"Bohrtechnik und Bohrlochstabilität - ein Diskussionsbeitrag"

B. Hoffers (Hannover)

Bei Bohrungen für die Erschließung und Ausbeutung von Kohlenwasserstoffen wurden viele Vorstellungen über Bohrlochstabilität und Maßnahmen zu deren Erhaltung entwickelt.

Hierbei spielen natürlich die geologische Situation der KW-Lagerstätten eine große Rolle, da sie häufig an zur Instabilität neigende Formationen wie Evaporite oder Tonsteine geknüpft sind, sowie der spezielle Zweck der Bohrungen, die ja nur kurze Zeit offen stehenbleiben und bei denen auftretende Instabilitäten mit einem recht einfachen Maßnahmenkatalog bekämpft werden. Aus den Erfahrungen von Lagerstättenstimulationen wurden Vorstellungen erarbeitet, wie, je nach den herrschenden Gebirgsspannungsbedingungen, unterschiedliche Versagensweisen des Nebengesteins einer Bohrung auftreten können. Cheatham (1984) gibt einen exzellenten Überblick über das Thema Bohrlochstabilität, wie es sich aus dem reichen Erfahrungsschatz der Ölindustrie darstellt.

Für KTB sind nicht alle diese Erfahrungen übertragbar, weil das Gestein, in dem die KTB-Bohrungen stehen, metamorphen oder magmatischen Ursprungs ist, und es fehlen Erfahrungen überhaupt, wie etwa über das Langzeitverhalten von unverrohrten Bohrlöchern. Die bei KTB geplanten langen unverrohrten Bohrlochstrecken, die ja den Beanspruchungen durch das Vertiefen der Bohrung ausgesetzt sind, lassen die Frage aufkommen, inwieweit nicht durch entsprechende Wahl von Werkzeug, Bohrgarnitur, Spülung oder Betriebsparametern der Bohranlage (beim Bohren selber oder Gestängeein- und -ausbau) Bohrlochinstabilitäten vorgebeugt oder deren Entstehung verhindert werden kann.

Eine schlüssige Antwort auf diese Frage läßt sich nur nach eingehender Beschäftigung mit einer Reihe von Einzelfragen geben, wie etwa

- Schwingungsverhalten des Bohrgestänges
- Dynamik der Bohrgarnitur und Richtungsstabilität
- Auswirkungen der Bohrspülung und deren Zirkulation auf das Gebirge
- Mechanismus der Gesteinszerstörung beim Bohren, usw.

Man sieht, daß bei diesen Einzelfragen die Reaktion des Gebirges auf den aktuellen oder geplanten technischen Eingriff oder Vorgang hin geklärt werden muß, um schlimme Folgen zu verhindern oder zu begrenzen.

Der Vorgang des Bohrens selber ist im Prinzip einfach, wie Abb. 1. zeigt:

Der Meißel wird belastet und gedreht, durch diese mechanische Aktion wird Gestein an der Bohrlochsohle zerstört und die Fragmente von der durch den Meißel hindurchtretenden Bohrspülung nach oben transportiert. Über dem Meißel angeordnete Stabilisatoren usw. sorgen für die Beibehaltung der Richtung, in die gebohrt wird. Diese Komponenten der Bohrgarnitur sind für eine bestimmte Bohrlochgeometrie ausgelegt; tritt als unmittelbare Folge des

Bohrvorgangs eine Querschnittvergrößerung des Bohrlochs ein, kann wegen der verschlechterten Stabilisierung eine Abweichung vom vorgesehenen Verlauf eintreten.

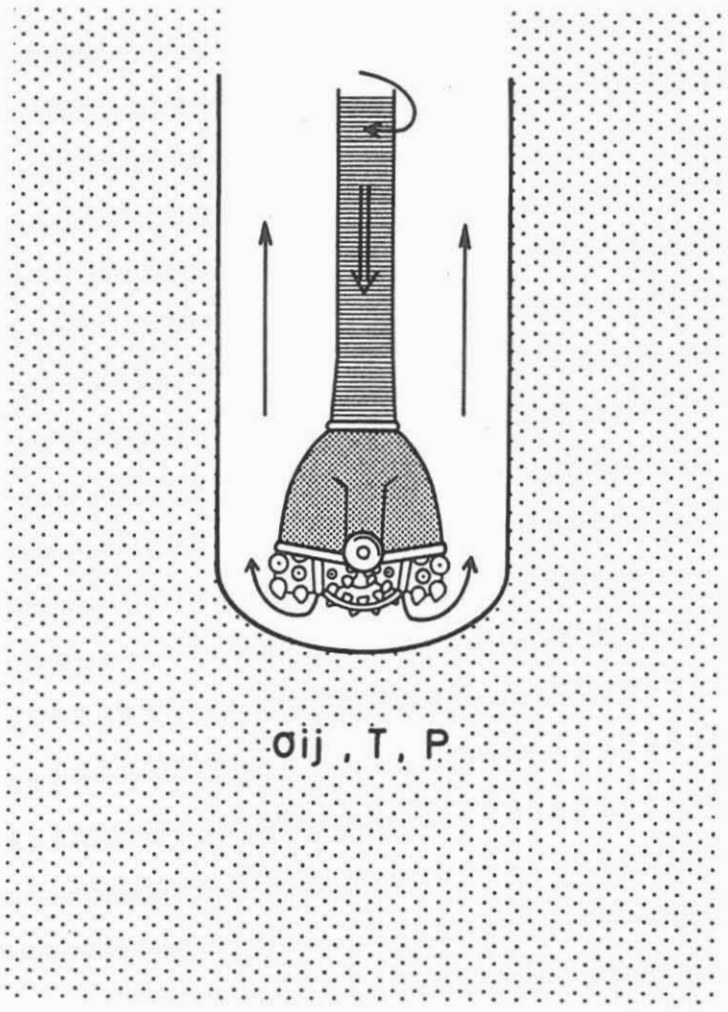

Abb. 1: Schematische Darstellung des Bohrvorgangs, der Gradienten der Gebirgsspannung, der Temperatur und des Porendrucks mit sich bringt, die zum Bohrloch hin oder weg von ihm gerichtet sein können.

Bei der allgemein angenommenen Orientierung des Gebirgsspannungstensors herrscht dann bei einem nicht senkrechten Bohrloch an der Bohrlochwand ein Spannungszustand, der ein hydraulisches Aufbrechen des Gebirges bei einem niedrigeren Innendruck erlaubt (vgl. Cheatham 1984). Abgesehen davon sind Abweichungen vom senkrechten Bohrungsverlauf auch aus anderen Gründen bohrtechnisch negativ zu bewerten.

Eines ist jedoch klar: jede bohrtechnische Maßnahme zur Richtungsstabilisierung beruht - implizit oder explizit - auf Annahmen über das Gebirgsverhalten, die richtig oder falsch, einfach oder kompliziert sein können.

Die Erfahrung hat bei vielen Bohrungen gezeigt, daß Vergrößerungen des Bohrlochquerschnitts, wie sie eben wegen ihrer potentiellen Bedeutung bei sofortigem Auftreten nach dem Ausbruch, auch noch lange Zeit nach dem Ausbruch stattfinden können, also in den mittleren und oberen Bereichen eines Bohrlochs. Auch hier muß der Beitrag der bohrtechnisch bedingten Lasten an der Bohrlochwand erfaßt und deren Wirkungsweise geklärt werden. Von diesen Lasten seien hier Druck- und Temperaturschwankungen an der Bohrlochwand als Folge des intermittierenden Zirkulierens der Spülung oder einfach deren Vorhandensein im Bohrloch näher betrachtet.

Es soll anhand dieses Beispiels gezeigt werden, daß nichtlineare und gekoppelte Prozesse hierbei eine große Rolle spielen können. Unter gekoppelten Prozessen versteht man solche, bei denen die gegenseitige Beeinflussung der physikalischen oder chemischen Systemvariablen nicht vernachlässigt werden kann, wie etwa bei einer nichtisothermen Strömung bei starker Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Fluids, wo die Strömungskenngrößen über das Materialverhalten mit der Temperatur gekoppelt sind, während bei nichtlinearen Vorgängen - nicht wie bei den linearen - die gegenseitige Addierbarkeit oder Proportionalität von Ursache und Wirkung nicht gegeben ist.

Ich möchte Ihnen nun zeigen, wie bei dem Porenwasserdruck solche Überlegungen bei Stabilitätsbetrachtungen mit einbezogen werden müssen.

Sieht man die Bohrspülung als infiltrierende Flüssigkeit mit den gleichen Eigenschaften wie Wasser an, erfolgt bei hydrostatischen Verhältnissen im ungestörten Gebirge als Konsequenz des Bohrvorgangs eine Druckerhöhung, die dann nach dem Modell des vollständigen Brunnens im gespannten Aquifer berechnet werden kann. Nach dem Prinzip der effektiven Spannung und unter Annahme eines Mohr-Coulomb'schen Bruchkriteriums ergibt sich, daß sich das Gebirge mit der Zeit immer mehr dem Bruchzustand nähert, wenn die Spülungsdichte größer als eins ist.

Diese einfachen Überlegungen geben bei näherem Zusehen zu erkennen, daß sie unzureichend sind, denn es wird linear-ungekoppelt gedacht.

Die inkrementell-linearen Biot'schen konstitutiven Beziehungen (Gleichungen 1 und 2) für ein poroelastisches Material besagen u.a., daß die Änderung des Flüssigkeitsdrucks proportional der Änderung des arithmetischen Mittels der Summe der Matrixhauptnormalspannungen ist. Experimente zeigen nun Abweichen von diesem Verhalten, das durch das Phänomen der Verfestigung durch Dilatanz oder "dilatancy hardening" (Frank 1965) beschrieben wird.

$$\tau_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} + \alpha \delta_{ij} P \qquad (1)$$

$$\zeta = -\alpha \delta_{ij} e_{ij} + \frac{1}{M} P \qquad (2)$$

Zu (1) und (2) sind τ_{ij} der Spannungstensor in der elastischen Matrix, e_{ij} der Verzerrungstensor, δ_{ij} das Kronecker-Delta, P der Porendruck, λ und μ die Lamé'schen Konstanten, ζ die Volumenverformung der Flüssigkeit und α, M die Biot'schen poroelastischen Konstanten.

Abb. 2. zeigt schematisch im τ -E -Diagramm dilatantes Verhalten eines Probekörpers, bei dem sich bei zunehmender Scherverformung neuer Porenraum bildet. Dieser neu geschaffene Porenraum füllt sich mit Fluid, dessen Druck dann gemäß Zustandsgleichung abnimmt. Die erhöhte effektive Spannung hat dann eine erhöhte Festigkeit zur Folge, bis dann durch Fließvorgänge der Druck wieder ausgeglichen wird.

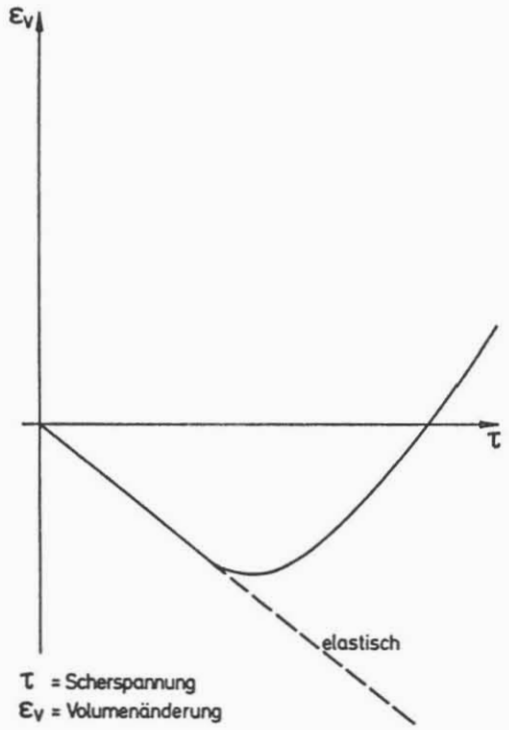

Abb. 2.:

Bei dem Phänomen der Dilatanz wird ab einer bestimmten Belastung, etwa durch das Aufreißen von Rissen, neuer Porenraum geschaffen, was sich durch das Abweichen der Volumenänderungskurve von der das elastische Verhalten charakterisierenden Geraden bemerkbar macht.

Bei dem Phänomen der Dilatanz wird ab einer bestimmten Belastung, etwa durch das Aufreißen von Rissen, neuer Porenraum geschaffen, was sich durch das Abweichen der Volumenänderungskurve von der das elastische Verhalten charakterisierenden Geraden bemerkbar macht.

In Abb. 3. sind nach Brace & Martin (1968) berechnete Porenfluiddrücke für Zylinder von Westerly-Granit als Funktion der Verformungsgeschwindigkeit dargestellt; man kann sich leicht vorstellen, daß hier zwei Prozesse gegeneinanderarbeiten: der Druckausgleich durch Fluidströmung und die Druckerniedrigung durch Fluidexpansion in dem neu entstehenden Porenraum.

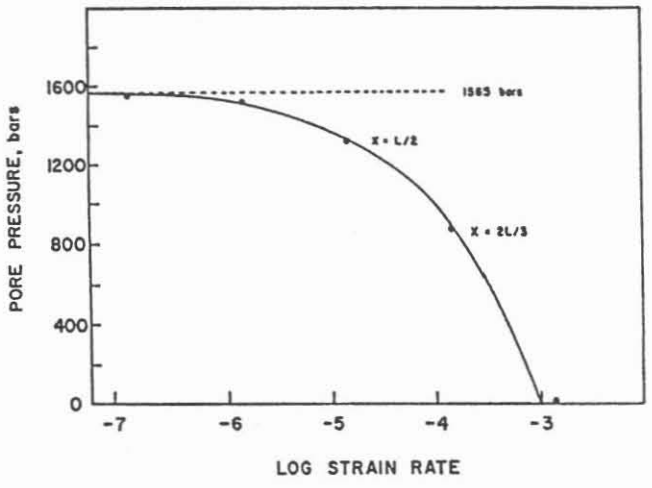

Abb. 3: Berechnete Porendruckänderungen in Westerly-Granit als Funktion der Verformungsgeschwindigkeit. Nach Brace & Martin (1968).

Ob die Verfestigung durch Dilatanz für Bohrlochstabilität eine Rolle spielt und wenn ja, welche, muß separat betrachtet werden. Wir begnügen uns damit, daß wir einen Zusammenhang zwischen Permeabilität und Gebirgsfestigkeit haben, in dem der Zeitfaktor auftritt.

Die soeben vorgeführten Biot'schen konstitutiven Beziehungen für ein poroelastisches Material sind Bestandteil der Beschreibung eines gekoppelten Prozesses, doch soll jetzt die Erweiterung dieser Beziehungen auf den nichtisothermen Fall und dessen Bedeutung betrachtet werden. Gleichungen (3) und (4) sind diese erweiterten Beziehungen für den Vorgang der Thermokonsolidation (Noorishad et al., 1984).

$$\tau_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} - (2\mu + 3\lambda)\gamma \delta_{ij} T + \alpha \delta_{ij} P \qquad (3)$$

$$\zeta = \alpha \delta_{ij} e_{ij} + \frac{1}{M} P + \frac{1}{M_T} T \qquad (4)$$

Zu (3) und (4) treten zu den Bezeichnungen von (1) und (2) noch hinzu: T - Temperatur, - Wärmeausdehnungskoeffizient der Matrix, M - "thermischer Speicherkoeffizient".

Der Faktor M gleicht etwa dem inversen Produkt von Porosität multipliziert mit der Kompressibilität des Fluids, und M ist das inverse Produkt von Porosität mal Wärmeausdehnungskoeffizient des Fluids.

Die Feldgleichungen, die Thermokonsolidation physikalisch korrekt beschreiben, sind äußerst kompliziert (Nowinski 1978, 676f), es treten mehr als 20 Materialkonstanten auf, für die Praxis können diese Gleichungen jedoch meist vereinfacht werden. Aus den Gleichungen (3) und (4) läßt sich folgende vereinfachte Abschätzung der Koppelung Temperatur-Porenwasserdruck ableiten, die nach Raleigh & Evernden (1981) wiedergegeben wird.

$$dV = V\alpha_w \, dT - V\beta_w dP \qquad (5)$$

$$dV = V\alpha_r dT + V\beta_r dP \qquad (6)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\alpha_w}{\beta_w} \qquad (7)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\alpha_w - \alpha_r}{\beta_w + \beta_r} \qquad (8)$$

dV ist in (5) - (7) die Volumenänderung einer mit Wasser gefüllten Pore mit Anfangsvolumen V. α_w und β_w sind Wärmeausdehnungskoeffizient des Wassers und dessen Kompressibilität, entsprechend α_r und β_r für das Gestein. Gleichsetzen von (5) und (6) ergibt (7), daraus folgt wegen $\alpha_w >> \alpha_r$ und $\beta_w >> \beta_r$ (8).

Die Autoren geben als typischen Wert von Krustengesteinen $dP/dT \approx 1,5 - 2,0$ MPa/°C an, ein Wert, der ausreichend ist, in einer Teufe von 10 km bei einer augenblicklich wirksamen Temperaturerhöhung von 100°C den Druck von hydrostatisch auf lithostatisch zu bringen. Dieser Wert ist für den Fall der Kühlung des Bohrlochs durch die Spülungszirkulation nicht ohne weiteres anzuwenden, da ja die Bohrlochwand Verschiebungen erlaubt, die bei der Betrachtung von Raleigh & Evernden nicht erlaubt sind. Ferner benötigt die Abkühlung des Gebirges Zeit, die einen Ausgleich des Porenwasserdruckgradienten erlaubt.

Rechnungen, die sich mit den temperaturbedingten Porendruckschwankungen unter Bedingungen, wie sie beim Bohren vorherrschen, beschäftigen, liegen m.W. nicht vor, sondern lediglich eine Vortragszusammenfassung von McTigue (1987), in der die Existenz einer exakten Lösung für den Fall einer Bohrung mit konstantem Wärmefluß an der Wandung angegeben wird, also ein typischer Fall der Lagerung radioaktiver Substanzen.

Interessant ist, daß sich bei bestimmten Kontrasten der hydraulischen und der thermischen Diffusivität ein Porendruckmaximum in einiger Entfernung vom Bohrloch einstellt, das das Fluid zu der Bohrung und in das Gebirge hinein treibt. Solche Effekte sind, wenn sie bei KTB auftreten sollten, für die Spülungsgeochemie wichtig. Für Festigkeitsbetrachtungen kann bedeutsam sein, daß eventuell als Folge des intermittierenden Spülungsumlaufes Porendruckerniedrigungen und -erhöhungen über den Ausgangszustand hinaus erfolgen können, wenn nämlich in der Zirkulation Fluid in die abgekühlten Gebirgspartien strömt und sich dann bei Stillstand durch Temperaturerhöhung durch Wärmeleitung wieder ausdehnt.

Die Bedeutung der technisch induzierten temperaturbedingten Druckschwankungen im Gebirge für die Bohrlochstabilität sollte eingehend untersucht werden, um dem Bohringenieur Mittel zur präventiven Stabilisierung in die Hand zu geben. Hierzu ist es auch unumgänglich, zu untersuchen, inwieweit tatsächlich eine Infiltration des Gebirges durch die Spülung stattfindet, wie dies bei der hydrogeologischen Überlegung, die oben geschildert wurde, die conditio sine qua non für die Druckerhöhung ist.

Eine Infiltration würde auch die Ergebnisse einer näheren Betrachtung von Druck und Temperatur beeinflussen, welche dann dem Bohringenieur bei der Optimierung der Bohrarbeiten als Grundlage dienen soll.

Zusätzlich wird dann von felsmechanischer Seite die Angabe benötigt, in welche Richtung der Zustand im Gebirge verändert werden soll, also etwa: Soll der Porendruck möglichst niedrig, hoch oder unverändert gehalten werden?

In der Literatur zu Bohrlochauskesselungen finden sich spärliche und einander widersprechende Angaben, Zoback et al. (1985) geben bei nicht infiltrierender Spülung Destabilisierung bei steigendem Porendruck an, Cook (1985) bei Infiltration das Gegenteil, während Kaiser & Malony (1987) keine Angaben machen.

Es sollte hier gezeigt werden, wie bei der einen Variablen Porendruck nichtlineare und gekoppelte Prozesse betrachtet werden müssen, um Aussagen über Stabilität zu erhalten. Man darf jedoch auch hierbei nie die Koppelung anderer Parameter miteinander vergessen,

wie etwa Spannungserniedrigung infolge von Auskühlung bei gleichzeitiger Druckreduzierung im Porenraum, um zu einer brauchbaren Aussage zu kommen.

Die physikalischen Zustandsvariablen Temperatur, Porendruck und elastische Spannungen sind nicht die einzigen Größen, die das Festigkeitsverhalten des Gebirges verändern und die von der Tätigkeit des Bohringenieurs beeinflußt werden. Bei Bohrungen im sedimentären Gebirge kann bei Mergeln, Tonsteinen und ähnlichen Gesteinen die Stabilität des Bohrlochs durch die chemische Zusammensetzung der Spülung positiv beeinflußt werden, indem Schwellen der Tonminerale verhindert wird, das dann zum Zerfall der Gesteine führt. Hierbei werden gezielt oberflächenaktive Stoffe eingesetzt.

Oberflächenchemische Prozesse, die die Stabilität beeinflussen, sind bei KTB nicht auszuschließen. Hier nimmt das Zeta-Potential eine hervorragende Stellung ein. Abb. 4 erläutert das Zeta-Potential.

An einer Grenzfläche feste Phase - flüssige Phase trägt die Feststoffoberfläche fast immer eine elektrische Ladung, sie ist bei Silikaten in Wasser negativ. Entgegengesetzt geladene Ionen werden adsorbiert, und es entsteht die Stern-Schicht aus hydratisierten Gegenionen. An die Stern-Schicht, die an ihrer Außenseite meist noch elektrische Ladung trägt, lagert sich die diffuse Schicht an, innerhalb derer sich die Gleitschicht befindet, entlang derer Flüssigkeitsbewegungen stattfinden. Das elektrische Potential an der Gleitschicht wird Zeta-Potential genannt. Es hängt sehr stark von der Temperatur, pH-Wert und chemischen Zusammensetzung der Flüssigkeit ab, in unserem Fall vor allem von Konzentration und Ladungszahl der Kationen.

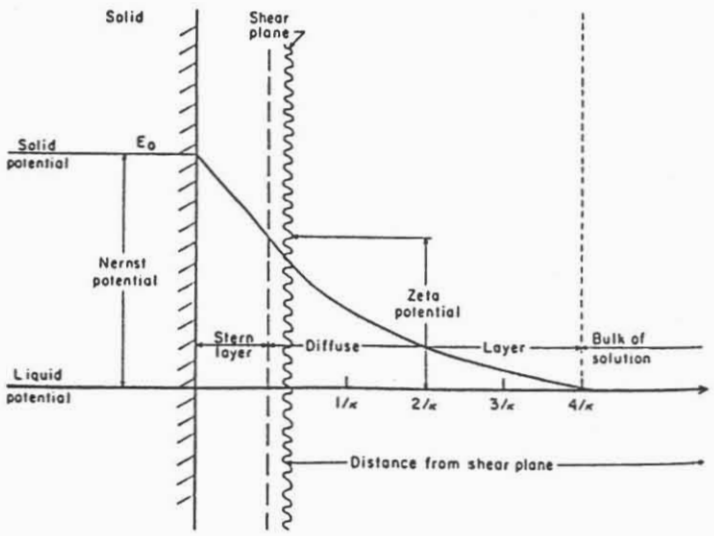

Abb. 4: Die elektrische Doppelschicht an der Grenze fest-flüssig und das Zeta-Potential. Nach Engelmann et al. (1987).

Vorzeichen und Betrag des Zeta-Potentials bestimmen Härte und Festigkeit von Nichtmetallen, z.B. ist Härte am größten, wenn das Zeta-Potential gleich null ist. Unglücklicherweise ist dann aber auch die einachsige Festigkeit der Granitgesteinsproben, die von Ishido & Nishizawa (1984), (Abb. 5), untersucht wurden, am kleinsten.

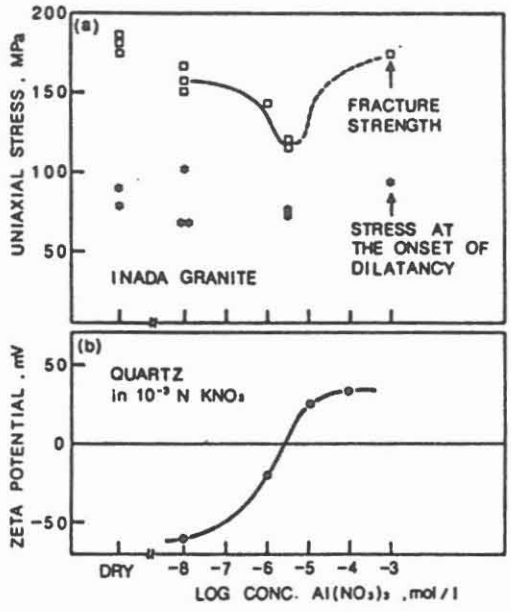

Abb. 5: Einachsige Festigkeit von Inada-Granit als Funktion des Zeta-Potentials von Quarz. Nach Ishido & Nishizawa (1984).

Bei einer 10^{-5} molaren Aluminiumnitratlösung nimmt die Festigkeit etwa um 50 MPa von 160 MPa auf 110 MPa ab. Das heißt, eine geringe Änderung in der Konzentration des Kations vermag die Festigkeit drastisch zu verändern. Die Experimente von Ishido & Nishizawa wurden an gesättigten Proben ausgeführt und lassen vielleicht Zweifel über die Korrelation Zeta-Potential - Festigkeit bestehen. Daß es sich aber um handfeste Prozesse handelt, ist durch Untersuchungen über die Zusammenhänge von Bohrfortschritt, Standzeit und Zeta-Potential des Gesteins in der Bohrspülung beim Bohren mit Diamantwerkzeugen sehr gut belegt. Solche Untersuchungen laufen seit den 70er Jahren.

Abb. 6. (Engelmann et al. 1987) zeigt Ergebnisse des US Bureau of Mines, hier werden Bohrfortschritt, Standzeit des Werkzeugs und Molarität der Bohrspülung dargestellt, in diesem Fall für Westerly-Granit. Die höchsten Spitzen der Kurven entsprechen einem Zeta-Potential von null der häufigsten Mineralien Quarz und Feldspat, manche Spitzen können von den Autoren nicht erklärt werden. Beachtlich ist die Größenordnung des Effektes, Bohrfortschritt und Standzeit werden mehr als verdoppelt.

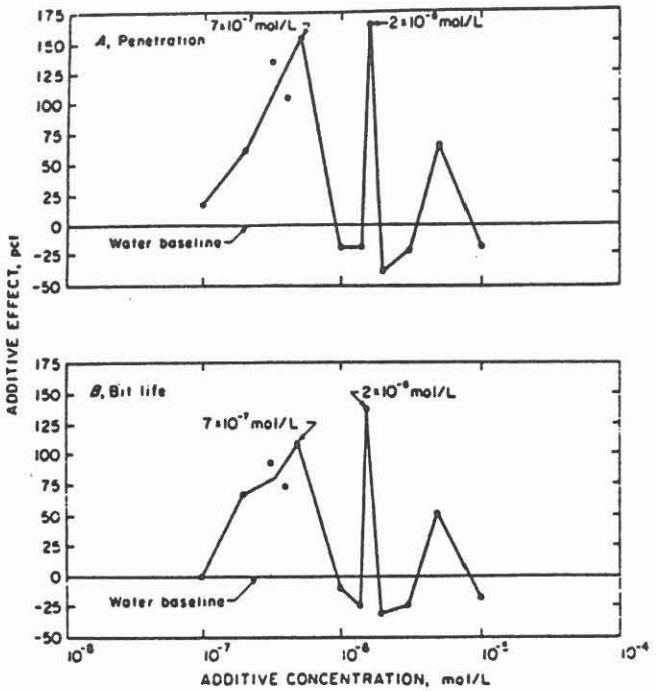

Abb. 6: Bohrfortschritt und Kronenstandzeit bei Bohrversuchen im Westerly-Granit in Abhängigkeit des Zeta-Potentials von den Einzelmineralien. Nach Engelmann et al. (1987).

Für KTB liegen die Folgen auf der Hand:

Es muß damit gerechnet werden, daß durch die Spülungszirkulation und dadurch hervorgerufene Konzentrationsänderungen im Porenfluid (Diffusion, Advektion, Adsorption, chemische Reaktionen) Gesteinspartien an der Bohrlochwand und im Gebirge in den Bereich des Zeta-Potentials um null kommen und an Festigkeit verlieren. Jedoch sollten hierzu noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

Für den Bohringenieur ergibt sich als Resümee: er hat es mit einem komplexen System zu tun, dessen Reaktion er voraussagen können muß, um Instabilitäten zu vermeiden. Prognosen aufgrund einer wissenschaftlichen quantifizierbaren Erfassung des Gesamtsystems sind nach dem gegenwärtigen Stand der Dinge nicht zu erwarten, da die Grundlagenforschung noch nicht weit genug entwickelt und fortgeschritten ist, Materialkonstanten sind nicht oder ungenügend bekannt, Rechenmodelle wurden noch nicht angewandt oder die Rechenverfahren müssen modifiziert oder noch entwickelt werden, oder die Wirkungsmechanismen sind nicht oder ungenau bekannt.

Um dem Bohringenieur für seine Entscheidungen Grundlagen zu geben, wäre vielleicht folgender Weg denkbar: man versucht, den Zustand im Bohrloch und im Nebengestein über die gesamte Bohrzeit so gut wie möglich aufzuzeichnen und Reaktionen des Gebirges auf technische Eingriffe hin so genau wie möglich zu erfassen und mit dem augenblicklichen Zustand des Gebirges und seiner Belastungsgeschichte, d.h. Zustandsänderungen in der Vergangenheit zu korrelieren. Auf diese Weise können kurzfristige Extrapolationen in die Zukunft mit einem gewissen Maß an Sicherheit gemacht werden können.

Literatur

Biot, M,A.: General theory of three-dimensional consolidation. - J. Appl. Phys. 12, 155-164, 1941

Brace, W.F. & Martin, R.J.: A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity. - Int. F. Rock Mech. Min. Sci. 5, 415-426, 1968.

Cheatham, F.B.: Wellbore stability. - J. Pet. Tech. 1984, 889-895, 1984.

Cook, N.G.WD.: Coupled processes in geomechanics.-Paper presented at International Symposium on Coupled Processes Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Lawrence Berkeley Laboratory, September 18-20, 1985.

Engelmann, W.H.; Watson, P.J.; Tuzinski, P.A. & Pahlman, J.E.: Zeta potential control for simultaneous enhancement of penetration rates and bit life in rock drilling. - 18 p., USBM Rep. of Invest. RI 9103, 1987

Frank, F.C.: On dilatancy in relation to seismic sources. - Rev. Geophys. 3, 485-503, 1965.

Ishido, T. & Nishizawa, O.: Effects of Zeta Potantial on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression. - J. Geophys. Res. 89, 4153-4159, 1984

Kaiser, P.K. & Malony, S.: factors influencing the stability of deep boreholes. - Proc. Int. Cong. Rock Mechanics Montréal, 675-680, 1987.

McTigue, D.F.: Flow to a heated borehole in fluid-saturated thermoelastic rock. - EOS 68, 1295, 1987

Noorishad, J.; Tsang, C.F. & Witherspoon, P.A.: Coupled thermal-hydraulical-mechanical phenomena in saturated fractured porous rock: numerical approach. - J. Geophys. Res. 89, 10365-10373,1984.

Nowinski, J.C.: Theory of thermoelasticity with applications. - XV, 835 p., Alphen a.d. Rijn 1978.

Raleigh, B. & Evernden, J.: Case for low deviatoric stress in the lithosphere. - in: Carter et al. (ed.), Mechanical behavior of crustal rocks (Geophys. Mon. 24), 173-186, Washington D.C. 1981.

Zoback, M.D.; Moos, D.; Mastin, L. & Anderson, R.N.: Well bore breakouts and in situ stress. - J. Geophys. Res. 90, 5523-5530, 1985.