

Gebirgsspannungs-Monitorstation
für die KTB

G. Borm
G. Reik

GEBIRGSSPANNUNGS-MONITORSTATION FÜR DIE KTB

G. BORM und G. REIK, Karlsruhe

ZUSAMMENFASSUNG

Für die KTB ist der Einbau einer Gebirgsspannungs-Monitorstation vorgesehen, die nach dem Verfahren des harten Einschlusses die zeitabhängigen Verformungen und Spannungsumlagerungen am Bohrlochrand, die thermomechanischen Spannungen und die bohrtechnisch bedingten Einflüsse auf das Spannungsfeld im Bohrlochnahbereich messen soll.

Die Spannungs-Monitorsonde besteht aus einem zylindrischen Körper von hoher Steifigkeit, der kraft- und formschlüssig an die Bohrlochwand angekoppelt wird. Gemessen wird die langzeitige Gebirgsdruckzunahme, die sich durch Kriech- und Relaxationsprozesse des Gebirges am Sondenkörper einstellt. Aus dieser chronischen Spannungsänderung kann man auf das rheologische Verhalten des Gebirges in situ und bei entsprechender Kriechfähigkeit und genügend langem Meßzeitraum auf den primären Spannungszustand im Gebirge schließen.

Da bereits aus Tiefen, wie sie für die Vorbohrung zur KTB vorgesehen sind, geowissenschaftliche Schlüsselergebnisse erwartet werden, erscheint es zweckmäßig, eine Dauermeßstation schon in der Vorbohrung zu installieren. Dadurch sollen technologische und wissenschaftliche Vorkenntnisse für ein mögliches Tiefenobservatorium in der KTB-Hauptbohrung gewonnen werden.

Zur theoretischen Erfassung der Spannungsumlagerungsvorgänge und zur Auswertung der Spannungsmeßdaten werden analytische Ansätze, die ursprünglich für die Wechselwirkung von Kriechen und Gebirgsdruckzunahme an Schachtausbauten im Steinsalzgebirge entwickelt worden sind, für die Anwendung auf einen harten Einschluß in großer Tiefe des kristallinen Gebirges erweitert. Damit wird ein Computerprogramm erstellt, um die in der Bohrung gewonnenen Meßdaten auswerten und interpretieren zu können.

G.BORM, Priv.Doiz.Dr.rer.nat, Lehrstuhl für Felsmechanik, Universität, D-7500 Karlsruhe 1
G. REIK, PhD Dipl.-Geol., Fa. gbm, Forlenweg 11, D-7512 Rheinstetten

1. EINFÜHRUNG

Für die Vorbohrung der KTB ist der Einbau einer Gebirgsspannungs- und Hydraulik-Monitorstation vorgesehen. Sie soll den festinstallierten Teil eines geplanten Tiefen-Observatoriums bilden und die folgenden Messungen ermöglichen:

- * Spannungsaufbau in einem harten Einschluss
- * Deformation der Bohrlochwandung,
- * Porenwasserdruck,
- * Temperatur,
- * Leitfähigkeit, Eigenpotential und
- * Elektrizitätsfeldbestimmung.

Außerdem gehören zu der Prototyp-Station ein rückholbarer Adapter zur Ankopplung, die Datenerfassung und Übertragung sowie ein Nachfallsammelbehälter. Im folgenden wird allein über die geplante Spannungs-Monitorstation berichtet, deren Entwicklung und Bau im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms eine technologische Innovation bedeuten.

Die Spannungs-Monitorsonde besteht aus einem zylindrischen Körper von hoher Steifigkeit, der kraft- und formschlüssig an die Bohrlochwand angekoppelt wird (Abb.1). Gemessen wird der durch Spannungsrelaxations- und Kriechprozesse des Gebirges an der Sonde auftretende langzeitige Spannungsaufbau (Abb.2).

Die Behinderung der Kriechverformung des Gebirges durch den harten Einschluß erzeugt darin einen chronisch zunehmenden Gebirgsdruck. Die Retardationsfunktion für die zeitabhängige Belastungszunahme am Sondenkörper und die Relaxationsfunktion der sekundären deviatorischen Gebirgsspannungen lassen sich bei kreiszylindrischen Bohrlochgeometrien in Form geschlossener analytischer Lösungen entwickeln. Als Stoffgesetze für das Kriechen und die Relaxation des Gebirges werden empirische Potenzgesetze angenommen.

Die Relaxations- und Retardationszeiten für die langfristigen Spannungsumlagerungen im Gebirge und im Sondenkörper wachsen proportional mit zunehmender Nachgiebigkeit des Einschlusses und fallen mit zunehmender Primärspannung des Gebirges in potenziertem Maße ab. Aus dem chronischen Spannungszuwachs an der Sonde kann umgekehrt auf das rheologische Verhalten des Gebirges unter in-situ Bedingungen und bei entsprechender Kriechfähigkeit und ausreichend langem Meßzeitraum auf den primären Spannungszustand des Gebirges geschlossen werden.

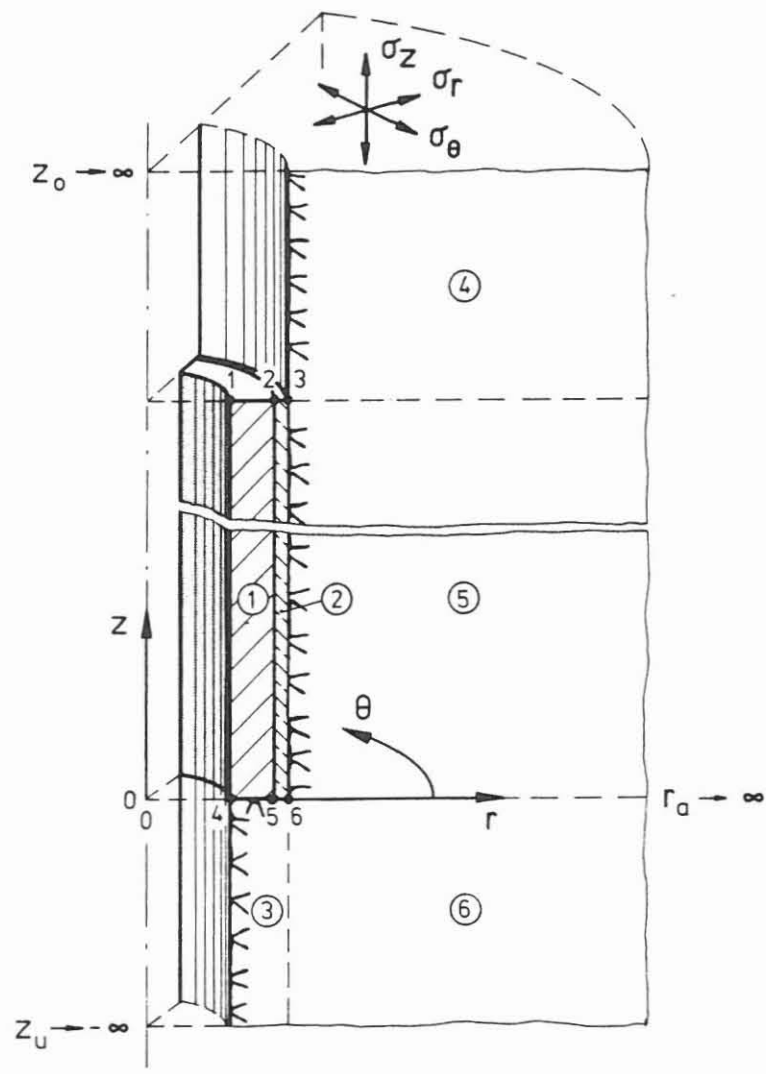


Abb.1: Modell der Spannungsmonitorsonde als harter Einschuß im Tiefbohrloch. Koordinaten, Spannungskomponenten und Elemente.
(1) Sonde, (2) Zementierung, (3)-(5) Gebirge

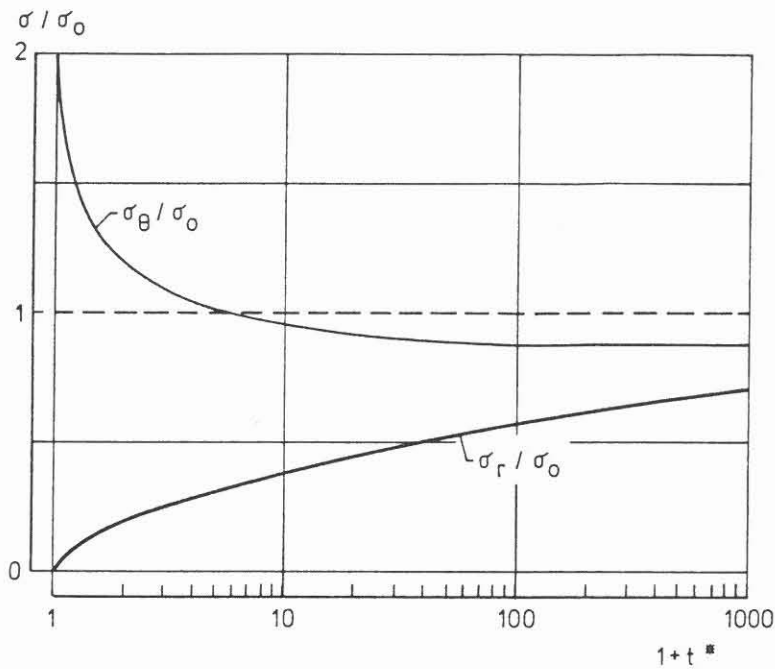


Abb.2: Relaxation der tangentialen Spannung am Bohrlochrand und chronische Zunahme der radialen Gebirgsspannung auf den harten Einschluß. Die Spannungen sind auf die primären Gebirgsspannungen bezogen, und die dimensionslose Zeitkoordinate ist eine Funktion der rheologischen Gesteinsparameter und der Steifigkeit des Sondenkörpers.

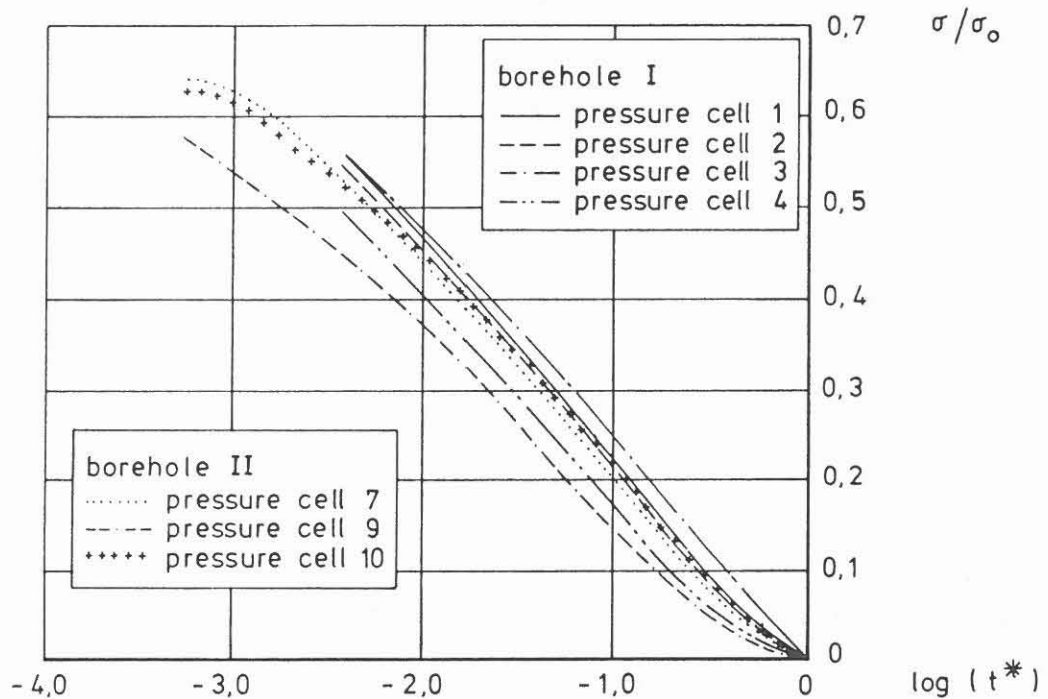


Abb.3: Normierte Relaxationskennlinien von Spannungsmonitormessungen im Steinsalzgebirge in verschiedenen Bohrlöchern und mit verschiedenen Druckzellen (aus Natau et al., 1986). Die dimensionsfreie Zeitkoordinate ist auf eine Einheit von 300 [d] bezogen.

Zur theoretischen Erfassung der Spannungsumlagerungsvorgänge und zur Auswertung der Spannungsmeßdaten werden Berechnungsansätze, die ursprünglich für die Wechselwirkung von Kriechen und Gebirgsdruckzunahme an Schachtausbauten im Steinsalzgebirge entwickelt worden sind, für die Anwendung auf einen harten Einschuß in großer Tiefe des kristallinen Gebirges erweitert, wobei die Kriechkonvergenzen als hochgradig nichtlineare Funktionen der deviatorischen Gebirgsspannungen erscheinen. Ein Inversionsprogramm zur Auswertung der mit der Spannungssonde gemessenen Daten soll die Extrapolation der Spannungen im Fernfeld aus den Meßdaten der Spannungsmonitorsonde ermöglichen.

2. TECHNOLOGIE DER SPANNUNGSMONITORSTATION

Kessels (1986) hat sich mit den Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Spannungsmeßverfahren auseinandergesetzt und gezeigt, daß zur Dauerregistrierung von Spannungen und zur Messung zeitlich veränderlicher Spannungsfelder nur Verfahren auf der Basis des harten Einschlusses Erfolg versprechen können; sie sind theoretisch begründet, praktisch erprobt und werden zur Ermittlung des primären Spannungszustandes und der Spannungsänderungen bisher überwiegend in Salzgesteinen eingesetzt, da hier die Ankopplung an das Gebirge durch dessen ausgeprägtes Kriechvermögen besonders rasch und vollständig erfolgt.

Eingehende in-situ-Spannungsmessungen sind von Natau et al.(1986) in einem norddeutschen Steinsalzbergwerk durchgeführt worden (Abb.3). Die Untersuchungen haben gezeigt, daß man die Druckmeßdosen am besten vorgespannt einbaut, um den stationären Gebirgsdruck aus der zeitlichen Abnahme (Relaxation) der Überspannungen herleiten zu können. Spannungsmonitorstationen dieser Art sind bereits in Bohrungen bis zu 650m Tiefe eingebaut worden (Glötzl et al., 1986). Die Aufnehmer zur Messung der Normalspannungen in unterschiedlichen Richtungen bestehen aus hydraulisch oder pneumatisch aktivierten Druckmeßkissen, die richtungsorientiert in die mit Injektionsgut verfüllten Bohrlöcher eingebaut werden.

Durch die Errichtung der Spannungsmonitorstation bereits in der Vorbohrung sollen Erfahrungen für Entwicklung, Bau und Betrieb der Spannungsmeßstation in der Hauptbohrung gesammelt werden. Dabei können aus den in der Vorbohrung gewonnenen Meßdaten jedoch wegen der relativ kurzen Beobachtungszeiträume, der technisch induzierten Spannungsumlagerungsvorgänge sowie der möglicherweise unzureichenden Relaxations- und Kriechraten in geringeren Teufen nur bedingt quantitative Ergebnisse erzielt werden.

Spannungsmessungen nach der Methode des harten Einschlusses sind bisher nur bis zu Gebirgsdrücken von 600 bar und Temperaturen bis ca. 150°C durchgeführt worden. Bei der für den Einsatz in der KTB-Vorbohrung vorgesehenen Ringsonde erfolgt die Messung der Radialspannungen auf die Außenfläche mittels Druckkissen, die entweder auf dem Glötzl-Ventilgebersystem (Glötzl et al., 1986) oder dem AWID-System (Kessels, 1986) basieren.

Für die Meßwertumformung und -übertragung kommen hydraulische, elektrische und mechanische Methoden in Betracht, deren Einzelheiten z.B. von Fecker & Reik (1987) spezifiziert worden sind. Die Energie- und Meßwertübertragung für die Spannungsmonitorstation können jedoch nicht über direkte Leitungen sondern nur über ein mobiles, am Vielfach-Bohrlochmeßkabel einfahrbares Datendock erfolgen.

Zur Messung der Normalspannungsänderungen in verschiedenen Raumrichtungen müssen die Sondenkörper Druckkissen von hoher Normalsteifigkeit enthalten. Die Sonde muß richtungsorientiert im Bohrloch eingebaut, verpreßt und vorgespannt werden. Sie soll möglichst wenig elektronische Bauteile enthalten, um die Störanfälligkeit zu begrenzen und ein längerfristiges Funktionieren der Meßstation sicherzustellen. Bei Verwendung ausgewählter handelsüblicher Bauteile erscheint es derzeit möglich, Gebirgsdrücke bis zu 1000 bar bei Temperaturen von 150°C zu messen.

Dagegen ist der Bau einer Spannungsmonitorstation im Bohrlochtiefsten der KTB, also in Teufen von über 10 000m, mit größeren Schwierigkeiten verbunden. Dort müssen Dauertemperaturen von 300°C für die Geräte verträglich sein. Während für die mechanischen Teile auch dann noch relativ gute Erfolgsaussichten bestehen, sind für die eigentliche Messung, die Datenerfassung und -übertragung erhebliche technische Schwierigkeiten und Kosten zu erwarten.

In einer ab Juli 1988 laufenden Durchführbarkeitsstudie soll darum u.a. untersucht werden, ob und wie sich die Meßgeräte und die Methodik des Einbaues, der Durchführung der Messungen sowie der Auswertung der Meßergebnisse so entwickeln lassen, daß zunächst Messungen bis in Tiefen von ca. 5000m möglich sind. Später soll auch für größere Teufen die Einrichtung von Spannungsmonitorstationen realisiert werden.

Zur Durchführung des Vorhabens sind die Geräte-Entwicklung für die Meßwertaufnehmer, die Verfahrenstechnik zur kontrollierten Vorspannung des harten Einschlusses sowie für die langzeitstabile Druckmessung unter den gegebenen Spannungs- und Temperaturbedingungen erforderlich. Darüberhinaus müssen Techniken zur Datenabfrage und -erfassung

entwickelt und die elastischen und viskoplastischen Verformungs- und Festigkeitseigenschaften der Gesteine am Einbauort ermittelt werden.

3. THEORETISCHE ANALYSEN FÜR DIE DATENAUSWERTUNG

Mit der fest eingebauten Spannungsmonitorstation soll die zeitabhängige Spannungszunahme in der Vorbohrung der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) gemessen werden, um damit sowohl die horizontalen Gebirgsspannungen als auch die rheologischen Stoffparameter des Gesteins in großer Tiefe in situ erfassen zu können (Borm, 1985a). Die Anwendung der Relaxationsmethode konnte bei der Auswertung von hard-inclusion Spannungsmessungen in einem norddeutschen Steinsalzbergwerk bereits erfolgreich nachgewiesen werden (Natau et al., 1986).

Die theoretischen Analysen für die Spannungs-Monitorstation dienen der Entwicklung einer Ähnlichkeitstheorie für den Einfluß der Geometrie und Steifigkeit der Sonde und der primären Gebirgsspannungen auf die chronische Druckzunahme am harten Einschluß. Die Behinderung der Kriechdehnungen hat eine mit der Zeit monotonzunehmende Belastung der Sonde durch horizontalen Gebirgsdruck zur Folge. Die Retardationsfunktionen für die zeitabhängige Belastungszunahme der Sonde, die synchron mit der Relaxation der deviatorischen Spannungen im Gebirge abläuft, sind von (Borm, 1985b) für den allgemeinen Fall eines Kriechgesetzes in Potenzform als geschlossene analytische Lösung angegeben.

Die Retardations- und Relaxationszeiten der Spannungsumlagerungen vom Gebirge auf die Sonde wachsen mit zunehmender Nachgiebigkeit des Einschlusses. Dabei wird die deviatorische Entspannung des Gebirges nicht durch das Kriechen des Gebirges sondern vielmehr durch dessen Behinderung gefördert. Die theoretischen Ansätze für die zeitabhängige Spannungszunahme an der Meßsonde müssen jedoch für die zu erwartenden mehrachsigen Spannungszustände im kristallinen Gebirge erweitert werden. Hierfür sind neben numerischen Methoden analytische Verfahren mit komplexen Spannungsfunktionen vorgesehen.

Für die Datenauswertung ist die Entwicklung eines Computerprogrammes erforderlich. Es beruht auf einer Matrizenmethode mit finiten und semi-infiniten Zylinderelementen mit analytisch exakten Verschiebungs- und Spannungsansätzen. Die Element-Steifigkeiten werden darin mithilfe polarer Verschiebungsansätze formal so gebildet wie bei den herkömmlichen isoparametrischen Vierecks-Elementen, jedoch erfolgt die Integration der Elementsteifigkeiten in radialer Richtung exakt.

Die Formfunktionen für die Verschiebungen am Einzelement sind polare Potenzfunktionen für die radialen, Fourier'sche Reihenentwicklungen für die tangentialen und Polynome für die axialen Verschiebungen. Für infinite oder semi-infinite Elemente werden die Formfunktionen entsprechend modifiziert. Die Elementsteifigkeitsmatrizen für die Spannungssonden-, die Zement- und die Gebirgs-Elemente werden aufgestellt und zur Struktur-Steifigkeitsmatrix für die Bohrloch-/Sonden-Konfiguration zusammengesetzt. Das System der Bewegungsgleichungen für die Bohrloch- und Sondenrandverschiebungen unter dem Einfluß einer willkürlichen äußeren Spannungsverteilung im Gebirge wird gelöst, wobei die Steifigkeit des Sondenkörpers als harter Einschuß berücksichtigt wird: Je steifer die Sonde ist, desto rascher erfolgt die Zunahme des Gebirgsdrucks am Sondenkörper und umgekehrt; je früher die Sonde in die Bohrung kommt, desto mehr Information kann über die elastischen und rheologischen Parameter des Gebirges gewonnen werden. Zum Schluß soll ein Inversionsprogramm zur Auswertung der mit der Spannungssonde gemessenen Daten entwickelt werden, das die Extrapolation der Spannungen im Fernfeld aus den Meßdaten der Spannungsmonitorsonde gestattet.

Bei linear viskosem Verhalten des Gebirges folgt die Lösungsmethode dem visko-elastischem Korrespondenzprinzip, während bei nichtlinear rheologischem Materialverhalten ein Anfangsdehnungs-Algorithmus mit Zeitintegration für die Erfassung der Kriech- und Relaxationseffekte zur Anwendung kommt (z.B. Borm, 1980). Die Relaxationsgeschwindigkeit des kristallinen Gesteins wird zunächst nach Materialdaten aus der Literatur abgeschätzt, damit die zeitliche Entwicklung des Druckaufbaus an der Spannungsmonitorstation vorhergesagt werden kann.

Untersuchungen für die Herleitung von rheologischen Gebirgsparametern unter in-situ-Bedingungen sind mit Ausnahme der Arbeiten von Natau et al.(1986) bisher noch nicht durchgeführt worden. Anhaltspunkte für die Kriech- und Relaxationsparameter kristalliner Gesteine ergeben sich jedoch aus Laborversuchen von Lempp & Natau (1986) an Granitproben unter hohen Drücken und Temperaturen (Abb.4).

Eine erste Extrapolation dieser Relaxationskennlinien auf längere Zeitintervalle wurde durch Integration der homogenen Bewegungsgleichung eines verallgemeinerten Maxwell-Körpers mit einer scheinbaren Viskosität entsprechend einem Kriechgesetzes vom Typ des hyperbolischen Sinus in Abb.5 vorgenommen. Danach wäre für eine Spannungserholung auf beispielsweise 20% der Anfangsspannung bei Raumtemperatur unter den angenommenen Materialparametern eine Zeitspanne von mehr als mehr als 3000 Jahren erforderlich. Temperaturänderungen beeinflussen die Form der Relaxationskennlinie nicht sondern verschieben bei Temperaturerhö-

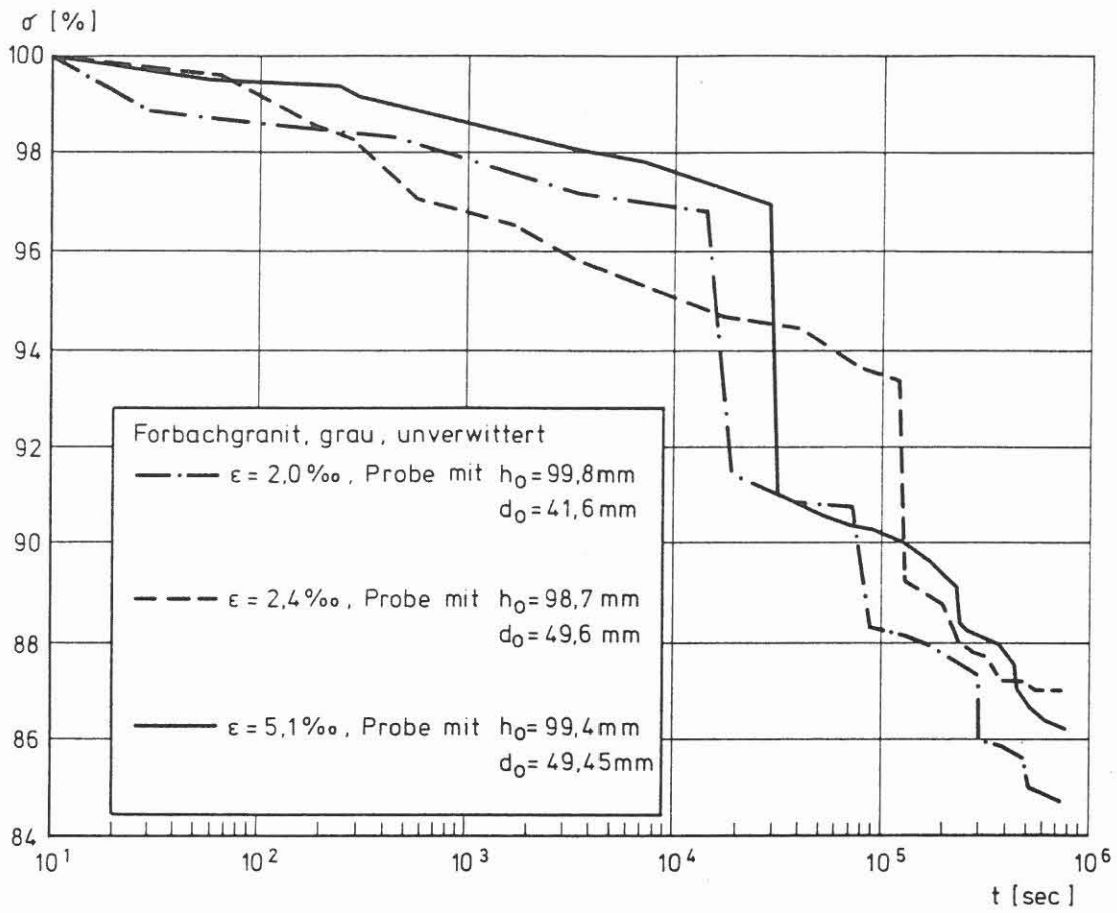


Abb.4: Experimentelle Ergebnisse von Spannungsrelaxationsmessungen an Granitproben im Labor (Lempp & Natau, 1986)

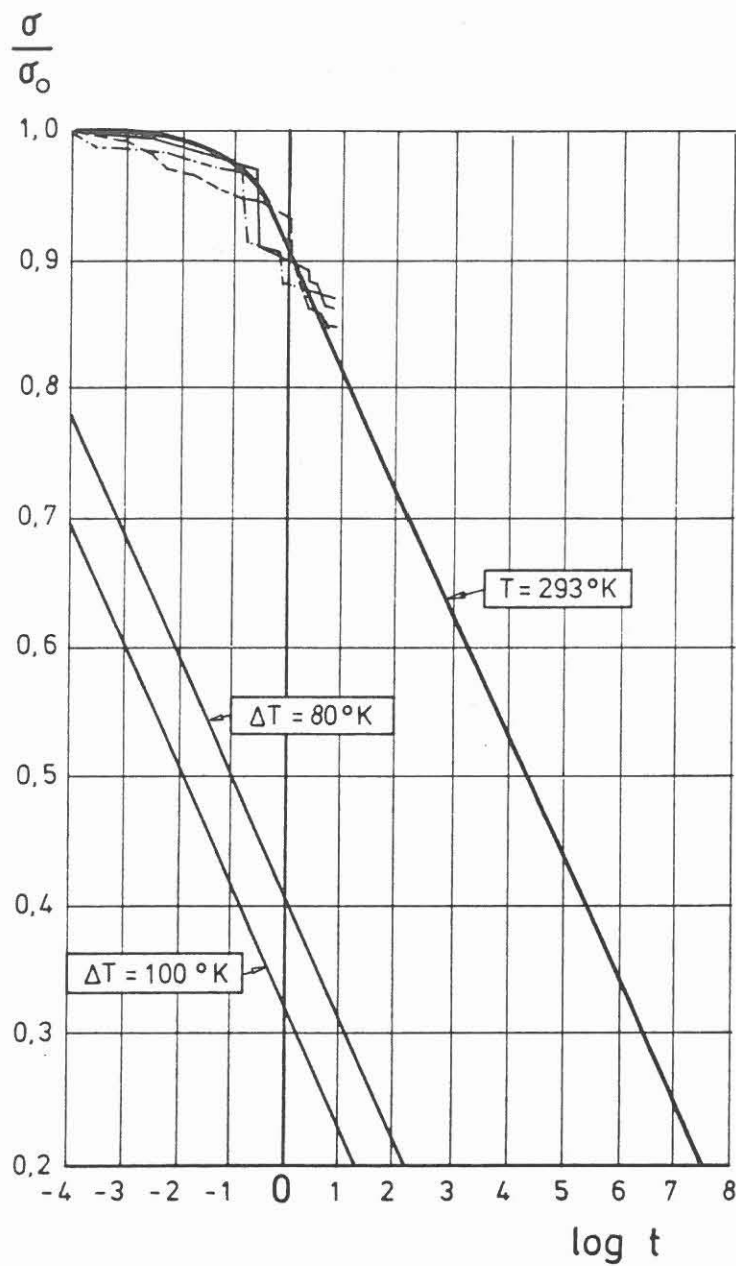


Abb.5: Einfluß von Temperaturänderungen auf die normierte Relaxationsgeschwindigkeit von Granitproben. Extrapolation der Kennlinien von Abb.4 unter Verwendung eines Kriechgesetzes vom sinh-Typ und einer Arrheniusfunktion für die Temperatur. Die dimensionsfreie Zeitkoordinate ist auf die Einheit 1 [d] bezogen.

hungen die Meßkurve zu kürzeren Zeitbereichen und umgekehrt (Abb.5). Bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur auf 80-100°C würde eine nahezu vollständige Spannungsrelaxation bereits innerhalb relativ kurzer Zeit nach form- und kraftschlüssigem Einbau der Sonde ablaufen, sodaß die Erfolgsaussichten für Spannungsmessungen mit der Hard-Inclusion-Sonde im Fuß der KTB-Vorbohrung von der Theorie her als sehr gut eingestuft werden können.

4. DISKUSSION UND AUSBLICK

Nach theoretischen Überlegungen laufen in den kristallinen Festgesteinen der oberen Erdkruste, wie sie mit der Kontinentalen Tiefbohrung durchteuft werden, die Spannungsrelaxationsvorgänge hinreichend rasch ab, sodaß in einem angemessenen Zeitraum Aussagen zum rheologischen Verhalten des Gebirges und zu den dort herrschenden statischen und transienten Spannungen getroffen werden können. Dieses gilt besonders für die größeren Teufen, in denen alle Spannungsmessungen auf der Basis von elastischen Stoffannahmen versagen müssen.

Meßergebnisse aus Teufen von über 5 km sind in mehrfacher Hinsicht für die Forschungsarbeiten im KTB-Programm bedeutsam, da (a) für diesen Bereich bisher weltweit noch keine Spannungsmeßdaten vorliegen, (b) in der Tiefe zwischen 5 km und 10 km die größten deviatorischen Krustenspannungen und der Übergang von sprödebruchhaftem zu viskosem Spannungsabbau (Rummel, 1986) erwartet werden, (c) die z.T. noch sehr widersprüchlichen Hypothesen zu den Deformationsprozessen im tieferen Bereich der Oberkruste einer Absicherung durch in-situ-Messungen bedürfen und schließlich (d) die Spannungsrelaxation des Gebirges für die Bohrlochstabilität in größeren Teufen ausschlaggebend ist.

Das Projekt der Spannungsmonitorstation in der Kontinentalen Tiefbohrung wurde wegen seines Pilotcharakters in der Arbeitsgruppe 3 "Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität" auf fast jeder der bisherigen Sitzungen sehr eingehend diskutiert. Man hatte dort erwartet, daß damit die primären Gebirgsspannungen, tektonischen Spannungsänderungen und die bohrtechnisch induzierten Spannungsänderungen erfaßt werden könnten. Die Schwierigkeiten, all diese Effekte mit nur einer einzigen Sonde und mit hinreichender Auflösung messen zu können, sind evident. Da jedoch aus geologischer Sicht für die Lokation Oberpfalz mit keinen nennenswerten Spannungsänderungen durch größere Erdbeben gerechnet werden muß, bietet diese Station andererseits die wohl einzigartige Möglichkeit, rheologische Spannungsänderungen in der Tiefbohrung quasi kontinuierlich zu beobachten und hinsichtlich ihrer Informationen zum

zeitabhängigen Materialverhalten und Spannungszustand der oberen Erdkruste auszuwerten. Darüberhinaus soll sie den im Fuß der KTB-Vorbohrung fest installierten Teil eines Tiefenobservatoriums bilden.

Als wesentliche technische Herausforderung werden die Ankopplung der Meßwertaufnehmer an das Gebirge, der kraftschlüssige Einbau und die Einzementierung der Sonde angesehen. Die größte Schwierigkeit besteht wohl in dem Abrufen der Daten, da durch Nachfall von Gestein die Sonde unzugänglich werden könnte. Es ist daher zu überlegen, ob die Datenabfrage nicht auch weiter oben in der Bohrung im Zusammenhang mit einer Sammeldatenabrufanlage erfolgen kann. Das Nachfallproblem läßt sich wahrscheinlich mit Fangbehältern lösen, deren Installation zum Zweck von Gesteinsuntersuchungen ohnehin vorgesehen ist. Das Problem der Energieversorgung der Meßsonde in 5000m Tiefe ist dagegen noch nicht endgültig gelöst; hierfür müssen im Rahmen der von der KTB-Projektleitung in Auftrag gegebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten spezielle Technologien untersucht werden.

Durch die notwendige Abstimmung des Vorhabens mit den bohrtechnischen Rahmen- und Zwangsbedingungen konnte mit der Arbeit an diesem Projekt erst später als ursprünglich geplant begonnen werden. Es bedarf nun sehr großer Anstrengungen, damit der vorgesehene Einbau einer Prototypstation in der KTB-Vorbohrung in der verbleibenden knappen Frist noch realisiert werden kann.

DANK

Wir danken den Mitgliedern der KTB-Arbeitsgruppe 3 "Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität" für viele umfangreiche, konstruktive Diskussionen um die Entwicklung der Spannungsmonitorstation in der KTB-Vorbohrung und -Hauptbohrung. Den Fachleuten der KTB-Projektleitung, namentlich den Herren Dr.P.KEHRER und Dr.W.KESSELS, danken wir für ihre Aufgeschlossenheit und die Unterstützung dieses wichtigen Vorhabens. Dem Bundesministerium für Forschung und Technologie danken wir für die jetzt erfolgte Bereitstellung von Förderungsmitteln für die Anfertigung einer Durchführbarkeitsstudie.

LITERATUR

BAUMANN, H. und BECKER, A. (1983): Einrichtung einer Dauermeßstelle Dauermeßstelle zur Registrierung von Spannungsänderungen im Hohenzollerngraben und Spannungsmessungen im südlichen Oberrheingraben; Berichtsband SFB 108, 1981-1983, Universität Karlsruhe

BORM, G. (1980): Zur Analyse chronischer Gebirgsverformungen beim Felshohlraumbau. Veröffentl. Inst. Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 88, Universität Karlsruhe

BORM, G. (1985a): Stress measurements by borehole hard inclusion soundings. Proc. 2nd Int. Symp. Observ. Cont. Crust through Drilling, p.76, Seeheim, AWS Bonn

BORM, G. (1985b): Wechselwirkung von Gebirgskriechen und Gebirgsdruckzunahme am Schachtausbau. Felsbau 3, Nr.3, 153-158

FECKER, E. und REIK, G. (1987): Baugeologie. Enke Verlag, Stuttgart

GLÖTZL, R., KAPPEI, G., KOLDITZ, H., MEYER, T. und SCHMIDT, M. W. (1986): New Approach to the Long-Term Determination of the Stress Fields to Reduce Risks of Large Underground Caverns. Proc. Int. Symp. on Large Rock Caverns, 661-672, ISRM, Helsinki

KESSELS, W. (1986): Operational Principle, Testing, And Applications of the AWID-Flat Jack for Absolute Stress Determinations Using Voltage Measurements. Rock Mechanics and Rock Engineering, 19/3, 165-184

LEMPP, Ch. und NATAU, O. (1986): Festigkeitsverhalten von kristallinen Gesteinen unter hohen Drücken und Temperaturen. Berichtsband SFB 108, 1984-1986, S. 233-278, Universität Karlsruhe

NATAU, O., Lempp, Ch., & BORM, G. (1986): Stress relaxation monitoring by prestressed hard inclusions. Proc. Int. Conf. Stockholm ISRM on Rock Stress and Stress Measurements, 509-514, Centek Publ. Lulea

REIK, G. und BORM, G. (1988): Gebirgsspannungs- und Hydraulik-Monitorstation. Prototypentwicklung für die KTB-Vorbohrung. 1. KTB-Schwerpunktkolloquium, Zusammenfassungen der Beiträge, S.34

RUMMEL, F. (1986): Stresses and Tectonics of the Upper Continental Crust - A Review. Proc. Int. Conf. Stockholm ISRM on Rock Stress and Stress Measurements, 177-183, Centek Publ. Lulea