under Internal Pressure. *Progr.Appl.Mech.*, MacMillan, New York
- OHNISHI,Y., KOBAYASHI,A., and NISHIGAKI,M.(1987): Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Rocks Around an Underground Opening. In: Herget,G. and Vongpaisal,S.(eds.): *Proc.6th Int.Congr.ISRM, Montreal, 207-210*, Balkema, Rotterdam
- OWEN,D.R.J. and HINTON,E.(1980): *Finite Elements in Plasticity*. Pineridge Press, Swansea, GB
- PARISEAU,W.G.(1968): Plasticity Theory for Anisotropic Rocks and Soils. *Proc.10th US Symp.Rock Mech. Austin, Ch.10*, 267-295
- 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
- PASLEY,P.R. and CHEATHAM,J.B.J.(1963): Rock Stresses Induced by Flow of Fluids into Boreholes. *Soc.Petr.Eng.J.*, (3), 85-94
- PENG,S.D.(1971): Stresses Within Elastic Circular Cylinders Loaded Uniaxially and Triaxially. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 8, 399-432
- 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
- PÉRIÉ,P.J., GOODMAN,R.E., and DOE,T.J.(1988): Simulation of Borehole Breakouts in a Model Material. Technical Note. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 25, 97-98
- PERZYNA,P.(1966): Fundamental Problems in Viscoplasticity. *Advances Appl.Mech.*, 9, 243-377
- PLUMB,R.A. and HICKMAN,S.H.(1985): Stress Induced Borehole Elongation: A Comparison Between the Four-Arm Dipmeter And the Borehole Televiwer in the Auburn Geothermal Well: *J.Geophys.Res.*, 90(B7), 5513-5521

- PRATT,H.R., SWOLFS,H.S., BRACE,W.F., BLACK,A.D., and HANDIN,J.W.(1977): Elastic and Transport Properties of In-Situ Jointed Granite. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 14, 35-45
- REIK,G. und VARDAR,M.(1974): Bestehen Zusammenhänge zwischen residuellen Spannungen und tektonischer Beanspruchung? *Rock Mech.*, 6, 101-116
- REINER,M.(1971): *Advanced Rheology*. H.K.Lewis & Co.Ltd, London
- REYES,S.F. and DEERE D.U.(1966): Elastic-Plastic Analysis of Underground Openings by the Finite Element Method. *Proc.1st Int.Congr.Int.Soc.Rock Mech.*, 2, 477-483
- 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
- ROBERTSON,E.C.(1964): Viscoelasticity of Rocks. In: JUDD,W.R.(ed.): *State of Stress in the Earth's Crust*, 181-234, Elsevier, New York
- RODATZ,W.(1973): Berechnung räumlicher, hydraulisch-mechanischer Wechselwirkungen in klüftigem Fels. *Diss. Univ. Karlsruhe*
- RUDNICKI,J.W.(1977): The Inception of Faulting in a Rock Mass With a Weakened Zone. *J.Geophys.Res.*, 82(5), 844-854
- 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.
- RUMMEL,F.(1975): Experimentelle Untersuchungen zum Bruchvorgang in Gesteinen. *Habilitationsschrift*, Institut für Geophysik, Ruhr-Universität Bochum
- RUMMEL,F.(1988): Hydraulic Fracturing Stress Measurements. *KTB-Report 88-8*, 53-65, im Druck

- RUMMEL,F., ALHEID,H.J., and FROHN,C.(1978): Dilatancy and Fracture-Induced Velocity Changes in Rock and their Relation to Frictional Sliding. PAGEOPH, 116, 743-
- RUMMEL,F. und MÖHRING-ERDMANN,G.(1984): Stabilität von Tiefbohrungen im kristallinen Grundgebirge. Bericht zu DFG Ru225/7-1, Ruhr Univ., Bochum
- RUTTER,E.H.(1972): The Influence of Interstitial Water on the Rheological Behaviour of Calcite Rocks. Tectonophysics, 14, 13-33
- SALUSTOWICZ,A.(1965): Der Gebirgsdruck auf den Streckenausbau als Funktion der Zeit. Abh.Dt.Akad.Wiss., 6.Ländertreffen Internat.Büro Gebirgsmech., 85-109. Akademie Verlag, Berlin
- SANDLER,I. and DiMAGGIO,F.L.(1970): Material Models for Rocks, DASA Rep.2595, Weidlinger Cons.Eng., New York
- SANTARELLI,F.J., BROWN,E.T., and MAURY,V.(1986): Analysis of Borehole Stresses Using Pressure-Dependent, Linear Elasticity. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., 23(6), 445-449
- 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
- SAVAGE,J.C. and MOHANTY,B.B.(1969): Does Creep Cause Fracture in Brittle Rocks? J.Geophys.Res., 74, 4329-4332
- 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
- SCHAMP,J.(1985): Stabilität übertiefer Bohrungen in unterschiedlichen Gesteinsschichten. Diplomarbeit, Technische Universität Clausthal
- SCHETELIG,K., HEITFELD,K.H. und BLÜMEL,P. (1988): Zerfall von Bohrkernen bei Entlastung in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Gefüge, Festigkeit, Anisotropie, in-situ-Spannungszustand und Gewinnungstiefe. Forschungsantrag an DFG Schwerpunkt KTB
- SCHOCK,R.N., HEARD,H.C., and STEPHENS,D.R.(1973): Stress-Strain Behavior of a Granodiorite and Two Graywackes on Compression to 20 Kilobars. J.Geophys.Res., 78(26), 5922-5941
- SCHOLZ,C.H.(1968): Mechanism of Creep in Brittle Rock. J.Geophys.Res., 73(10), 3295-3302
- SCHOLZ,C.H.(1972): Static Fatigue of Quartz. J.Geophys.Res., 77(11), 2104-2114
- SCHOLZ,C.H.(1988): The Brittle-Plastic Transition and the Depth of Seismic Faulting. Geol.Rundschau, 77/1, 319-328

- SCHOLZ,C.H. and KRANZ,R.L.(1974): Notes on Dilatancy Recovery. J. Geophys. Res., 79(14), 2132-2135
- 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
- SENDER,F. und THIERBACH,R.(1987): Bohrloch-Reflexionsradar mit azimuthaler Richtungsbestimmung. In: KTB-Report 87-2, 411-426
- SIH,G.C. and LIEBOWITZ,H.(1968): Mathematical Theories of Brittle Fracture. In: Treatise on Fracture, 2, 67-190, Academic, New York
- 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
- SKINNER,B.J.(1966): Thermal Expansion. In: CLARK,S.P.(ed.) Handbook of Physical Constants, Memoir 97, Sect.6, 75-96, Geol. Soc.Am., New York
- 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.
- SPENCER,J.W.Jr. and NUR,A.M.(1976): The Effects of Pressure, Temperature, and Pore Water on Velocities in Westerly Granite. J.Geophys.Res., 81(5), 899-904
- STACEY,F.D.(1969): Physics of the Earth, 192-220. John Wiley, New York and London
- STACEY,T.R.(1982): Contribution to the Mechanism of Core Disking. J. S.Afr. Inst. Min.Metall., 82(9)
- SULEM,J. and VARDOULAKIS,I.(1988): A New Approach to Borehole Stability Based on Bifurcation Theory. Num.Meth.Geomech., Proc.ICONMIG 88 Innsbruck, 3, 1929-1935
- TAPPONIER,P. and BRACE,W.F.(1976): Development of Stress Induced Microcracks in Westerly Granite. Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., 13, 103-112
- 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
- TEUFEL,L.W.(1987): Permeability Changes During Shear Deformation of Fractured Rock. Proc. 28th US Symp.Rock Mech.Tucson, 473-480, 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). Agbajian Associates, Rep.U-7910-5117, El Segundo, CA
- VARDAR,M.(1972): 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
- VENTURINI, W.S. (1983): *Boundary Element Method in Geomechanics*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo
- 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
- VON MISES, R. (1928): Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen. *Z. Ang. Math. u. Mech.*, 8, 161-185
- VUTUKURI, V.S., LAMA, R.D., and SALUJA, S.S. (1974): *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Vol. I, TransTech Publ., Clausthal
- WALLNER, H., GRÜN, G.U. und NEUGEBAUER, H.J. (1987): Der Einfluß druck-kontrollierter 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
- WAVERSIK, W.R. and BRACE, W.F. (1971): Post-Failure Behaviour of a Granite and Diabase. *Rock Mech.*, 3, 61-85
- WEERTMAN, J. (1970): The Creep Strength of the Earth's Mantle. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 8, 145-168
- WEERTMAN, J. and WEERTMAN, J.R. (1975): High-Temperature Creep of Rock and Mantle Viscosity. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 3, 293-315
- WILKINS, M.L. (1969): Calculation of Elastic-Plastic Flow. Lawrence Livermore Lab., Rep. UCRL-7322, Rev. 1
- WILSON, E.L. (1977): Finite Elements for Foundations, Joints, and Fluids. In: G. Gudehus (ed.): *Finite Elements in Geomechanics*, 319-350, John Wiley & Sons; London - New York - Sydney - Toronto
- WITTKÉ, W. (1984): *Felsmechanik-Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels*. Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
- WITTKÉ, W. and ERBAN (1985): Borehole Stability and Borehole Convergency. In: *Proc. 2nd Int. Symp. Obs. Cont. Crust through Drilling*, 88, Seeheim; AWS Bonn
- WONG, T.F. (1982): Effects of Temperature and Pressure on Failure and Post-Failure Behavior of Westerly Granite. *Mechanics of Materials*, 1, 3-17

- WONG,T.F. and BRACE,W.F.(1979): Thermal Expansion of Rocks: Some Measurements at High Pressure. *Tectonophysics*, 57, 95-117
- WONG,R.C.K. and KAISER,P. (1988): Design and Performance Evaluation of Vertical Shafts: Rational Shaft Design Method and Verification of Design Method. *Canad. Geotechn. J.*, 25, 320-327
- WU,F.T. and THOMSEN,L.(1973): Microfracturing and Deformation of Westerly Granite Under Creep Conditions. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.*, 12, 167-173
- ZHENG,Z.(1988): Photoelastic Model Showing the Stress Distribution around a Borehole Breakout. Cover Photo, *EOS Trans. Amer.Geophys.Union*, 69(16), 1988
- ZHENG,Z. and COOK,N.G.W.(1985): Generation and Analysis of Stable Wellbore Cross-Sections. *EOS, Trans.Amer.Geophys.Union*, 66, Nov.12
- ZHU,W., LI,G., and WANG,K.(1985): Analyses of Disking Phenomenon and Stress Field in the Region of an Underground Powerhouse. *Rock Mech. and Rock Engng.*, 18, 1-15.
- ZIENKIEWICZ,O.C.(1971): *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill, London
- 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
- ZIENKIEWICZ,O.C. and PANDE,G.N.(1977): Some Useful Forms of Isotropic Yield Surfaces for Soil and Rock Mechanics. In: G.Gudehus (ed.): *Finite Elements in Geomechanics*, 179-190, John Wiley & Sons; London - New York - Sydney - Toronto
- ZOBACK,M.D. and BYERLEE,J.D.(1975a): The Effect of Cyclic Differential Stress on Dilatancy in Westerly Granite Under Uniaxial and Triaxial Conditions. *J.Geophys.Res.*, 80(11), 1526-1530
- ZOBACK,M.D. and BYERLEE,J.D.(1975b): Permeability and Effective Stress. *Am.Soc.Petrol.Geol.Bull.*, 59(1), 154-158
- ZOBACK,M.D., MOOS,M., and MASTIN,L.(1985): Well Bore Breakouts And In Situ Stress. *J.Geophys.Res.*, 90(B7), 5523-5530