

Die Spannungsmeßprojekte  
im KTB-Programm

G. Borm

# DIE SPANNUNGSMESSPROJEKTE IM KTB-PROGRAMM

G. BORM, Karlsruhe

## 1. WISSENSCHAFTLICHE ZIELE

Die Kontinentale Tiefbohrung (KTB), eines der größten deutschen geowissenschaftlichen Gemeinschaftsprojekte, dient der Grundlagenforschung über die physikalischen und chemischen Bedingungen und Prozesse in der tiefen kontinentalen Kruste mit dem Ziel, den strukturellen Aufbau, die Dynamik und die Evolution der intrakontinentalen Krustenbereiche näher verstehen zu helfen. Ein wichtiges wissenschaftliches Teilziel ist dabei die Erkundung der geomechanischen Eigenschaften der oberen Lithosphäre, die sich sowohl im konstitutiven Verhalten des Krustenmaterials als auch in der Orientierung und Intensität der statischen und dynamischen Spannungen im Untergrund widerspiegeln.

Die Messung und Interpretation des Spannungsfeldes im Bohrloch und seiner Veränderungen mit der Tiefe und mit der Zeit sind eine der Hauptaufgaben der KTB-Arbeitsgruppe 3 "Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität". Einen weiteren Schwerpunkt bilden Messung und Analyse der Bohrlochverformungen, -ablenkungen und -ausbrüche sowie der Spannungen am Bohrlochrand. Das Gebirge, das Verpreßmaterial und die Verrohrung sind dort erheblichen thermo- und hydromechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt. Mit der Erfassung der Verformungen und Spannungen und ihrer Umlagerungen während und nach den Bohrarbeiten werden darum auch wichtige Grundlagen für die Beurteilung der Bohrlochstabilität geschaffen.

Meßergebnisse aus Teufen von über 5 km sind in mehrfacher Hinsicht für die Forschungsarbeiten im KTB-Programm von Bedeutung, 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 sprödbbruchhaftem zu viskosem Spannungsabbau 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.

## **2. GEFÖRDERTE TEILPROJEKTE**

Gegenwärtig werden zum Themenbereich Spannungsmessungen ca. 10 Forschungs- und Entwicklungsprojekte im KTB-Schwerpunktprogramm oder über die KTB-Projektleitung gefördert oder sind beantragt, von denen mehrere gleichzeitig auch dem zentralen technischen Problemkreis der Bohrlochstabilität gewidmet sind. Es werden nur solche Spannungsmessmethoden in Betracht gezogen, die Aussagen über den Spannungszustand auch in größeren Tiefen liefern können.

### **2.1 Bohrkern-Eigenstressungen**

Es ist zu erwarten, daß die Kernproben aus der Tiefbohrung nach der Entnahme noch für eine gewisse Zeit unter Eigenstressung stehen. Messungen der retardierten Entspannungsdeformationen und der Reißschließungsdrücke von Bohrkernproben liefern Indizien für solche Eigenstressungen. Die drei folgenden Projekte beziehen sich auf die Untersuchung von Eigenstressungen in Kernproben.

#### **2.1.1 Theorie und Messung von Eigenstressungen in Bohrkernen**

Projektleiter: H.Berckhemer, Frankfurt

Die Entlastung beim Freischneiden von Gesteinen, die unter hohen Drücken und hohen Temperaturen gebildet worden sind, induziert Extensionsrisse in den Bohrkernen und am Bohrlochrand. In Laboruntersuchungen sollen daher die retardierten Entspannungsdeformationen, die rißbedingten Anisotropien von Ultraschallwellengeschwindigkeiten und ihre Aufhebung unter erhöhten Drücken sowie die akustischen Emissionen bei der Stimulation von Rissen gemessen werden. Ein wesentliches Ziel der Untersuchungen ist das Aufdecken der funktionalen Zusammenhänge zwischen den Variationen der physikalischen Gesteinsparameter wie elastische Wellengeschwindigkeit, Leitfähigkeit, Porosität, Permeabilität, Moduln, Festigkeit, Mikrorißdichte usw. und den äußeren und inneren thermomechanischen Spannungen.

#### **2.1.2 Differenz-Deformations-Analyse an Bohrkernen**

Projektleiter: J.F.W.Negendank und H.Baumann, Trier

Durch längerfristige Messungen von retardierten Verformungen an KTB-Kernproben sollen mithilfe von Dehnungsmeßstreifen die Spannungs-/Dehnungs-Kennlinien der relaxierenden Gesteine ermittelt werden. Das Verfahren ist theoretisch so lange einsetzbar, wie die zu untersuchenden Kernproben nicht scherbenförmig zerspringen und wie die für die Auswer-

tung benötigte Annahme linear elastischen Materialverhaltens auf das kristalline Gestein aus größeren Teufen noch zutrifft.

### **2.1.3 Spannungsmessung mit Texturgoniometer an Gesteinsbruchstücken**

Projektleiter: E.Hinze, Gießen

Bei diesem Projekt soll das Kristallgitter selbst als Spannungssensor dienen. Das Gitter läßt sich mit physikalischen Reflexions- und Beugungsmethoden vermessen, aus denen die Abhängigkeit der Netzebenen-Entfernungen bei verschiedenen Drücken ermittelt werden kann. Im Gegensatz zur standardmäßigen Anwendung in der keramischen oder metallurgischen Materialkunde werden die Untersuchungen hier an polykristallinen und mehrphasigen Gesteinsbruchstücken vorgenommen. Problematisch sind die geringe Eindringtiefe des Röntgenstrahls und das für die Einzelkorn-erfassung nicht ganz ausreichende Auflösungsvermögen der Methode. Jedoch können Aussagen darüber gemacht werden, ob die einzelnen Körner bereichsweise unter Druck stehen oder unter Zug.

## **2.2 Überbohrverfahren an Seitenkernen**

Projektleiter: R.Azzam und K.H.Heitfeld, Aachen

Das Vorhaben betrifft Dehnungsmessungen nach der Entspannungsmethode durch Überbohren von Bohrlochseitenkernen. Der 3-dimensionale Spannungszustand an der Bohrlochwand soll bis zu einer Teufe von 5000m registriert werden. Der mechanische Teil der für die Dehnungsmessungen vorgesehenen planaren Sensoren kann theoretisch bis zu 250°C, der elektronische Teil bis zu 150°C eingesetzt werden. Die Theorie der Auswertung beruht auf der Annahme linear elastischen Materialverhalten des Gebirges bei kreisrunder Querschnittsform des Bohrloches.

## **2.3 Bohrlochrandausbrüche**

### **2.3.1 Beurteilung der Bohrloch-Geometrie-Logs im Kristallin**

Projektleiter: K.Fuchs, Karlsruhe

Aus der Analyse der Bohrlochrandausbrüche werden die Richtungen der maximalen horizontalen Kompressionsspannungen im Gebirge ermittelt. Die Kartierung der Bohrlochrandausbrüche mit Vierarm-Kaliber-Log oder Televiererscheint auch in Teufen von über 5000m möglich. Die Bestimmung der Intensitäten der horizontalen Hauptspannungen aus den Ausbruchsdaten sowie der effektiven Differenzspannungen und ihrer zeitlichen Änderungen ist jedoch ein noch zu lösendes Problem.

### 2.3.2 Untersuchung des Spannungsfeldes mit kombinierten Methoden

Projektleiter: K.Fuchs, Karlsruhe

Die Ermittlung von horizontalen Hauptspannungsrichtungen aus der räumlichen und zeitlichen Kartierung von Bohrlochrandausbrüchen mit Kaliber-Logs oder mit Televier ist ein bewährtes und auch für den Einsatz in der KTB erfolgversprechendes Verfahren unter der Voraussetzung, daß die bruchmechanischen Vorgänge am Bohrlochrandrand hinreichend gut bekannt sind. Wo keine oder nur sehr geringe Randausbrüche bestehen, sollen mithilfe der vorhandenen VSP-Registrierungen zusätzlich die Bohrloch-Biegeschwingungen analysiert werden, aus deren Polarisierung man Hinweise auf die Hauptrichtungen des Spannungsfeldes in situ erwartet.

## 2.4 Hydro-Frac Spannungsmessungen

### 2.4.1 Hydro-Frac Spannungsmessungen in der KTB-Vorbohrung

Projektleiter: F.Rummel, Bochum

Mit Methoden des Hydraulic Fracturing (Hydro-Frac) sollen nach einer konventionellen und einer Wireline Packer Technologie die Intensitäten und Richtungen der horizontalen Spannungen in der KTB-Vorbohrung bestimmt werden. Die Verfahren sind erprobt, bewährt und sehr robust. Schwierigkeiten bestehen jedoch bei der Interpretation der Messungen im Falle von klüftigem Fels, bei Bohrlochrandausbrüchen und bei geneigten Hauptachsen des Gebirgsspannungssensors.

### 2.4.2 Untersuchungen für Hydro-Frac-Messungen in Teufen bis 5000 m

Projektleiter: F.Rummel, Bochum

Die Grenzen der eingeführten Hydro-Frac Meßverfahren liegen heute praktisch noch bei ca. 1500m. In einer Durchführbarkeitsstudie soll geprüft werden, ob und wie der Einsatz von Hydro-Frac Sonden auch in Teufen bis zu 5000m, der geplanten Endteufe der Vorbohrung, möglich ist. Dabei läßt sich auch der Einbau eines Televier in die Apparatur erwägen, der zusätzlich mit einem akustischen Aufnehmer ausgerüstet ist und es gestatten soll, den für die Interpretation von primären Gebirgsspannungen nützlichen Kaiser-Effekt bereits in situ zu erfassen.

### 2.4.3 Theoretische Modelle der Rißwechselwirkung

Projektleiter: F.Rummel, Bochum

Die herkömmliche Theorie der Spannungsmessungen nach der Hydro-Frac Methode beruht auf der Annahme, daß sich das Gebirge linear elastisch verhält und daß nach dem Aufbringen eines entsprechend hohen hydraulischen Innendrucks im Bohrloch sich in Achsrichtung ein vertikal stehender, bilateraler Einzelriß durch induzierte tangentielle Zugspannungen ausbildet. Rißentstehung und -ausbreitung werden nach Kriterien der linearen Bruchmechanik bestimmt. Um den Einfluß der Wechselwirkung von mehreren Rissen und deren Wachstum theoretisch analysieren zu können, wird für weiterführende Auswertungen ein numerisches Modellverfahren nach der Randelementmethode für systematische Parameterstudien herangezogen.

### 2.4.4 Interpretation von Spannungsmessungen im anelastischen Gebirge

Projektleiter: K.-H.Lux, Clausthal, und R.Rohkahr, Hannover

Das Projekt zielt darauf hin, geomechanische Grundlagen zur Auswertung und Interpretation von Hydro-Frac Spannungsmessungen in einem anelastischen Gebirge bereitzustellen. Schwerpunkte der Untersuchungen sind die Entwicklung eines Stoffgesetzes zur phänomenologischen Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens der Gesteine in der Tiefbohrung einschließlich der Effekte durch die Druckentlastung nach dem Bohren und die spülungsbedingte Abkühlung. Das Projekt ruht gegenwärtig wegen fehlender Mittel für die Durchführung der experimentellen Labo-untersuchungen.

## 2.5 Gebirgsspannungs- und Hydraulik-Monitorstation

Projektleiter: G.Reik, Rheinstetten

Mit der fest eingebauten Spannungsmonitorstation soll durch Dauerregistrierung die zeitabhängige Spannungszunahme in der Vorbohrung gemessen werden, um damit sowohl die horizontalen Gebirgsspannungen als auch die rheologischen Stoffparameter des Gesteins in großer Teufe in situ erfassen zu können. Darüberhinaus soll sie den im Fuß der KTB-Vorbohrung fest installierten Teil eines Tiefenobservatoriums bilden.

Die technische Realisierung des Einsatzes erscheint bis zu Tiefen von 5000 m, Drücken von 1 Kbar und Temperaturen von 150°C möglich. Erste Anhaltspunkte für die rheologischen Materialparameter ergeben sich aus den bereits vorhandenen Kriech- und Relaxationsuntersuchungen im Labor an kristallinen Gesteinen unter hohen Drücken und Temperaturen.

### 3. ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION UND AUSBLICK

#### 3.1 Zusammenfassung der Methoden

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe 3 "Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität" haben sich darum bemüht, das möglichst vollständige Spektrum der geophysikalischen und geotechnischen Methoden zur Spannungsmessung an Gesteinen aus tiefen Bohrungen in das KTB-Programm einzubringen, nämlich

- (a) die Messung der retardierten Entspannungsdeformationen und akustischen Emissionen an Kernprobenmaterial zum Nachweis von Eigenspannungen,
- (b) die Messung der spontanen Entspannungsdeformationen beim seitlichen Überkernen zur Bestimmung des vollständigen elastischen Spannungstensor an der Bohrlochwand,
- (c) die Auswertung der geometrischen Daten von Bohrlochrandausbrüchen als Indikatoren für die Hauptrichtungen der Horizontalspannungen im umgebenden Gebirge,
- (d) die aktive hydraulische Rißerzeugung im Bohrloch zur Feststellung der Hauptrichtungen und Intensitäten der horizontalen Gebirgsspannungen,
- (e) die passive Dauerregistrierung des Druckaufbaus an einem harten Einschuß zur Ermittlung der transienten bis stationären Gebirgsspannungen sowie der rheologischen Materialparameter in situ und
- (f) die Analyse der Polarisation der seismischen Biege wellenschwingung im Bohrloch als Indiz für die Richtung der größten Kompressionsspannung im Gebirge.

Die in der Geophysik übliche Auswertung von Magnituden und Herdflächenlösungen zur Feststellung der freigesetzten elastischen Energien sowie der Größe und Orientierung der Bruchflächen und damit der Richtungen und Intensitäten der aktiven Spannungen werden dagegen ausgenommen, weil entsprechend verwertbare Seismogramme für den Standort Oberpfalz nicht vorhanden und in absehbarer Zukunft auch kaum zu erwarten sind.

#### 3.2 Offene Probleme

Die überwiegende Zahl der o.a. Spannungsmeßverfahren basiert auf linearen Theorien der Kontinuums- oder Bruchmechanik. Klüfte, Foliation, Wechsellagerungen und Verformungs- und Festigkeitsanisotropien beeinflussen jedoch in hohem Grade die Orientierung und Intensität des loka-

len Spannungsfeldes im Bereich der Tiefbohrung. Progressive Dehnungsentfestigung am Bohrlochrand bei Überlastung des Gesteins durch unverträgliche Spannungskonzentrationen oder durch Materialermüdung infolge bohrtechnisch bedingter thermomechanischer Wechsellasten führt zu Konvergenz oder zu Brucherscheinungen im überbeanspruchten Bereich.

Bei hinreichend hohen Temperaturen relaxieren die deviatorischen Gebirgsspannungen soweit, daß das Bohrloch entgegen den herkömmlichen elastoplastischen Festigkeitsansätzen auch in größeren Teufen noch relativ standfest ist. Die Ursachen hierfür scheinen weniger in den Kriechdeformationen des in der Tiefe aufgeheizten Gesteins zu liegen als in einer Spannungserholung durch Umwandlung der elastischen Verformungen in irreversible. Diese Hypothese muß jedoch experimentell abgesichert werden, und für ihre theoretische Beschreibung müssen nichtlineare Ansätze der Rheologie und der Bruchmechanik z.T. neu entwickelt werden.

Neben Temperatur und Spannung wirkt sich besonders auch der Fluidgehalt des Gesteins sowie die Temperatur, Dichte und Zähigkeit der Bohrspülung auf die Deformationsgeschwindigkeiten und Relaxationsraten aus. Hierzu sind bisher fast keine quantitativen Untersuchungsergebnisse veröffentlicht. Ebenso wenig sind die Erscheinungen der hydraulischen Explosion bei rapider Entlastung von hochgespannten, fluidgesättigten Gesteinen mit allen Konsequenzen für Spannungsmessungen und Bohrlochstabilität erforscht.

### **3.3 Nutzen für KTB und andere geowissenschaftliche Projekte**

Die Spannungsmessungen stellten bereits im ehemaligen SFB 77 "Felsmechanik" ebenso wie gegenwärtig im SFB 108 "Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre" Schlüsselprojekte für die Bildung geomechanischer Modellvorstellungen und zur Lösung von felsmechanischen Stabilitätsproblemen dar. Sie haben sich international etabliert und erleben im Rahmen der aktuellen Tiefbohrprojekte einen neuen Aufschwung.

Die Richtungen der maximalen horizontalen Kompressionsspannungen in der Lithosphäre sind in Europa, Nord- und Südamerika, Australien, Japan, Indien und der Sowjetunion relativ gut bekannt. Sie entsprechen in ihrem globalen Erscheinungsbild den plattentektonischen Vorstellungen. Eine Weltspannungskarte wird von einer Arbeitsgruppe des Internationalen Lithosphären Programms (ILP) gegenwärtig erarbeitet, an der Mitglieder der Arbeitsgruppe 3 aktiv beteiligt sind.

Die bisher veröffentlichten Spannungs-/Tiefen-Profile für die kontinenta-



len Lithosphäre basieren weniger auf Messungen als auf empirischen thermodynamischen Stoffgesetzen und größtenteils ungeprüften Festigkeitshypothesen für das Gestein unter hohen Drücken und Temperaturen. Qualitativ unbestritten erscheint jedoch die aus der Analyse seismischer Wellen abgeleitete Annahme, daß in dem Tiefenbereich zwischen 5000m und 10000m der spröde Spannungabbau zunehmend in einen fließenden übergeht. Die Spannungsmessungen in der KTB und die Observation der Brucherscheinungen am Bohrloch bilden somit fundamentale Experimente zur Überprüfung und gegebenenfalls Korrektur der empirischen Vorstellungen.

Haben sich die verschiedenen Spannungsmeßverfahren in der KTB bewährt, wird ihr endgültiger Durchbruch auch für den Einsatz in anderen geowissenschaftlichen Pilotprojekten gelingen, die unter vergleichbar weniger extremen Rahmenbedingungen stehen, wie z.B. in der Geothermik, bei der Exploitation von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten, bei der Instrumentierung von geologischen Endlagerbergwerken oder als Sensoren für den Spannungsauf- und -abbau in seismisch aktiven Gebieten.

Die Erfassung der Spannungen und ihrer zeitlichen Änderungen ist von großer Aktualität für die tektonischen Fragestellungen der KTB, für die Abschätzung des rheologischen Gebirgsverhaltens und für längerfristige Prognosen zur Stabilität der Tiefbohrung. Die Themen der Arbeitsgruppe 3 erscheinen daher sowohl in geowissenschaftlicher als auch in technischer Hinsicht von zentraler Bedeutung für das gesamte KTB-Programm.