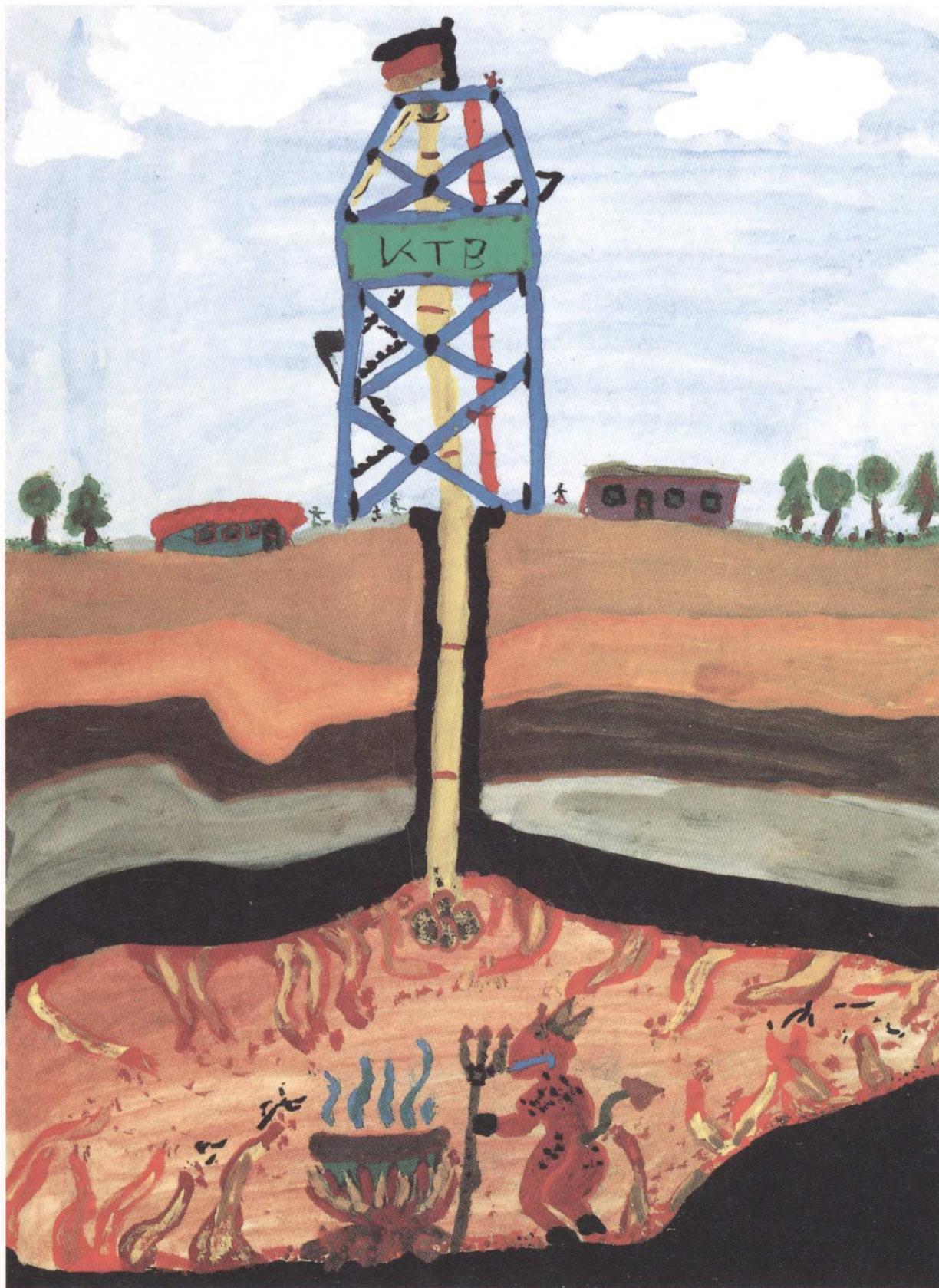


KTB

Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland



bmb+f Bundesministerium für
Bildung, Wissenschaft,
Forschung und Technologie

IMPRESSUM

Januar 1996

Herausgeber:
Bundesministerium für
Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn

Wissenschaftlich-technische Beratung:
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung,
Hannover;
Deutsche Forschungsgemeinschaft
Koordinationsbüro des Schwerpunktprogramms KTB
an der Justus-Liebig-Universität Gießen

Text und Koordination:
Dr. Erwin Lausch, Ahrensburg

Gestaltung und Layout:
Franz Braun, Hamburg

Bildredaktion:
Laura Cristoforetti, Hamburg

Reproduktion: MWW Repro, Hamburg

Druck: Neef, Wittingen

Bildnachweis:
KTB: Seite 1, 3 links, 10 unten links, 13, 14, 15, 18, 20 links und
rechts oben, 21, 22, 23, 27 links oben und links unten, 28;
BMBF: Seite 2; Hannemann/GFZ: Seite 3 rechts; Michael
Wolf/Visum: Seite 4/5, 6/7, 8/9, 10/11 oben, unten Mitte und
unten rechts, 16, 17, 19, 20 rechts unten, 26, 27 rechts;
Chuck Nacke/Picture Group/Focus: Seite 31; World Photo
Service: Seite 30/31

Zeichnungen:
KTB: Titel, Seite 22 rechts, 24, Rücktitel; Harald Blanck: Seite
12 unten, 13, 22 links, 29, 31; Holger Everling: Seite 12
oben; GEO Nr. 11/92: Seite 25

Die Broschüre wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie erstellt.
Die wissenschaftlichen Einrichtungen tragen die Verantwor-
tung für den Inhalt.

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland

Ergebnisse eines Projekts zur Erforschung der Erdkruste



Die Geheimnisse des Planeten Erde und seine Geschichte zu entschlüsseln fasziniert uns Menschen heute noch genauso wie unsere Vorfahren. Neue und unerwartete Ergebnisse geowissenschaftlicher Forschungsarbeiten zeigen, wie wenig wir noch immer über den Aufbau unserer Erde wissen. Der Mensch greift heute nach den Sternen, er begreift aber nur begrenzt den Planeten, auf dem wir leben.

Die Erde ist nicht nur ein sicherer, sondern auch ein verletzlicher Lebensraum. Sie ist ein dynamisches System, das uns erhält und zugleich bedroht. Nach Erkenntnissen der Vereinten Nationen haben allein in den letzten zwei Jahrzehnten Erdbeben, Vulkanausbrüche und Überschwemmungen weltweit über 3 Millionen Menschenleben gefordert und 800 Millionen Menschen Schaden zugefügt. Fast die Hälfte der am schnellsten wachsenden Großstädte liegen in Erdbebenzonen. Diese Zahlen unterstreichen die Notwendigkeit gezielter Forschungsarbeiten, denn jeder Fortschritt auf diesem Gebiet ist für uns Menschen ein Gewinn.

Mit der Zielsetzung, grundlegende Fragen über Lagerstätten, Erdbeben, geothermische Energie und geochemische Prozesse sowie die Entstehung der kontinentalen Erdkruste zu klären, hat der Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) seit 1982 das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB) gefördert. Die neuen, teilweise spektakulären Erkenntnisse über den Aufbau der kontinentalen Lithosphäre bestätigen das forschungspolitische Konzept. Die wissenschaftlichen Leistungen im KTB fanden weltweite Anerkennung. Die Entwicklung einer innovativen Bohr- und Meßtechnik hatte „spin-offs“ in viele Bereiche der Rohstoffexploration und -förderung zur Folge. Und nicht zuletzt zeigte sich, daß die Öffentlichkeit, Medien und Politik mit großem Interesse an geowissenschaftlichen Fragen das KTB während seiner gesamten Dauer aufgeschlossen und zustimmend begleitete.

Das KTB hat viele Fragen der Wissenschaft beantwortet. Neue Fragen wurden aufgeworfen. Geowissenschaftliche Forschung wird deshalb auch in Zukunft notwendig sein. Eine umweltschonende Ressourcensicherung von Energiereserven, mineralischen Rohstoffen und Grundwasserreservoirs wird für unsere Gesellschaft ebenso wichtig sein wie die Forschung zur Reduzierung der Auswirkungen von Erdbeben und Vulkanausbrüchen. Die vielversprechenden Ansätze in der Erdbebenprognose, die auf Vermeidung von Schäden abzielen und die Ereignisse in Grenzen vorhersagbar machen, sollten deshalb in internationaler Arbeitsteilung konsequent weiterverfolgt werden. Das Studium der Klimaveränderungen in der geologischen Geschichte wird helfen, das aktuelle Klimageschehen und seine Entwicklung auf der Grundlage objektiver wissenschaftlicher Daten noch besser zu verstehen.

Die weltweit interessierenden Fragen, die sich aus den komplexen Wechselwirkungen zwischen Geosphäre, Biosphäre und Atmosphäre ergeben, können nur durch wissenschaftlichen Fortschritt beantwortet werden. Die Bundesrepublik Deutschland will mit ihrem Forschungsprogramm Beiträge zur Lösung globaler Probleme leisten.



J. R.

Dr. Jürgen Rüttgers

Bundesminister
für Bildung, Wissenschaft,
Forschung und Technologie

Mit dieser Broschüre sollen der Öffentlichkeit Konzept, Ablauf und Ergebnisse des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) vorgestellt werden, nachdem die Hauptphase dieses Großforschungsprojekts 1994 mit Abschluß der Bohrarbeiten in der über tiefen Bohrung „KTB – Oberpfalz HB“ bei 9101 Metern erfolgreich beendet wurde.

Der Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie hat für dieses bisher größte Projekt der Geowissenschaften in Deutschland seit 1983 Mittel in Höhe von 583 Millionen DM zur Verfügung gestellt. Der Freistaat Bayern unterstützte das Vorhaben mit umfangreichen Infrastrukturmaßnahmen in der Oberpfalz und zusätzlichen Forschungsmitteln. Das Land Niedersachsen übernahm durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) die Leitung und operative Durchführung des Objekts. Das KTB ist der Beitrag der Bundesrepublik Deutschland zu einem weltumspannenden Programm zur Erforschung der Erdkruste, dem „Internationalen Lithosphären-Programm“ (ILP).

Hauptziel des KTB ist die Erforschung der Zustandsbedingungen und Prozesse in der tieferen Erdkruste. Hierzu wurde eine Reihe von wissenschaftlichen Fragestellungen definiert, die weder an der Erdoberfläche noch mit den indirekten Methoden der geophysikalischen Tiefenerkundung gelöst werden können und deren Beantwortung eine sehr tiefe Bohrung erforderte. Dieser Vorstoß in wissenschaftliches Neuland war nur mit einer projektbegleitenden Technologieentwicklung (wie etwa Bohr-, Spülungs- und Meßtechnologie) möglich.

Neue Erkenntnisse ergeben sich zu allen wissenschaftlichen Forschungszielen des Vorhabens. Neben den erhofften grundlegenden Erkenntnissen sind auch Beiträge zu gesellschaftsrelevanten, anwendungsbezogenen Fragestellungen wie Entstehung und Auslösung von Erdbeben, Vorkommen und Migration von Flüssigkeiten und Gasen, Entstehung von Lagerstätten und Nutzbarmachung geothermischer Energie zu nennen.

Zur Koordinierung der wissenschaftlichen Arbeiten richtete die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Schwerpunktprogramm „KTB“

ein. Partner in diesem Vorhaben waren eine Vielzahl von Hochschulen, außer-universitären Forschungseinrichtungen und Industriefirmen der verschiedensten Disziplinen. Insgesamt haben sich am KTB über 400 Wissenschaftler aus zwölf Ländern mit etwa 200 Forschungsprojekten beteiligt.

Das KTB zeichnete sich seit Anbeginn durch eine breite öffentliche Akzeptanz und großes Interesse der Wissenschaftler national und international aus. Über 700 000 Besucher verzeichnete die Bohrlokation Windischeschenbach, und in den Medien wurde häufig und überwiegend positiv über KTB berichtet. Bisher wurden über 2000 Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht.

Mit dem erfolgreichen KTB hat Deutschland eine führende Rolle in der kontinentalen Lithosphärenforschung übernommen. Herausragende technologische Entwicklungen mit erheblicher Wirtschaftsrelevanz haben weltweit Aufmerksamkeit erregt. Die wissenschaftlichen Ziele sind dank eines straffen Projektmanagements und einer effizienten Koordination im KTB-Schwerpunktprogramm im Zeit- und Kostenrahmen erreicht worden.

Diese Broschüre möge auch als Dank verstanden werden an die breite Öffentlichkeit für das große Interesse am KTB, an die politischen Entscheidungsträger für die stete Unterstützung des Projekts auch in Zeiten schwieriger öffentlicher Haushalte und an alle unsere Partner in Forschung und Industrie, die wesentlich zum Erfolg beigetragen haben.



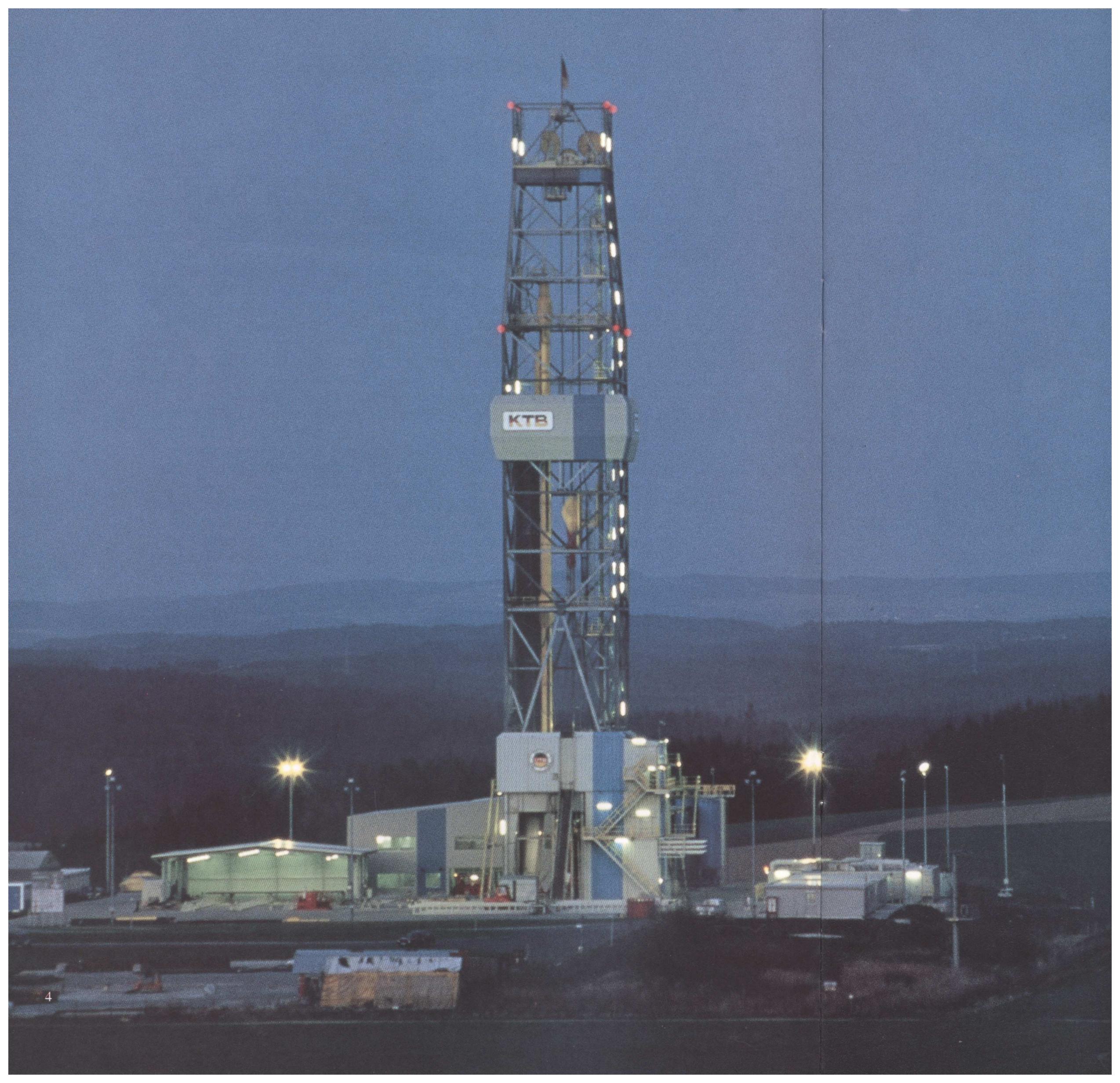
M. Kürsten
Prof. Dr. Martin Kürsten

Präsident des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

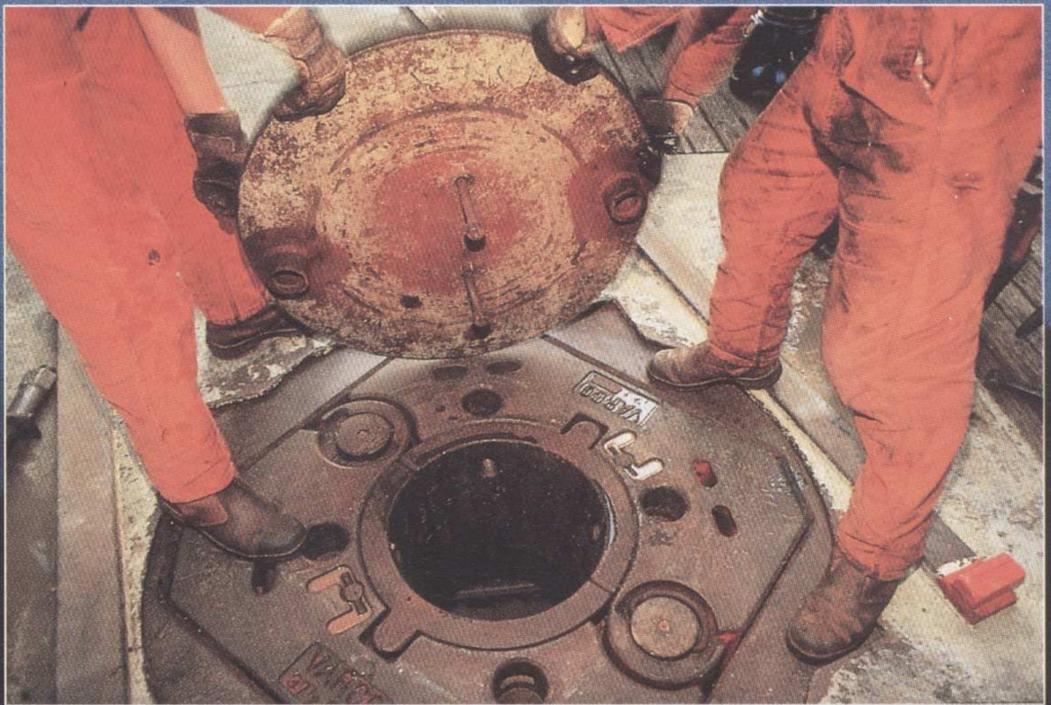


R. Emmermann
Prof. Dr. Rolf Emmermann

Koordinator des Schwerpunktprogramms KTB der Deutschen Forschungsgemeinschaft



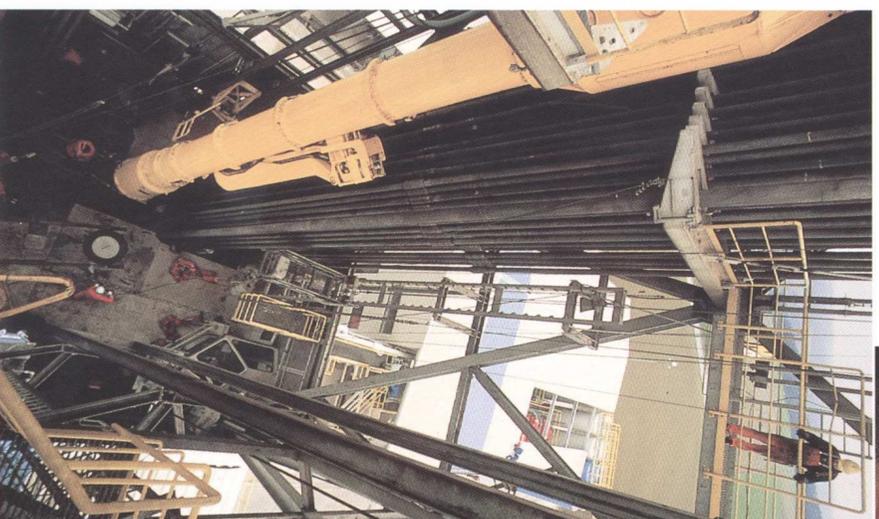
Bis zum Oktober 1994 war in dem markanten Bohrturm, der 83 Meter hoch aus der hügeligen Landschaft der Oberpfalz aufragt, rund um die Uhr Betrieb, und jetzt noch kommen Forscher an das über neun Kilometer tiefe Bohrloch, um Meßsonden hinabzulassen. Der Turm steht als Symbol für ein einzigartiges geowissenschaftliches Projekt: das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Wissenschaftlich und technisch höchst erfolgreich, ist es zum Vorreiter für ein internationales kontinentales Bohrprogramm geworden



Der Vorstoß in die Übertiefe

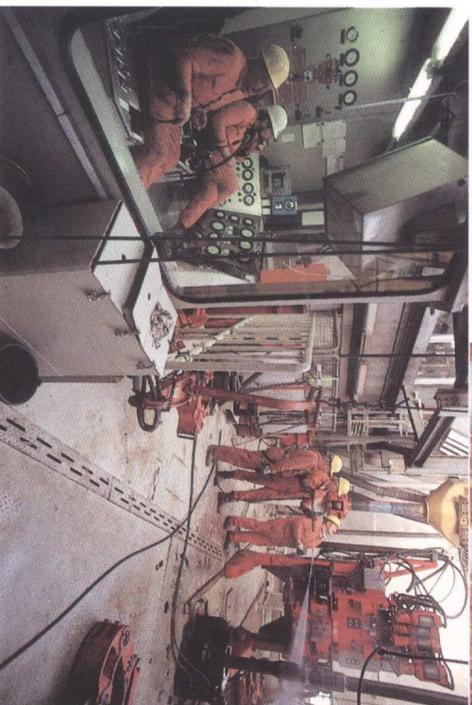
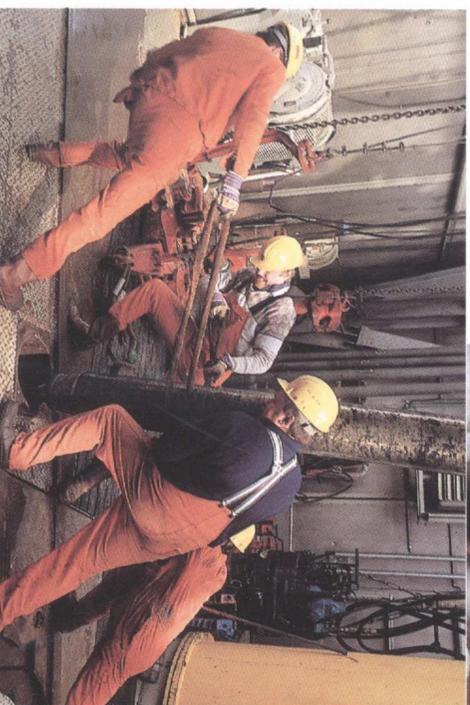
MENSCH UND ROBOTER ARBEITEN HAND IN HAND

Wenn zum Wechseln des Bohrmeißels der unterste Teil des Bohrstangs aus dem Loch kam, der Generator und Motor, den Steuerteil und anderes High-Tech-Gerät enthielt, waren Kraft und Geschick gefragt. Das zuvor emporggezogene kilometerlange Gestänge hingegen wurde von einem Roboter in 40 Meter lange Stücke zerlegt und vom gelben »Pipehandler« (kleines Foto) automatisch im Turm abgestellt, jedes an seinen Platz und griffbereit zum Wiederausammensetzen



AUSRANGIERT MIT ABGESCHLIFFENEN WARZEN

Rollenmeißel, bei denen jeweils drei mit Hartmetallwarzen besetzte Kegel gegeneinander rotieren, wurden verwendet, wenn keine Bohrkernne gewonnen werden sollten. Nach 60 bis 80 Meter Bohrstrecke waren die silbrigen Warzen aus Wolframcarbid darauf abgeschliffen, daß der Meißel ausgewechselt werden mußte. Von der Dillierkabine aus wurden die Arbeiten im Bohrturm – hier das Bergen einer »Schwerstange« – gesteuert



Bi 9101 Meter Tiefe war Schluss. Mit einem Knopfdruck stoppte Dr. Gebhard Ziller, Staatssekretär im Bundesministerium für Forschung und Technologie (heute Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie), die Bohranlage. Nach 1468 Bohrtagen wurde am 12. Oktober 1994 bei Windschessenbach in der Oberpfalz Deutschlands tiefste und heißeste, schwierigste und aufwendigste, aber auch wissenschaftlich ertragsreichste Bohrung beendet – ein einzigartiges Experiment voller Superlative.

Beim Kontinentalen Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB), dem bisher mit Abstand größten Forschungsprojekt deutscher Geowissenschaftler, wurde ein Bereich der Erdkruste angezielt, in dem normalerweise brüchig-sprödes Gestein plastisch zu werden beginnt. Um so weit zu gelangen, war es erforderlich, mit ungewöhnlicher Präzision senkrecht in die Tiefe vorzustoßen, und das bei sehr hartem und in seiner verfallenen Struktur äußerst schwierig zu durchlaufendem Gestein. Dank eigens entwickelter „Vertikalbohrtechnik“ wurde die weltweit „senkrechtste“ tiefe Bohrung niedergebracht.

Niemals zuvor haben Forscher bei einer Bohrung derart viele Proben und Meßdaten gewonnen. Kein Stückchen Erdkruste wurde so intensiv mit so vielfältigen Methoden untersucht wie der KTB-Bohrplatz und seine Umgebung, keinem Bohrloch jemals so viel Aufmerksamkeit gewidmet, mit großenteils erstmals eingesetzten Meßgeräten. Hunderte von Geowissenschaftlern – Arbeitsgruppen nicht nur aus Deutschland, sondern aus insgesamt zwölf Ländern – waren und sind noch weiterhin mit den Analysen der aus der nordostbayerischen Tiefe heraufgeholtten Proben und der Auswertung vielfältiger Messungen im Bohrloch wie an der Erdoberfläche beteiligt.

Die wissenschaftliche Ausbeute kann sich sehen lassen. Erstmals gelang es, grundlegende Zustände und Prozesse, die sich in der tieferen Erdkruste abspielen, vor Ort zu untersuchen. Dabei ging es um den Stoffbestand und die Strukturen, um die Entstehungsgeschichte der Gesteine, die für jeden sichtbar vieldurchgemacht haben, um die Spannungsfelder, unter denen sie im Laufe der Jahrmillionen gestanden haben und heute stehen, um die Kräfte und Mechanismen, die Gesteine in der tieferen kontinentalen Erdkruste deformieren, um Wärmeproduktion und -transport.

Elektrische und magnetische Eigenschaften der durch die Bohrung zugänglich gewordenen Tiefengesteine konnten mit den Ergebnissen, die bei der Tiefen Sondierung, durch Messungen von der Erdoberfläche aus, gewonnen wurden, ebenso verglichen werden wie



STEINERNE DOKUMENTE AUS DER UNTERWELT

Die manchmal zentbrochenen Bohrkern wurden im Labor als erstes sorgfältig zusammengesetzt und beschrieben. Spannungsrisse im Gestein konnten besonders gut an Großkernen studiert werden – hier beim Übertragen auf eine Folie –, die erstmals beim KTB gewonnen wurden. Eine präzise Rundum-Abbildung eines Kernstücks lieferte ein umgebauter Fotokopierer, über den der Kern gerollt wurde

die tatsächlich angebrochenen geologischen Strukturen mit den Resultaten der „Durchleuchtung“ mit Hilfe von natürlichen und künstlichen Erdbebenwellen. Auf allen Gebieten gab es Überraschungen. Manche Lehrmeinung mußte revidiert, von scheinbar gut gesicherten Vorstellungen Abschied genommen werden.

Zu den großen Überraschungen zählte etwa das reiche Vorkommen von „Fluiden“, heißen hochkonzentrierten Salzlösungen mit darin gelösten Gasen, bis hinab zum Grund des Bohrlochs. Nach herkömmlicher Meinung sollte das Gestein in der tieferen Kruste un-durchlässig und weitgehend trocken sein. Die Tiefbohrung hat gezeigt, daß diese Annahmen falsch waren.

Nun ist die stärkste und modernste, speziell für das KTB entwickelte Anlage für Bohrungen an Land bis auf den Turm demontiert. Aber die Geschichte des KTB ist noch nicht zu Ende. Nach Abschluß der Bohrarbeiten wurden im tiefen Loch drei große Experimente vorgenommen. Die Hauptbohrung und das 4000 Meter tiefe Loch der Vorbohrung stehen als „Tiefenlabor“ für

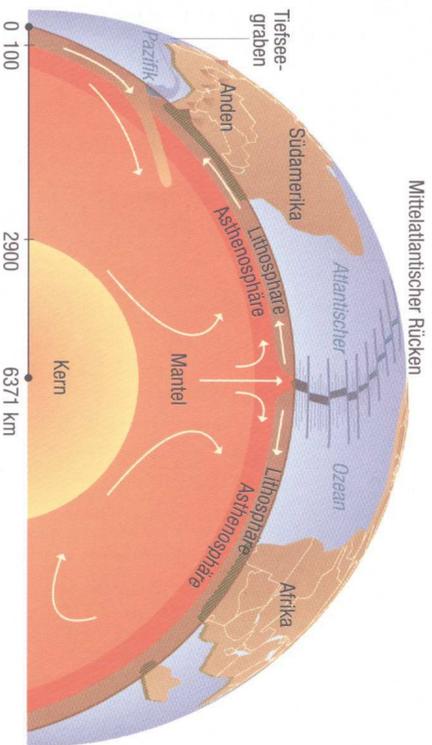
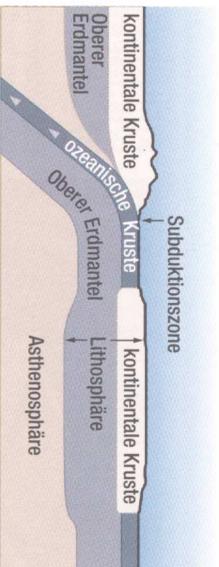
Messkampagnen weiterhin zur Verfügung. Und natürlich wird die Auswertung der Proben und Meßdaten fortgesetzt.

Doch neben dem KTB und in gewisser Weise aus ihm heraus, gefördert durch das wissenschaftliche Vorbild des KTB, wächst nun das International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) heran. Die auf die feste Erde spezialisierten Geowissenschaftler wollen ein international abgestimmtes Bohrprogramm einrichten, wie es die Meeresgeologen schon seit langem mit großem Erfolg betreiben.

Es ist kein Zufall, daß das von einer internationalen Gruppe aus Wissenschaftlern, Managern und Vertretern von Wissenschaftsförderorganisationen verfaßte Memorandum über die Realisierung des ICDP unter deutschem Vorsitz entstanden ist. Danach soll für die operative Durchführung des ICDP das Geoforschungszentrum Potsdam verantwortlich sein, mit Mitarbeitern, die beim KTB Erfahrung gesammelt haben. Auch die Datenzentrale des International Continental Scientific Drilling Program soll in Potsdam eingerichtet werden. Deutsches Know-how ist gefragt. In einem neuen Schwerpunktprogramm „KTB/ICDP“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) werden Arbeiten im Rahmen des alten KTB und des ICDP gemeinsam ab 1996 gefördert. So ist die weitere Auswertung der Ergebnisse und die Finanzierung von Experimenten im Tiefenlabor gesichert, und das internationale Nachfolgeprojekt kann sich entfalten.

Von Wärme aus dem Erdinneren angetrieben, driften die Lithosphärenplatten auf der zähplastischen Asthenosphäre. An untermeerischen Gebirgszügen wie dem Mittelatlantischen Rücken aufsteigendes Magma setzt sich an die Platten an, in Tiefseegräben kehren diese in den Erdmantel zurück. Im Gegensatz zur ozeanischen Kruste bleibt die leichtere kontinentale Kruste größtenteils an der Oberfläche zurück. Wenn zwei Lithosphärenplatten kollidieren, entsteht ein Gebirge, wie vor über 300 Millionen Jahren das Variszische Gebirge, in dessen Wurzel beim KTB gebohrt wurde

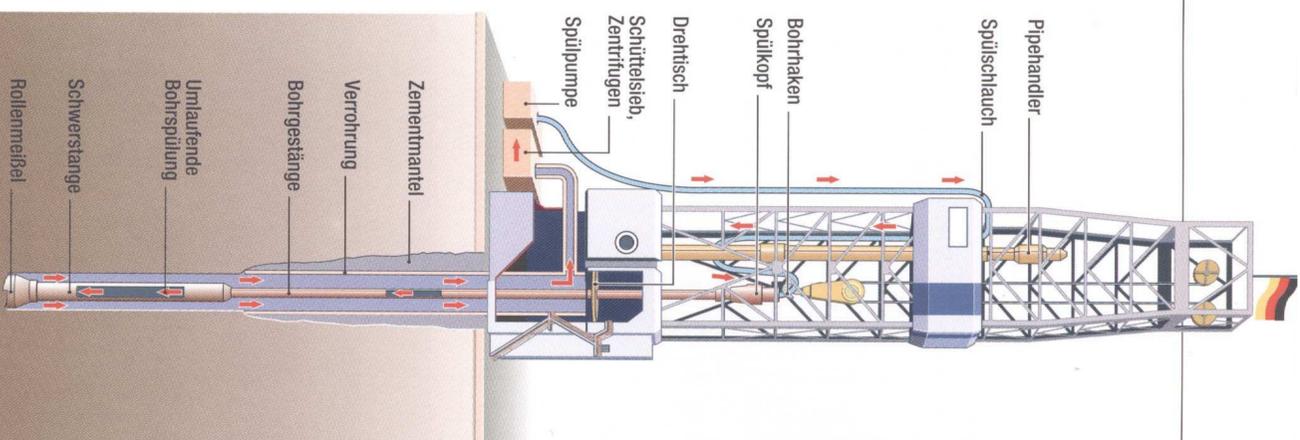
GEBIRGE WACHSEN, WO PLATTEN KOLLIDIEREN



SO WURDE ÜBERTIEF GEBOHRT

Viele technische Neuerungen wurden für das KTB entwickelt. Das Grundprinzip beim Bohren blieb jedoch unverändert. Der extra hohe Bohrturm hatte wie andere Bohrtürme die Funktion eines Krans. Am Haken hing der Bohrstang und wurde, wenn ein Wechsell des Bohrmeißels fällig war, Stück für Stück aus dem Loch gezogen. Auf der Arbeitsbühne wurden jeweils die obersten Rohre abgeschraubt und mit Hilfe des autonotischen Pipehandlers im Turm abgestellt. Inzwischen war der noch im Bohrloch hängende Strang im Drehtisch eingespant, bis ihn der Haken wieder fest im Griff hatte. Dann wurde das nächste 40 Meter lange Stück des Gestänges herausgezogen und abmontiert.

Beim Bohren wurde die Spülflüssigkeit unter hohem Druck durch den hohlen Strang abwärts gepumpt. Sie trieb über einen Motor den Meißel an, trat durch Düsen ins Bohrloch aus und kehrte zwischen Gestein und Bohrochswand an die Erdoberfläche zurück. Dabei trug sie das zermahlene Gestein nach oben. Durch Schuttsiebe und Zentrifugen wurden Bohrklein und Bohrmehl von der Spülflüssigkeit getrennt, die über Pumpe und Spülkopf in den Strang zurückgelangte



MIT ROLLEN UND DIAMANTEN IN DIE TIEFE

Als Bohrwerkzeuge wurden Kronen – zum Gewinnen von Bohrkernen – und Meißel – nur zum Zermalmen des Gesteins –

unterschiedlicher Größen und Typen eingesetzt: Rollen- und Diamentbohrokronen (links und rechts oben) sowie Rollenmeißel (rechts Mitte). Auf dem Foto unten wird gerade ein frisch an die Erdoberfläche geholter Großkern von 23,4 Zentimeter Durchmesser aus dem Kernrohr gezogen



Ein wesentlicher Impuls kam dabei aus einer als schmerzlich empfundenen Diskrepanz:

● Einerseits waren bei der geophysikalischen Tiefensondierung wie auch bei geochemischen und physikalischen Modellversuchen im Labor große Fortschritte erzielt worden.

● Andererseits mangelte es an einer Möglichkeit, die Interpretation der geophysikalischen „Bilder“ aus dem Untergrund und die Übertragung der Labordaten auf die Natur durch einen Vergleich mit den wirklichen Verhältnissen zu überprüfen. Dazu mußte man die Gesteine in der Übertiefe erreichen.

Ansporn war den deutschen Geowissenschaftlern auch das von amerikanischen Kollegen in den sechziger Jahren begonnene und Mitte der siebziger Jahre zur internationalen Kooperation erweiterte Tiefseebohrpro-

gramm. Dieses „Deep Sea Drilling Project“, das seit 1985 mit inzwischen über tausend wissenschaftlichen Bohrungen in der Tiefsee als „Ocean Drilling Program“ fortgeführt wird, hatte gleich zu Beginn unser Bild von der Erde revolutioniert. Wenige „Nadelstiche“ in die Kruste unter den Ozeanen hatten genügt, das Konzept der Plattentektonik zu begründen, demzufolge die äußere Hülle der Erde aus großen, sich unabhängig gegeneinander verschiebenden Platten besteht.

An weitreichende Bewegungen der Kontinente hatte der deutsche Meteorologe und Geophysiker Alfred Wegener schon 1912 gedacht. Aber Wegener konnte seine Theorie der Kontinentalverschiebung nicht beweisen. Heute wissen wir, daß nicht allein die Kontinente driften. In Bewegung ist die ganze äußere Hülle der Erde. Die Geschwindigkeit der durchschnittlich 100 Kilometer

ter dicken Platten aus Erdkruste und Oberem Erdmantel, zusammen „Lithosphäre“ (Steinhülle) genannt, beträgt zwar nur wenige Zentimeter pro Jahr. Doch die Zentimeter addieren sich in beispielsweise zehn Millionen Jahren – einer kurzen Spanne bei einem Alter der Erde von 4,6 Milliarden Jahren – zu einigen hundert Kilometern. Schon im Laufe eines Menschenlebens kommen die Platten ein paar Meter voran.

Die Ozeane galten als unveränderlich, aber die Bohrungen in der Tiefsee haben das Gegenteil bewiesen: Der Meeresboden ist überall relativ jung. Er entsteht in einem 60 000 Kilometer langen System von Unterwassergebirgen, das sich durch die Ozeane zieht. Unter den Gebirgsrücken steigt Lava auf und lagert sich davontreiben, um schließlich zu einer Art Recycling ins Innere der Erde zurückzukehren. Das geschieht in den Tiefseegräben, die somit ebenso Plattengrenzen bilden wie die untermeerischen Gebirgsrücken. Der Unterhang einer Platte geht nicht still vonstatten. Ganze Reihen von Vulkanen begleiten die Verschiebungs- oder Subduktionszonen, und mit diesen eng verbunden sind auch berichtigte Erdbebenzüge.

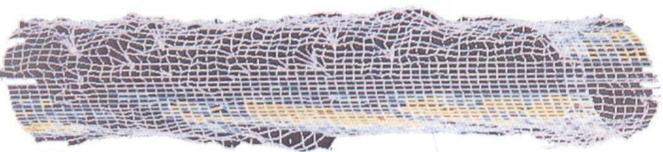
So wird in den Ozeanen laufend aufgeräumt. Nirgendwo fanden sich in ihnen Gesteine, die älter als 165 Millionen Jahre sind. Ganz anders die Kontinente mit ihnen bis vier Milliarden Jahre alten Gesteinen. Aus leichtem Gestein aufgebaut, treiben sie auf den Platten huckepack mit, und sie verschwinden nicht einfach wieder im Erdinnern. Während der Tiefseeboden laufend erneuert wird, bleiben die Kontinente über Jahrmilliarden bestehen – freilich nicht unverändert.

Mit den Platten driftend, werden Festlandshollen zu größeren Erdteilen vereinigt und auch wieder geteilt, wenn in einem Kontinent ein Ozean neu entsteht. Als ewige Wanderer werden die Landmassen seit Urzeiten immer wieder zerrissen und an anderen Stellen der Erde in anderer Form zusammengeschoben. Bei den Kollisionen wurden – wie heute durch den Zusammenprall Indiens und Eurasiens der Himalaya – in Jahrmillionen gewaltige Gebirge aufgetürmt, die in weiteren Jahrmillionen der Erosion anheimfielen.

Wer nach Spuren der Erdgeschichte sucht, die weit in die Vergangenheit zurückreichen, kann nur auf den Kontinenten fündig werden. Relativ gut erforscht ist das „Deckgebirge“ aus Sediment- und vulkanischen Gesteinen. Über das „Grundgebirge“ hingegen, das unter dem Deckgebirge liegt, vielerorts aber auch bis an die Oberfläche reicht, ist viel weniger bekannt.

Die Gesteine des Grundgebirges sind nicht mehr die, die sie einst waren. Sie haben in der Erdkruste bei weitaus höheren Temperaturen als nahe der Oberfläche und einem Vielfachen des oben herrschenden Drucks eine

NEUE ENTWICKLUNGEN IN DER BOHRTECHNIK UND BEI DEN BOHR- LOCHMESSUNGEN



Mit Computerhilfe lieferte der »TelevIEWer« drei-dimensionale Darstellungen des Bohrhochs – wichtig unter anderem für schnelle Diagnosen in bohrtechnischen Problemzonen

Zum Erfolg des KTB trugen zahlreiche technische Neuerungen bei, die sich inzwischen als richtungweisend für die Zukunft erwiesen haben:

- Schon bei der Vorbohrung bewährte sich innovative Bohrentechnik durch Verschmelzen zweier Bohrvorfahren, deren jeweilige Vorteile vereint wurden. Kombiniert wurde die im Bergbau sonst bei kleinen Bohrdurchmessern eingesetzte „Seilkernbohrtechnik“ mit der bei der Suche und Förderung von Erdöl und Erdgas angewandten „Rotary-Technik“. Dazu wurde eine Rotary-Bohranlage mit einem hydraulischen Krattrehkopf zum Antrieb des speziell entwickelten Seilbohrkernstranges mit Kernrohr- und Diamantkernbohrkronen angepasst. Das Ergebnis übertraf alle Erwartungen mit 3500 Metern an gewonnenen Gesteinskernen bester Qualität.

- Die Bohranlage für die Hauptbohrung, mit ihrem hohen Turm zum Wahrzeichen einer ganzen Region geworden, begeisterte Fachleute durch das mit modernster Technik ausgestattete Innenleben, das zum Inbegriff für den Bau mo-



derner Bohranlagen geworden ist. Besonders hervorzuheben sind hierbei die teilautomatisierten Arbeitsabläufe (siehe Seite 23). Durch sie wurden nicht nur Zeit und Kosten gespart, sondern sie erleichterten auch die sonst schwere und gefährliche Arbeit im Turm. Im vierjährigen Betrieb bis an die Grenzen der Leistungsfähigkeit hat sich die

Außergewöhnliches wurde bei der Verrichtung – hier das Einfahren eines Rohrs im Bohrturm – geleistet. Höhepunkt war eine sechs Kilometer lange »Rohnrour«

Anlage hervorragend bewährt und sichert den beteiligten Unternehmen einen Spitzenplatz im weltweiten Wettbewerb.

- Um möglichst senkrecht zu bohren, setzte das KTB auf Vertikalbohrsysteme, die das Bohrwerkzeug auch entgegen den im Grundgebirge besonders starken Ablenkkraften im Lot hielten. Ausgehend von einem im Bergbau entwickelten „Zielbohrsystem“ wurden selbsttätig steuernde Vertikalbohrsysteme konstruiert (siehe Seite 24) und laufend weiter verbessert. So wurde die KTB-Hauptbohrung zum „senkrechtsten“ Bohrhoch der Welt. Die beteiligte Industrie hat die Führung bei der Entwicklung von automatischen Richtbohrsystemen übernommen, die zunehmend bei der Ausbeutung von Erdöl- und Erdgaslagern mittels Horizontalbohrtechnik angewandt werden.
- Neue Ideen waren auch für das Bohr- und Verröhrungsschema gefragt. Angesichts der unbekannteren geologischen Situation und des besonders harten und das Bohrwerkzeug stark verschleißenden Gesteins wurde nach dem Motto „so klein wie möglich und so groß wie nötig“ gebohrt. Dazu wurde der Abstand zwischen Bohrhochwand und Verröhrung („Clearance“) von normalerweise 40 auf unter 15 Millimeter verringert. Voraussetzung hierfür waren der nahezu senkrechte Bohrhochverlauf und die Entwicklung besonders schlanker Rohrverbinder. Höhepunkt dieser Arbeiten war der Einbau einer Rekord-„Rohrour“: sechs Kilometer lang, aus 469 Einzelrohren zusammengesetzt und über 600 Tonnen schwer. Dadurch wurden nicht nur bezüglich Gewicht und Länge weltweit

Maßstäbe gesetzt, sondern besonders auch wegen der Maßarbeit bei extrem geringer Clearance.

- Große Anstrengungen wurden unternommen, um die Technik zum Gewinnen von Bohrkernen, eines im wahrsten Sinne des Wortes kostbaren Gutes, zu verbessern. Die hervorragenden Erfahrungen mit der in der Vorbohrung eingesetzten Diamantkernbohrtechnik ermunterten dazu, dieses Verfahren auch auf die größeren Durchmesser der Hauptbohrung zu übertragen. Dafür wurde ein neues Kernbohrsystem entwickelt, das instand ist, Kerne mit einem bis dahin nicht gekannten Durchmesser von 23,4 Zentimetern zu schneiden.
- Die im Hinblick auf Temperatur, Druck und Tiefe extremen Bedingungen für Messungen im Bohrhoch erforderten ein völlig neuartiges Meßkonzept. Dazu gehört eine rund um die Uhr einsatzfähige Dauermeßstation mit Kabelwinde, Computern zur Registrierung der Meßdaten, verschiedenen Sonden für Messungen im Bohrhoch, mechanischen und elektronischen Werkstätten sowie computerunterstützten Arbeitsplätzen für Wissenschaftler und Ingenieure zur unmittelbaren Erstausswertung der Daten. In größeren Tiefen wurde mit speziell für hohe Temperaturen entwickelten Kabeln gemessen. Die Installation eines ständigen Kabels von der „Blauen Stadt“, wie die Meßstation wegen der Farbe ihrer Container unter KTB-Mitarbeitern genannt wurde, zum Bohrhoch und die permanente Einsicherung in den Bohrturm sparte teure Anlagenteile und erhöhte die Sicherheit. Das gesamte Meßprogramm verlief ohne jeden größeren Störfall.

„Metamorphose“ durchgemacht. Bei diesem Prozeß verändert sich das Gefüge der Gesteine tiefgreifend, Stoffe werden hinweg- und hinzugeführt, Minerale in andere verwandelt. Sind die Gesteine in größerer Tiefe starken Spannungen ausgesetzt, verbiegen sie sich, anstatt zu brechen. Dabei entstehen oft höchst anmutige Strukturen, mit denen sich Marmorkuchen nicht messen kann.

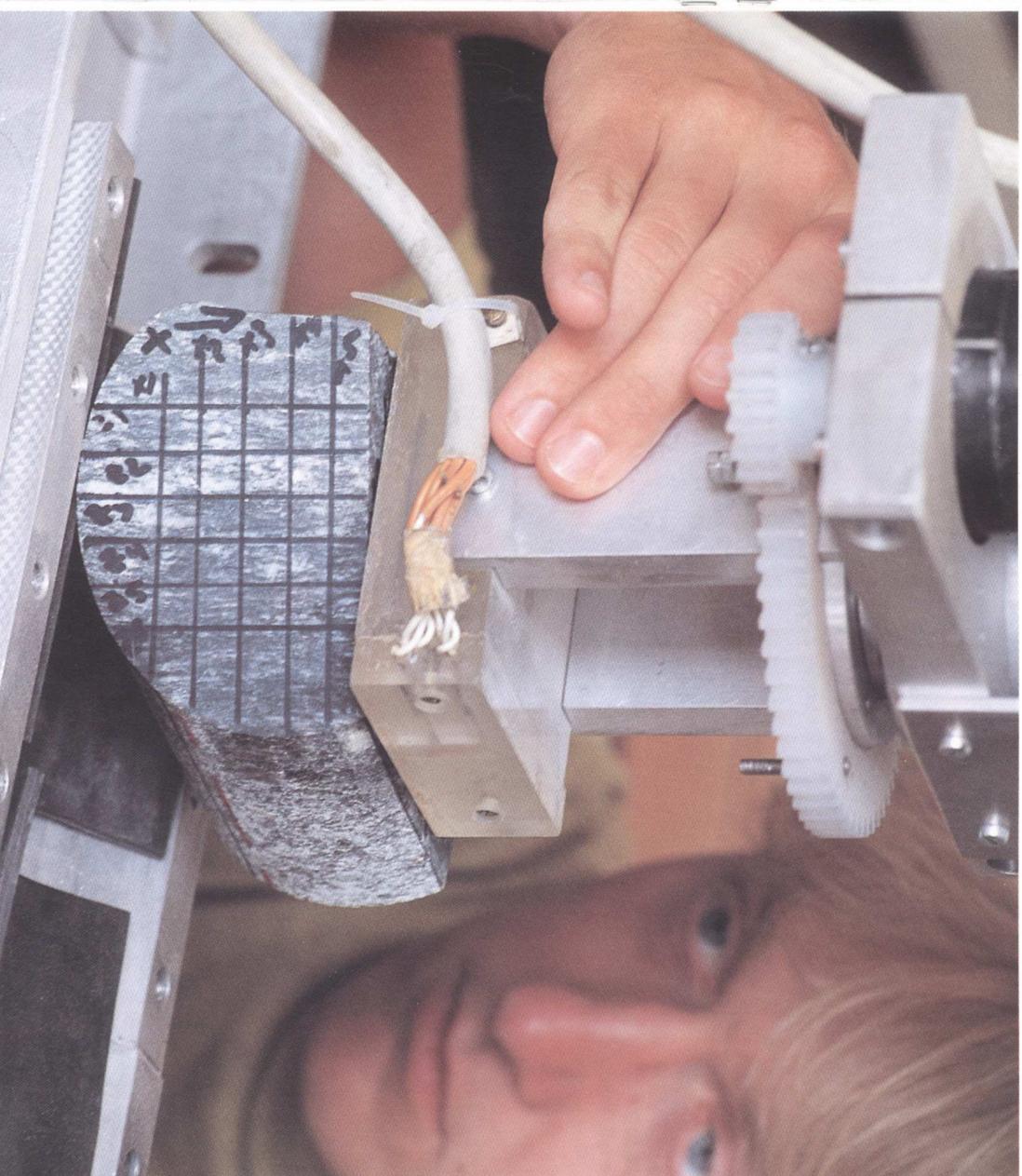
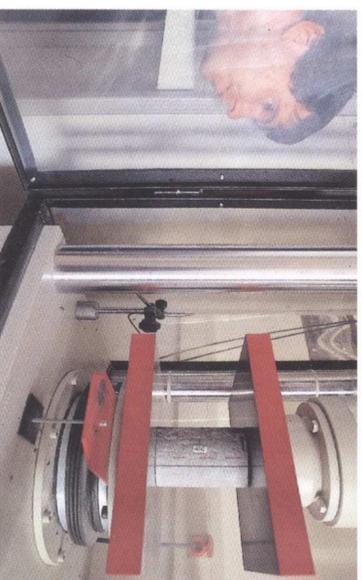
Daß die zu „Metamorphiten“ umgewandelten Gesteine nach Jahrmillionen wieder aus der Tiefe auftauchen, liegt an der Erosion. Das Gebirge verliert an Masse, und damit ändert sich auch das Schweregleichgewicht zwischen der tief reichenden Gebirgswurzel und dem umgebenden Gestein. Das Gebirge schwimmt gewissermaßen auf, ähnlich einem Schiff, dessen Ladung gelöscht wird. Auf diese Weise steigen die umgewandelten Gesteine bei fortschreitender Erosion allmählich empor, bis sie schließlich zutage treten. Metamorphite an der Erdoberfläche zeigen an, wo einst Gebirge waren und wieder abgetragen wurden.

Diese Zusammenhänge sind schon seit längerem bekannt. Doch wie's da drinnen aussieht in der geochimischen Küche, in der die Gesteine sich zu verformen beginnen und in andere umgewandelt werden, wußte niemand zu sagen. Das war nur durch eine über tiefe Bohrung zu ergünden.

Dem Vorschlag der deutschen Geowissenschaftler folgte eine Studie über Zielsetzungen, Probleme und Lösungsansätze, die das Bundesministerium für Forschung und Technologie überzeuete. Das Forschungsministerium fördert das Kontinentale Tiefbohrprogramm seit 1983 mit 583 Millionen DM. Davon flossen jährlich rund sieben Millionen DM an die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die über ein Schwerpunktprogramm die wissenschaftlichen Arbeiten koordinierte. Mit der Durchführung des Gesamtprojekts wurde das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLFB) beauftragt.

Eine 60köpfige KTB-Projektgruppe beim NLFB in Hannover und später auch am Bohrplatz Windisch-eesenbach bereitete das Unternehmen vor, sorgte für einen reibungslosen Ablauf der vielschichtigen und miteinander verflochtenen Tätigkeiten. Die Aktivitäten von Wissenschaftlern und Ingenieuren mußten koordiniert, Industriefirmen mit einschlägigem Know-how in das Projekt integriert werden. Nicht zuletzt trug eine effiziente Verwaltung, die mitunter für den öffentlichen Dienst ungewohnte Herausforderungen zu bewältigen hatte, zum Erfolg bei.

1981 begannen die Vorarbeiten. Zur Frage, wo gebohrt werden sollte, wurden 30 Vorschläge gemacht. Die Endauswahl unter den letzten vier hing von einer grundsätzlichen Entscheidung ab: Wollte man sich al-



DIE KERNE MUSSTEN SICH VIEL GEFALLEN LASSEN

Im Feldlabor gleich zu Füßen des Bohrturns wurden die Kerne einer Fülle physikalischer Messungen unterzogen, um Aufschluß über die Krustenbereiche zu erlangen, aus denen das Gestein stammt. Gamesen wurden etwa die Wärmeleitfähigkeit (rechts), die Gammastrahlung aus radioaktivem Zerkall (links oben), die elektrische Leitfähigkeit (Mitte). Beim Druckversuch (unten) wurde die Festigkeit bis zum Bersten geprüft

lein auf das Grundgebirge konzentrieren oder im oberen Bereich der Bohrung interessantes Deckgebirge durchleuchten und bei dieser Gelegenheit gleich mituntersuchen? So sah ein Vorschlag vor, auf der ordentlich geschichteten Schwäbischen Alb im Hohenzollerngraben zu bohren, der immer wieder von Erdbeben erschüttert wird.

1983 waren noch zwei Lokationen im Rennen: die Oberpfalz und der Schwarzwald. Beide Gebiete boten Grundgebirge pur und versprachen den Zielsetzungen der geplanten Bohrung – formuliert in fünf Hauptforschungsstemen – gerecht zu werden. Diese Themen waren:

- die Natur von „seismischen Reflektoren“ – Zonen, in denen natürliche und künstliche Erdbebenwellen auf-

fällig stark zurückgeworfen werden –, sowie von elektrischen, magnetischen und Schwereanomalien;

- die Spannungen in der Erdkruste und der Übergang der Gesteine vom spröde-brüchigen Bereich in einen Zustand plastischer Verformbarkeit;
- die Temperaturverteilung in der Kruste, der Wärmestrom und die Wärmeproduktion;
- die Fluide im Gestein und die Rolle, die sie bei Transportprozessen spielen;
- der Strukturbau und die Entwicklung mitteleuropäischer Kruste im Bereich einer alten Gebirgswurzel.

Zwei Jahre lang wurden beide Lokationen ausgiebig erkundet. Im September 1986 fiel nach einer Klausurabstimmung von über 200 Geowissenschaftlern und Ingenieuren mit intensiven Diskussionen die Entscheidung für

die Oberpfalz. Den Ausschlag gaben Befürchtungen, daß der angestrebte Temperaturbereich von 250 bis 300 Grad im Schwarzwald bereits in sieben Kilometer Tiefe bei zu geringen Drücken erreicht sein könnte, während die Temperaturen für die Oberpfalz eine Tiefe von 12 bis 14 Kilometern versprachen.

Das hätte das tiefste Loch der Erde bedeuten können – eine Aussicht, die in der Öffentlichkeit Eindruck machte, aber häufig zu Fehldeutungen führte. Zwar sollte so tief wie möglich in die Kruste vorgedrungen werden, doch einen Rekord aufzustellen war nie geplant. Von Anfang an zielte das Programm auf – wie die Konzeption 1984 in einem Statusbericht zusammengefaßt wurde – „Grundlagenforschung über die physikalischen und chemischen Zustandsbedingungen und Pro-

zesse in der tieferen Erdkruste zum Verständnis von Dynamik und Evolution intrakontinentaler Krustenbereiche“.

Was die KTB-Forscher planten und dann auch ausführten, ist mit keiner der Tausenden von Bohrungen zu vergleichen, die weltweit alljährlich niedergebracht werden, zumeist auf der Suche nach Erdöl und Erdgas. Ansehnliche Tiefen wurden dabei erreicht, wie 1974 bereits bei „Bertha Rogers 1“, einer Bohrung zur Erdgasexploration im US-Staat Oklahoma: 9583 Meter. Eine Bohrung im mecklenburgischen Mirow endete 1977 in 8008 Meter Tiefe. Doch dabei wurden Sedimentgesteine durchbohrt, die weniger hart und wegen der regelmäßigen Schichtenfolge leichter zu durchdringen sind als die Produkte der Metamorphose.

Pionierarbeit im Grundgebirge hatten indes sowjetische Wissenschaftler und Ingenieure geleistet. Bereits 1970 hatten sie begonnen, bei Murmansk auf der Halbinsel Kola in die Wurzel eines seit über einer Milliarde Jahren zerfallenen Gebirges einzudringen, freilich mit anderer Zielsetzung - Suche nach Lagerstätten - und in einem anderen geologischen Umfeld. Auf 15 Kilometer Tiefe war die Bohrung geplant. 1991 waren die sowjetischen Forscher in 12 260 Meter Tiefe angelangt, nach jahrelangem Ringen um die letzten 200 Meter.



An dieser Flasche wurde Besuchern im Feldlabor die Spüflüssigkeit demonstriert: Beim Schütten verflüssigte sich das Gestein mit den Gesteinsbröckchen, um bei Stillstand gleich wieder zu erstarren

Auch davor schon waren die Schwierigkeiten groß. Bis zu 840 Meter entfernte sich der Bohrneißel von der Senkrechten. Bei flacheren Bohrungen spielen derartige Abweichungen keine entscheidende Rolle. Bei größeren Tiefen jedoch kommt es wegen der Reibung im Bohrloch zu unüberwindbaren Problemen. So war mit zunehmender Tiefe an umfassende Untersuchungen und regelmäßige Messungen kaum noch zu denken.

Gerade das aber hatten sich die deutschen Geowissenschaftler für das KTB vorgenommen: Sie mußten also alle Mühe daran wenden, daß ihr tiefes Loch zumindest auf den ersten paar tausend Metern möglichst senkrecht stand. Gerade am Anfang aber mußten sie sich erst mit den bohrtechnischen Eigenarten des Gesteins vertraut machen. Sie wollten neue Geräte und Verfahren erproben, was zu Problemen führen konnte, und sie hatten vor, erst einmal möglichst durchgehend Bohrkern zu gewinnen. Wenn Bohrkern gezeugen werden, ist es schwierig, die Richtung zu halten.

Die auf den ersten Blick ungewöhnliche Lösung war, zwei Löcher zu bohren. Bei der Vorbohrung bis in 4000 Meter brauchte man sich wegen einer Abweichung weniger Sorgen zu machen und konnte daher vieles tun,

was später heikel war. Bei der Hauptbohrung brauchte man in diesem Bereich keine Kerne mehr zu ziehen, konnte zügig in die Tiefe vordringen und sich voll auf die Vertikale konzentrieren.

Genau ein Jahr nach der Entscheidung für die Oberpfalz begann im September 1987 bei Windischeschenbach, etwa 80 Kilometer nordöstlich von Nürnberg, die Vorbohrung. Im April 1989 war die geplante Endtiefe von 4000,1 Metern erreicht. Ein umfangreicher Aufgabenkatalog wurde bewältigt: Die Wissenschaftler und Ingenieure beim KTB

- kerneten die Vorbohrung zu 90 Prozent,
- sammelten durch Untersuchungen an Bohrkernen, Bohrklein und Bohrspülung sowie mit Hilfe zahlreicher Messungen und Tests im Bohrloch detaillierte Informationen über die durchteuften Gesteine,
- gewannen Kenntnisse über den Spannungszustand in der Tiefe und über bohrtechnische Problemhorizonte,
- erprobten beim Bohren neue Werkzeuge, Verfahren und Materialien,
- setzten eine neuentwickelte Bohrspülung ein,
- testeten eine Fülle von herkömmlichen und neuentwickelten Bohrllochmeßsonden und machten eine große Anzahl von ihnen tauglich für hohe Temperaturen und Drücke.

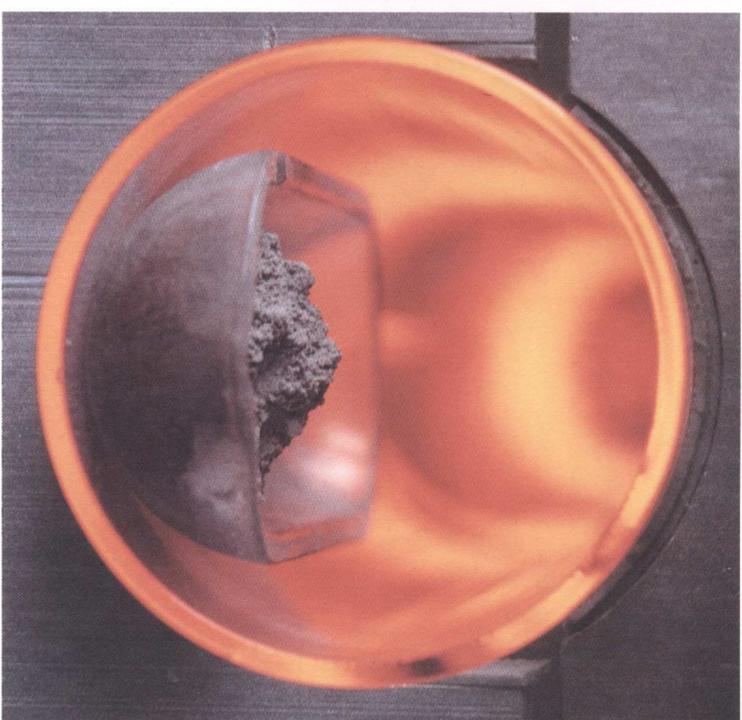
Fast 400mal wurden zwischen den Bohrarbeiten und in einem umfangreichen Abschlußprogramm Meßsonden an einem Kabel ins Bohrloch hinabgelassen. Diese ferngesteuerten Geräte registrierten etwa Druck und Temperatur, maßen Durchmesser und Verlauf des Bohrlochs, die Dichte des umgebenden Gesteins, dessen chemische Zusammensetzung, die natürliche Radioaktivität, elektrische Leitfähigkeit, Magnetismus. Für seismische Untersuchungen wurde eine Kette von Geophonen, empfindlichen Erschütterungsmessern, ins Bohrloch gehängt. Sie waren dazu bestimmt, künstlich erzeugte Schallwellen in unterschiedlichen Tiefen aufzunehmen. Auch spezielle Geräte zur Probenahme wurden eingesetzt. Mit einem Minibohrer konnten an besonders interessanten Stellen aus der Bohrlochwand kleine Kerne gezogen, mit speziellen Geräten aus bestimmten Horizonten Fluide gewonnen werden.

Für das vielseitige wissenschaftliche Programm wurden direkt am Bohrplatz zwei Einrichtungen aufgestellt, die es in dieser Perfektion noch nirgendwo gegeben hat: die Dauermessstation und das KTB-Feldlabor. In der Meßstation liefen die Daten der Meßsonden aus dem Bohrloch ein. Noch während der Messungen wurden sie gesichtet, so daß sie schon für aktuelle Entscheidungen zur Verfügung standen.

Außer Labors enthält die Station Werkstätten, in denen die Sonden vor jeder Fahrt in die Tiefe gründlich geprüft und nach der Rückkehr völlig überholt wurden.



DIE SPÜLUNG BRACHT BOTSCHAFT AUS DER TIEFE



Das aus der Spüflüssigkeit gewonnene Bohrklein gab Auskunft über das gerade durchbohrte Gestein. Zermahlen und in Formen zu Tabletten gepreßt (rechts), wurde es automatisch auf 20 chemische Elemente und die enthaltenen Minerale analysiert. Um den Gehalt an Wasser und Kohlenstoff zu bestimmen, wurden Proben in einem Tiegel erhitzt (links und Mitte)



Viele Neuentwicklungen und insbesondere die Anpassungen an die besonderen Bedingungen der Tiefe wurden hier vorgenommen. Bohrlochmessungen in den geplanten Teufen, bei Temperaturen bis 300 Grad und Drücken bis 1,5 Kilobar, stellen extreme Anforderungen an die Meßtechnik. Ab 1996 wird die mit zunehmender Bohrtiefe immer weiter entwickelte und dadurch zu einer weltweit einzigartigen Einrichtung gewachsene Meßstation für die Experimente im Tiefenlabor eingesetzt.

Auch mit dem KTB-Feldlabor wurde kein Provisorium, sondern ein hochmodern ausgestattetes interdisziplinäres Forschungsinstitut errichtet, das zugleich zur Aufbewahrung der gewonnenen Proben und zur Erfassung aller Meßdaten bestimmt war. Die Aufgabe der dort beschäftigten Wissenschaftler und Techniker war es, das zutage geförderte Material gleich vor Ort in einem umfangreichen Analysen- und Meßprogramm chemisch und physikalisch zu untersuchen, die Gesteine nach dem Mineralbestand zu klassifizieren und ihre Struktur zu bestimmen.

Manche Untersuchungsergebnisse wurden für schnelle operative Entscheidungen beim Bohren oder bei den Messungen im Bohrloch benötigt. Darüber hinaus sollten im Feldlabor alle geowissenschaftlich relevanten Daten gewonnen werden, um das durchteufte

„Gebirge“, wie es in der Bergmannssprache heißt, detailliert zu beschreiben – als Basisinformation für vielfältige Forschungsprojekte an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen.

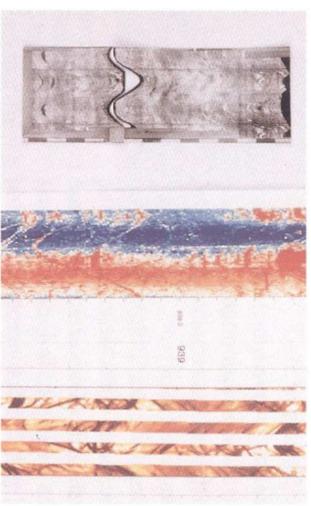
Weil die Hauptbohrung, wie im Bohrkonzzept von vornherein festgelegt war, bis in 4000 Meter Tiefe keine Kerne liefern würde und auch darunter aus Zeit- und Kostengründen nur ein geringer Teil der Bohrung gekernt werden konnte, galt ein Schwerpunkt bei den Untersuchungen der Frage, ob eine lückenlose Bestandsaufnahme des durchbohrten Gebirges auch ohne Bohrkern möglich sei. Bohrlochmessungen spielten dabei eine Schlüsselrolle. Überdies aber ließ sich zeigen, daß das von der Bohrspülung heraufgebrachte feine Bohrmehl und das größere Bohrklein über die Art der Gesteine, die der Bohrer gerade passiert hat, zuverlässig Auskunft gibt.

Die Spüflüssigkeit hatte vielfältige Aufgaben: Im hohlen Bohrgestänge unter hohem Druck abwärts gepumpt, versetzte sie über einen Motor den Bohrneißel in Drehung, trat ins Bohrloch aus und trug beim Aufstieg im Loch das zermahlene Gestein nach oben. Gleichzeitg kühlte, schmierte und stabilisierte sie das Bohrloch.

Darüber hinaus hatte den KTB-Forschern von Anfang an vorgeschwebt, die Spüflüssigkeit als Übermitt-

ler von geochemischen Informationen zu nutzen: Sie sollte Aufschluß über das gerade durchbohrte Gestein liefern und auch den prompten Nachweis von Gebirgsflüden ermöglichen. Aus diesem Grund wurde ein Spülungssystem entwickelt, das an Stelle von Ton mit schwankender Zusammensetzung ein synthetisches Silikat von konstanter Zusammensetzung enthält.

Der Vergleich des Bohrkern-Außeren (links) mit Aufnahmen von »Televiewer« (Mitte) und »Formation Micro Imager« (rechts) erlaubt es, die ursprüngliche Orientierung des Kerns im Gestein zu bestimmen.

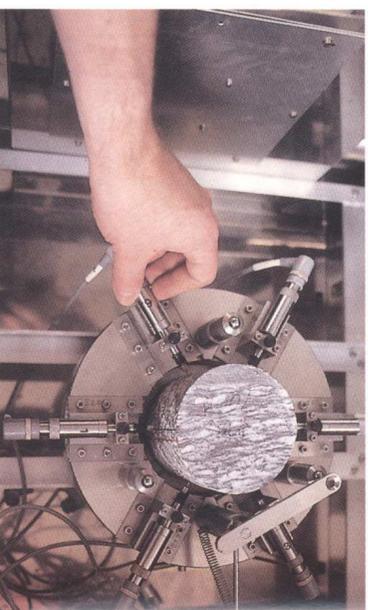
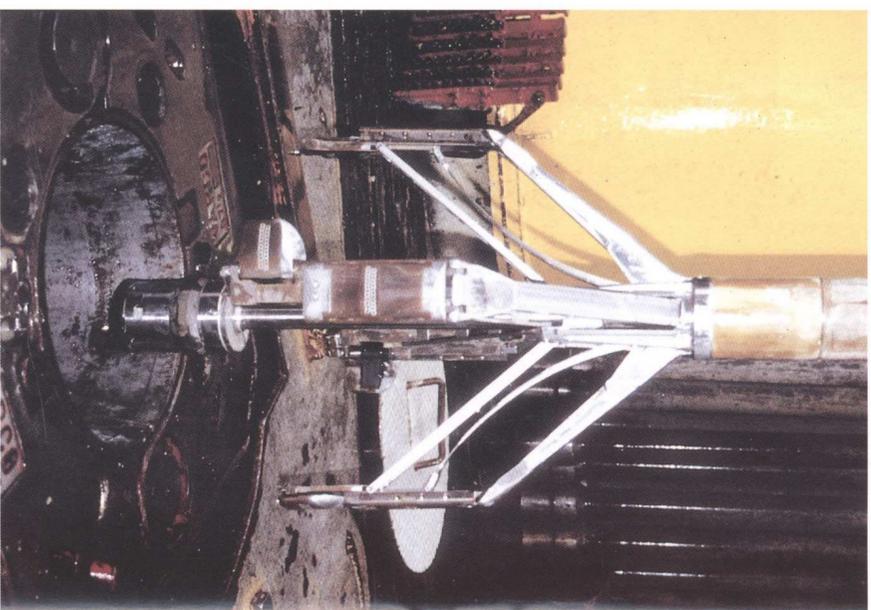


Dieses Gemisch ist flüssig, solange gebohrt wird, und es erstarrt augenblicklich zu einem Gelee, sobald der Bohrer stillsteht. Dadurch bleiben Bohrmehl und Bohrklein in der Schwebe, wo sie sich gerade befinden. Würden sie absinken, könnten Teilchen, die aus unterschiedlichen Tiefen stammen, durcheinandergerten – ganz abgesehen davon, daß sich der Bohrstrang durch den Bodensatz festklebmen könnte. Vergleiche des von der Spülung angelieferten Materials mit den Kernen der Vorbohrung zeigten, daß die Bohrrümmen in regelmäßigen Strom und korrekter Reihenfolge oben ankamen.

Für diese Untersuchungen wurde die über Tage ange-lange Spülflüssigkeit über Schüttelsiebe geleitet und anschließend zentrifugiert, um nach dem zentimeter-bis millimetergroßen Bohrklein auch das feine Bohrmehl herauszuholen. Nach jedem Meter durchbohrten Gesteins wurde ein Teil des angekommenen Materials zur routinemäßigen

Untersuchung im Labor gewaschen, getrocknet und eventuell gemahlen. Ein Röntgenfluoreszenz-Spektrometer analysierte die staubfeinen und zu fünfmarkstückgroßen Tabletten gepreßten Proben vollautomatisch auf 20 Elemente, anschließend wurden die enthaltenen Minerale mit einem Röntgen-Pulverdiffraktometer bestimmt. Schon ein bis zwei Stunden nach der Ankunft der Gesteinsrümmen wußten die Forscher im Feldlabor, was der Bohrmeißel gerade zernahmt hatte.

Unersetzlich waren Bohrkern jedoch für die Geophysiker. Zwar ließ sich manche Untersuchung, etwa auf Dichte und Wärmeleitfähigkeit, Magnetismus und Radioaktivität, auch an mehrere Zentimeter großen Gesteinsstrümmern vornehmen, die beim Bohren in einen über dem Bohrmeißel eingestärkten „Fangkorb“ geschleudert wurden. Aber zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit, der Porosität, der Durchlässigkeit für Flüssigkeit und Gase sowie der Laufzeit von Schallwellen, die im Labor Erdbebenwellen ersetzen, taugten solche „Cuttings“ nicht. Auch zur Unter-



MESSUNGEN IM LOCH UND IM LABOR ERGÄNZTEN EINANDER

Um die Spannungen in unterschiedlichen Tiefen festzustellen, wurden Laborversuche und Bohrlochmessungen kombiniert. Beim »Relaxations-Experiment« erstelen Sensoren rund um einen Bohrkern, wie und vor allem in welche Richtung sich das Gestein entspannt. Ein ins Bohrloch hindogelassener »Televiewer« nahm die Strukturen der Bohrlochwand mit Ultraschall auf, ein »Formation Micro Imager« registrierte elektrische Widerstände. Die Aufnahmen ermöglichen die Rekonstruktion, wie der Kern im Gestein gesteckt hatte. Die Meßsonde wurde durch vier Spreizarme, die mit zahlreichen Sensoren bestückt sind, im Bohrloch zentriert

RESÜMEE DER WISSENSCHAFTLICHEN HÖHEPUNKTE

Die KTB-Forscher können auf ein sehr erfolgreiches Projekt zurück-schauen, denn die wissenschaftlichen Zielsetzungen des Bohrprogramms (siehe Seite 16) wurden erreicht. Unter den zahlreichen neuen Ergebnissen, manche völlig überraschend, ragen als Höhepunkte heraus:

- Die Natur seismischer Reflektoren im Grundgebirge konnte geklärt werden. Solche Zonen, an denen natürliche oder künstlich erzeugte Erdbebenwellen reflektiert werden, verraten den Geowissenschaftlern an der Erdoberfläche häufig Strukturen, die in der Tiefe im geschichteten Deckgebirge verborgen sind. Beim KTB wurden markante Reflektoren im Grundgebirge durchtauft, und es zeigte sich, daß die im Deckgebirge gesammelten Erfahrungen auf diese Reflektoren nicht zu übertragen sind. Die Untersuchungen beim KTB machten es möglich, die Gebirgsstrukturen mit den seismischen Aufzeichnungen in allen Details zu vergleichen und so eine Basis für künftige Auswertungen im Grundgebirge zu liefern, das auf der Erde viel weiter verbreitet ist als Deckgebirge.
- Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ist zu einem wichtigen Verfahren zur Sondierung in der Tiefe geworden. Als Träger stark erhöhter Leitfähigkeit wurden Zonen mit reichlich Fluiden und Graphit identifiziert. Auch hier konnten

die Verfahren durch das KTB „geeeicht“ werden.

- Zum erstenmal konnten die Gebirgsspannungen in einem Profil von der Erdoberfläche bis in über 9000 Meter Tiefe gemessen werden. In diesem Zusammenhang ist es nach Abschluß der Bohrung beim Hydratrac/Seismik-Experiment (siehe Seite 26) gelungen, durch hohen Druck im Bohrloch über 400 Mikrobeben gezielt in neun Kilometer Tiefe zu erzeugen. Mikrobeben werden

häufig im Vorfeld starker Erdbeben beobachtet. Die beim KTB gewonnenen Aufzeichnungen bieten die Möglichkeit, die Entstehung von Mikroeben genau zu analysieren: Welche Mechanismen spielen dabei eine Rolle, und wie sind die Beben räumlich verteilt? Besonders wertvoll sind die Daten, weil die Beben im Loch der Vorbohrung registriert werden konnten – an der Erdoberfläche stören Einflüsse durch die natürliche und die von

Menschen verursachte Bodenunruhe.

- Zu den größten Überraschungen zählt die völlig unerwartete Permeabilität der Kruste. Wie der abschließende Fluid/Hydraulik-Test (siehe Seite 26) gezeigt hat, ist die Kruste bis zum tiefsten Teil des Bohrlochs nicht trocken und dicht, sondern porös und für Flüssigkeiten wie Gase permeabel. Daraus ergeben sich bedeutsame Konsequenzen für die Modellierung von Transportprozessen in der Kruste, aber auch für Betrachtungen über die Festigkeit der Tiefengesteine.

- Die Feststellung, daß die Temperatur in der durchbohrten Kruste schneller ansteigt, als nach den ausgiebigen Voruntersuchungen zu erwarten war, wirft die Frage auf, ob nicht mancherorts jenseits der untersuchten geringen Tiefen weitaus mehr Erdwärme zur Nutzung zur Verfügung steht, als bislang bekannt ist.

Eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Ergebnisse wird in einem 1996 erscheinenden Sonderband der internationalen Fachzeitschrift Geophysical Research veröffentlicht.



Künstliche Minibebeben zur Tiefensondierung: Mit Hilfe einer Kolonne von rühelnden Spezialwagen wurde die Erdkruste wohllosiert in Schwingung versetzt



suchung der Festigkeit, bei der ein Gesteinszylinder so lange gepreßt wird, bis er bricht, bedurfte es jeweils eines Kerns.

Unabhängigbar war zudem ein Bohrkern beim „Relaxations-Experiment“. Vom Druck in der Tiefe entlastet, entspannt sich das Gestein und dehnt sich dabei am stärksten in der Richtung aus, in der es zuvor dem höchsten Druck ausgesetzt war. Das maßen in einer Klimakammer Taströhler, die rund um ein etwa 15 Zentimeter langes Stück eines frisch geförderten Bohrkerns angebracht wurden. Bei 6000facher Verstärkung war auch zu hören, wie sich die Bohrkern in unregelmäßigen Knattem entspannten – um insgesamt maximal 0,2 bis 0,3 Millimeter.



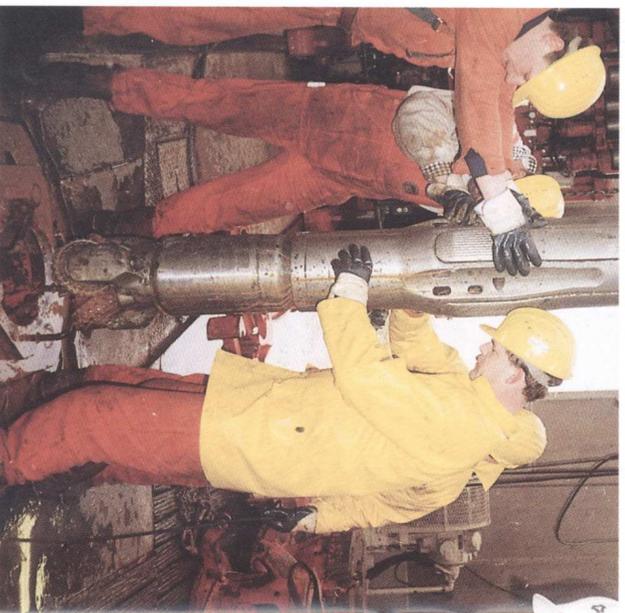
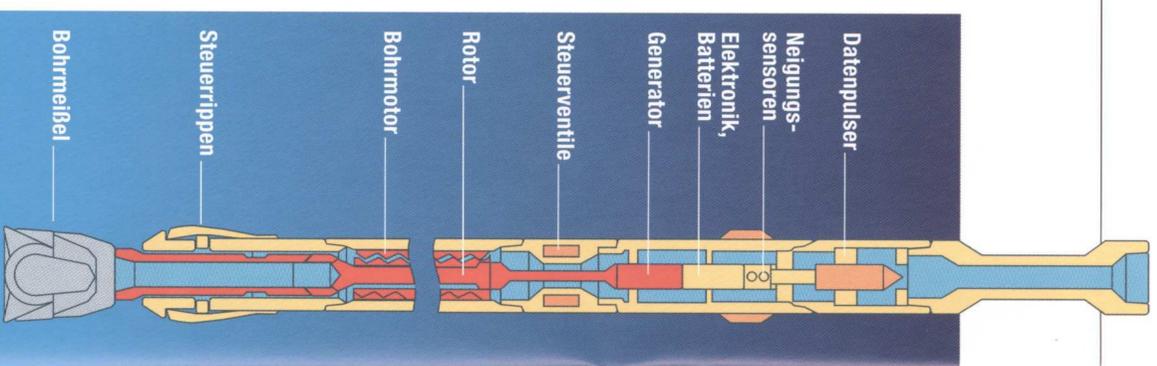
Nach jeweils fünf bis zehn Tagen war der Fall klar – hinsichtlich des isolierten Bohrkerns. Auf die Spannungen im Gesteinsverband, auf die es letztlich ankam, konnten die Forscher jedoch erst schließen, wenn sie wußten, wie das ausgebohrte Stück im Loch gesteckt hatte. Um das festzustellen, wurde ein „Televiewer“ hinabgelassen, ein mit Kompaß ausgestattetes Gerät, das die Strukturen in der Bohrwand mit Ultraschall aufnahm. Ein zweites, „Formation Micro Imager“ genanntes Meßinstrument registrierte elektrische Widerstände rundum in den Gesteinen der Bohrwand. Das Relaxations-Experiment hat wesentlich dazu beigetragen, die Spannungen im Fels erstmals bis in große Tiefen zu messen.

In regelmäßigem Rhythmus abgezapfte Proben der Spülflüssigkeit wurden in einem Atom-Emissionspektrometer bei 6000 bis 8000 Grad verdampft. Dadurch verrieten sich die in der Flüssigkeit enthaltenen Elemente durch ihre Spektrallinien. Vollautomatisch identifizierte das Spektrometer die einzelnen Stoffe und maß auch gleich ihre Menge. Weitere Proben wurden laufend für Gas-Analysen abgezweigt. Alle drei Minuten untersuchten ein Gas-Massenspektrometer und ein Gas-Chromatograph die Spülflüssigkeit auf ein Dutzend Gase. Am häufigsten vertreten waren Stickstoff, Methan und Helium.

Daß die Spülflüssigkeit nach der Rückkehr aus dem Bohrloch zeitweise reichlich Fluide und Gase enthält,

SENKRECHT GEBOHRT WIE NIE ZUVOR

Ein neues Vertikalbohrsystem, das im untersten Teil des Bohrstrangs (Zeichnung rechts) untergebracht war, sorgte dafür, daß die Bohrung senkrecht in die Tiefe führte. Das System maß laufend die Neigung und Aktivwerte bei einer Abweichung eine von vier Steuertrippen (auf dem Foto oberhalb der Bildmitte), die dann gegen die Bohrwand drückte und dadurch eine Korrektur bewirkte. Das »senkrechteste« Bohrloch der Welt wich von der Geraden erst in 7500 Meter Tiefe ab (Zeichnung links), als das System wegen hoher Temperatur und hohen Drucks nicht mehr eingesetzt werden konnte



die in der Tiefe zugeströmt waren, überraschte die KTB-Forscher schon bei der Vorbohrung. Gewiß, ohne Fluide waren grundlegende Prozesse in der Erdkruste nicht vorstellbar: so der Transport von Stoffen und auch von Wärme, die chemischen und mineralischen Veränderungen in den Gesteinen, die Anreicherung von Metallen sowie die Bildung vieler Erzlagerstätten. Doch die Geowissenschaftler hatten nur mit sehr geringen Mengen Flüssigkeit in winzigen Poren gerechnet.

Die Sensation war daher perfekt, als in 3200 Meter Tiefe bis über einen Zentimeter weite Spalten angeschnitten wurden, die mit Fluiden gefüllt waren. Beim weiteren Vorstoß in die Tiefe passierte der Bohrer Klüfte, aus denen sich schier unerschöpfliche Mengen an Fluiden ergossen. Unmittelbar nach Abschluß der Vorbohrung wurden 75 000 Liter, zweieinhalb Jahre darauf noch einmal 460 000 Liter Salzlösung und dazu jeweils große Mengen Gase aus dem Bohrloch tiefsten gepumpt.

Überraschend war auch, was die Gesteine aus der Tiefe offenbarten. Daß es dieselben wie an der Oberfläche waren, entsprach zunächst den Erwartungen. Zwei Gruppen von Metamorphiten unterschiedlicher Herkunft wechselten miteinander ab: helle „Paragneise“, die durch Umwandlung von quarzreichen Sandsteinen entstanden, und dunkle „Metabasite“, die aus Basalt oder chemisch ähnlichen magmatischen Gesteinen gebildet wurden. In gut 3000 Meter Tiefe jedoch, etwa dort, wo die ersten Fluide aus den Klüften quollen, sollte nach den Vorerkundungen diese geologische Einheit enden, sollte unter der „Zone von Erbdendorf-Vohenstrauß“ etwas anderes kommen.

Seismische Untersuchungen hatten nämlich in dieser Tiefe einen flach liegenden „Reflektor“ offenbart, einen Horizont, an dem künstlich erzeugte Erdbebenwellen bevorzugt zurückgeworfen werden. Aber das Wechselspiel von Paragneisen und Metabasiten ging weiter. Der Reflektor war offensichtlich nicht das, wofür ihn die Geologen gehalten hatten – keine Grenze zwischen großen geologischen Einheiten.

Eine dritte Überraschung: Es war heißer als erwartet im Loch. Auf ein Stück relativ kühler Kruste war es den KTB-Forschern bei der Auswahl ihrer Bohrlokation besonders angekommen, und sie hatten diesem Punkt bei der Vorerkundung besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Um den Temperaturanstieg mit der Tiefe und den Wärmefluß zu ermitteln, hatten sie mehrere bis 500 Meter tiefe Bohrungen niedergebracht und waren zu einem vielversprechenden Ergebnis gekommen: eine Temperaturzunahme von nur 21 Grad pro Kilometer. Im weltweiten Durchschnitt sind es 30 Grad pro Kilometer.

Relativ kühl war die Kruste jedoch nur bis in 1000 Meter Tiefe. Von da an nahm die Temperatur unerwartet rasch zu. Mit 29 Grad pro Kilometer kam der Anstieg dem globalen Mittel nahe. In 4000 Meter Tiefe herrschten schon 118 statt der maximal für möglich gehaltenen 100 Grad.

Im Oktober 1990 wurde nur 200 Meter von der Vorbohrung entfernt mit der Hauptbohrung begonnen. Was jetzt benötigt wurde, gab es nirgendwo fertig zu kaufen oder zu mieten. Ein von drei deutschen Unternehmen gegründetes Konsortium, die Ultratief-Bohrgesellschaft, konzipierte die größte und modernste Anlage für Bohrungen an Land mit einem 83 Meter hohen Turm.

Der Turm wurde so hoch gebaut, um Zeit zu sparen. Bei jedem Wechsel des Bohrmeißels – nach jeweils 60 bis 80 Metern Bohrstrecke – mußte das Gestein vollständig aus dem Loch gezogen, dazu auseinandergenommen und im Turm abgestellt werden. Der hohe Turm erlaubte es, immer drei Rohre von jeweils 13,3 Meter Länge in einem „Zug“ abzustellen.

Dabei trat erstmals der „Pipehandler“ in Aktion, ein neues System, das in der Lage war, die Rohre (englisch: pipes) automatisch zu handhaben (handle), die 40-Meter-Züge jeweils an den vorbestimmten Platz im Turm zu stellen und von dort auch wieder abzuholen. Zuarbeit leistete, von der Drillerkabine kontrolliert, „Iron Roughneck“, der Eisernen Bohrarbeiter. Der rot angestrichene Roboter glitt auf Schienen heran, sobald es etwas auseinander- oder zusammenzuschrauben gab.

Menschliche Hilfe war auf der Arbeitsblühne gefragt, wenn die „Schwerstangen“ im unteren Teil des Bohrstrangs ans Licht kamen. Diese Rohre waren viel dicker und schwerer als die anderen und bewirkten den nötigen Andruck zum Bohren. Im untersten Teil des Stranges waren Generator und Motor, Steuerteil und vielerlei anderes High-Tech-Gerät untergebracht, und am Ende saß der Bohrmeißel oder – wenn ein Kern gewonnen werden sollte – eine Bohrkronen.

Von Meißeln und Kronen waren unterschiedliche Kaliber und Typen im Einsatz. Der Durchmesser der Hauptbohrung ist ganz unterschiedlich. Auf den obersten 290 Metern wurde das Loch 71,1 Zentimeter (28 Zoll) weit gebohrt und hat nach der Verrohrung noch



Zum Gruppenbild mit Fohne stellte sich eine KTB-Bohrmannschaft am 24. Juli 1993 auf, als bei 8008,6 Metern der bis dahin gültige deutsche Rekord – erreicht mit der Bohrung Mirow 1 in Mecklenburg – eingestellt wurde

einen Durchmesser von 62,2 Zentimetern (24 1/2 Zoll). Mit der Tiefe verjüngt es sich teleskopartig. Im Bohrlochtiefsten mißt es nur noch 16,5 Zentimeter.

Neben Rollenbohrmeißeln, bei denen mehrere mit Wärsen aus Hartmetall besetzte Stahlkegel gegeneinander rotieren, drehen sich speziell angefertigte Diamantbohrkronen im Loch. Diese Kronen sehen aus wie zinnenbewehrte Türme einer Spielzeugburg. Mit den Zinnen voran, die Diamantsplitter enthalten, fressen sie sich ins Gestein. Nutzt sich das Hartmetall der Zinnen mit der Zeit ab, brechen die Diamanten heraus, doch gleichzeitig treten neue hervor – diese Bohrkronen schärfen sich selbst. Während sie sich ringförmig in den äußeren Bereich des Bohrlochs einfäsen, bleibt in der Mitte eine Gesteinsäule stehen, die schließlich abgebrochen und mit dem Gestein emporgelievt wird. Mit Diamantbohrkronen wurden bei der Hauptbohrung bislang einmalige Grobkörner gezogen, wahre Jumbos mit 23,4 statt der üblichen 10 Zentimeter Durchmesser.

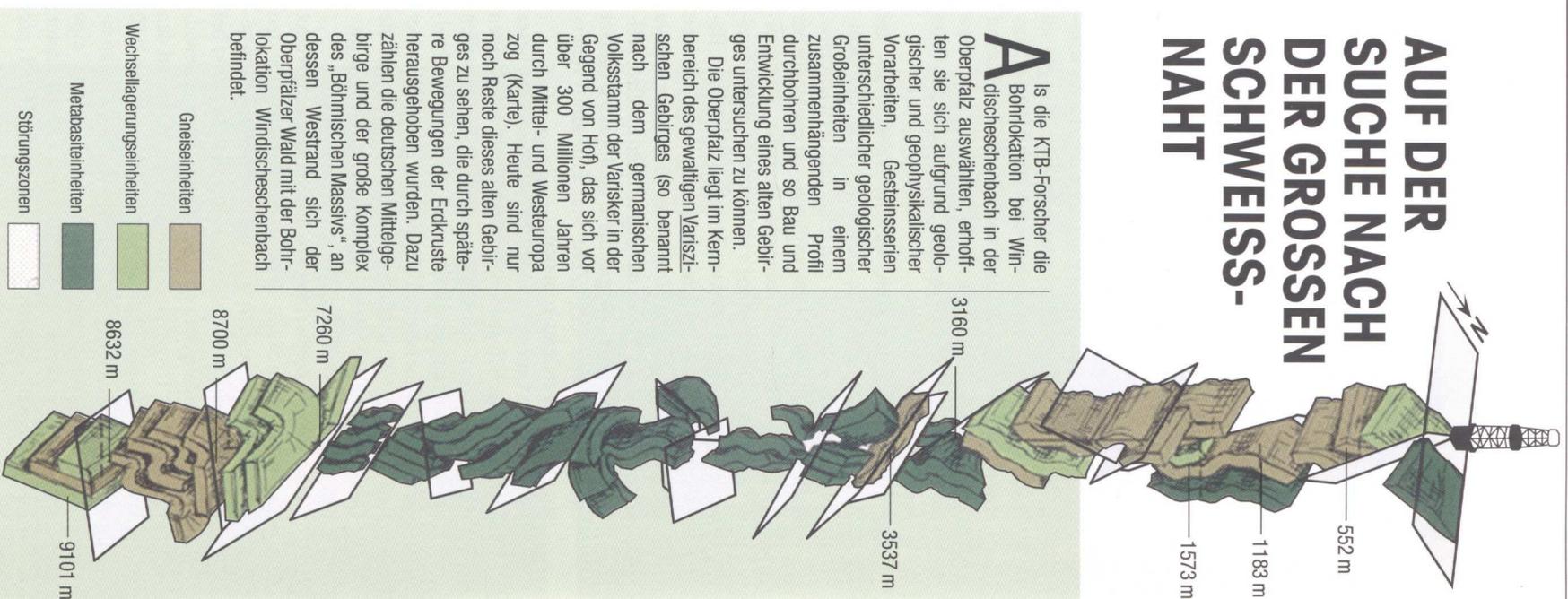
Um auf geradem Wege in die Tiefe zu gelangen, wurde fürs KTB ein selbsttätig steuerndes System entwickelt, das den Bohrer automatisch in der Senkrechten hielt. Bei diesem Vertikalbohrsystem messen Sensoren laufend die Neigung des Meißels im Loch. Bei Abweichungen von der Senkrechten aktiviert eine Steuerungselektronik über magnetische Ventile eine von vier seitlich angebrachten Steuerrippen. Hydraulisch angetrieben, fährt die Rippe in Richtung Bohrlochwand aus und bewirkt so eine Korrektur.

Bis in 7500 Meter Tiefe hat das Bohrloch die Vertikale kaum verfehlt – eine bislang einmalige bohrtechnische Leistung. Dann jedoch zwangen die hohe Temperatur und Probleme mit der Bohrloch-Stabilität zur Aufgabe des Verfahrens, und der Bohrer ging seinen eigenen Weg. Am Ende, in 9101 Meter Tiefe, war das Loch rund 300 Meter in nordöstliche Richtung abgewichen.

Nicht daß der Vorstoß in die Übertiefe bis zur Aufgabe des Vertikalbohrsystems ein Spaziergang gewesen wäre. Nachdem die 4000 Meter der Vorbohrung zügig durchgeföhrt worden waren und es auch bei der Hauptbohrung lange Zeit keine größeren Behinderungen gegeben hatte, traten in 6760 Meter Tiefe zum erstmaligen ernsthafte Schwierigkeiten auf. Sie begannen damit, daß der Bohrer steckenblieb. Meist kommt in solchen Fällen das Gestein nach vorsichtigem Manövrieren wieder frei. Diesmal war jedoch nichts zu machen. Nachgebrochenes Gestein hielt die untersten zwölf Meter des Bohrstrangs fest.

Da half nur ein radikales Mittel: KTB-Experten ließen an einem Kabel im Gestein eine Sprengladung hinab und trennten den festgeklemmten Teil ab. Nun hatte man einen „Fisch“ im Loch, wie Fachleute etwas

AUF DER SUCHE NACH DER GROSSEN SCHWEISS-NAHT



Is die KTB-Forscher die Bohrlokation bei Windischeschenbach in der Oberpfalz auswählten, erhofften sie sich aufgrund geologischer und geophysikalischer Vorarbeiten, Gesteinsserien unterschiedlicher geologischer Großeinheiten in einem zusammenhängenden Profil durchbohren und so Bau und Entwicklung eines alten Gebirges untersuchen zu können.

Die Oberpfalz liegt im Kernbereich des gewaltigen Variszischen Gebirges (so benannt nach dem germanischen Volksstamm der Varisker in der Gegend von Hof), das sich vor über 300 Millionen Jahren durch Mittel- und Westeuropa zog (Karte). Heute sind nur noch Reste dieses alten Gebirges zu sehen, die durch spätere Bewegungen der Erdkruste herausgehoben wurden. Dazu zählen die deutschen Mittelgebirge und der große Komplex des „Böhmischen Massivs“, an dessen Westrand sich der Oberpfälzer Wald mit der Bohrlokation Windischeschenbach befindet.

nennen, das nicht ins Bohrloch gehört. Bis zu einem günstigen Ansatzpunkt für einen Neubeginn wurde das Bohrloch mit Beton verfüllt – 75 Meter hoch. Die neue Bohrung sollte zwei Meter am Fisch vorbeiföhren, aber der Strang verkeilte sich wiederum durch nachgebrochenes Gestein, und diesmal war der abgesprengte Fisch 34 Meter lang. Der Bohrer wurde 300 Meter über der bereits erreichten Tiefe neu angesetzt.

Die Reise in die Unterwelt geriet mehr und mehr zum bohrtechnischen Abenteuer. Das Bohrloch stabil zu halten entwickelte sich zum Schlüsselproblem. Massive

Schon seit Beginn dieses Jahrhunderts wird das Variszische Gebirge in drei gürtelförmige Einheiten unterschiedlichen Charakters eingeteilt: Rhenoherynikum (nach Rhein und Harz benannt), Saxothuringikum (nach Sachsen und Thüringen) sowie Moldanubikum (nach Moldau und Donau). Wie in jüngerer Zeit die Alpen entstand das Variszische Gebirge durch die Kollision von Lithosphären-Platten, die miteinander verschweißt wurden.

Nach den Voruntersuchungen, insbesondere der seismischen „Durchleuchtung“, sollte bei Windischeschenbach die Grenze zwischen Saxothuringikum und Moldanubikum in relativ geringer Tiefe verlaufen, überdeckt von einer dritten Einheit, der „Zone von Erben-dorf-Vohenstrauß“ (ZEV). Diese ZEV deuteten die Geologen als Überbleibsel einer bei der Gebirgsbildung von Südosten her überschobenen Gesteinsdecke. Der Deckenrest sollte

bohrtechnische Probleme gab es von 7100 bis 7300 Metern in einer Störungszone mit stark zerrümpertem Gestein. Das Bohrloch erweiterte sich stellenweise auf fast einen Meter, während sich unterhalb von 7500 Metern das Gestein in das Bohrloch hineinschob, so daß die Bohrmannschaften Mühe hatten, nach einem Wechsel des Meißels den Strang wieder auf die Sohle des Bohrlochs zu bringen. Nachdem 8300 Meter Tiefe bereits überschritten waren, mußten wegen wieder festgeklemmten Gestein的角度 800 Meter Bohrloch aufgegeben und noch einmal gebohrt werden. Angesichts dieser

gut drei Kilometer mächtig und schüsselförmig in das Grenzgebiet eingetaucht sein (Blockbild).

In zehn bis elf Kilometer Tiefe war durch seismische Untersuchungen ein rätselhafter Bereich festgestellt worden, der in der Kruste geschickte Schallwellen teils stark reflektierte, teils mit relativ hohen Geschwindigkeiten leitete, der sogenannte Erben-dorfkörper. Somit schienen sich die Gelegenheit zu bieten, mit einer einzigen Bohrung die verschobene ZEV-Scholle zu durchleuchten, die Nahtstelle darunter zu studieren und das Geheimnis des Erben-dorfkörpers zu ergründen.

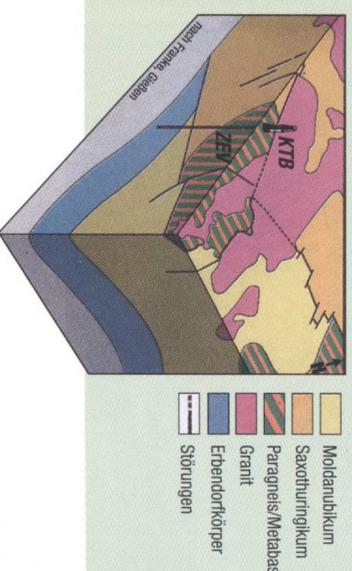
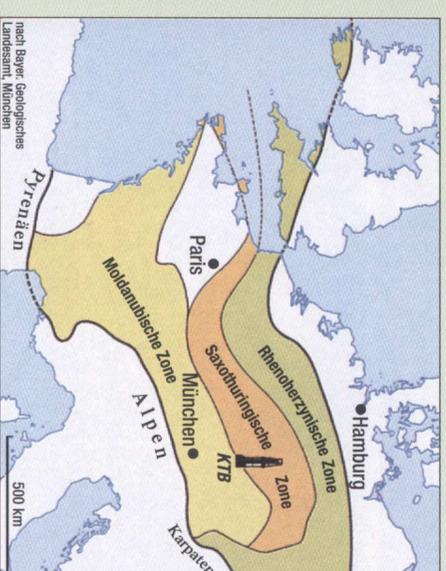
Tatsächlich besteht das erbohrte Profil von oben bis unten aus einer Wechsellagerung von Gneisen und Metabasiten, die zur ZEV gehören. Die Gesteinsfolge ist steilgestellt und gefaltet und wird von zahlreichen Störungen zerschnitten (Profil). Die Entwicklungsgeschichte dieser rund 500 Millionen Jahre alten Gesteine konnte im wesentlichen geklärt werden.

Danach bildeten sie sich im früheren Erdaltertum in einem Ozeanbecken, das sich zwischen kontinentalen Platten teilen entwickelte. Zeitweise unter die südlich gelegenen Kontinente bis 40 Kilometer tief versenkt und metamorph

umgewandelt, kamen sie durch mehrere Etappen tektonischer Vorgänge wieder in die Nähe der Oberfläche, ehe sie vor rund 320 Millionen Jahren mit den umgebenden Einheiten des Saxothuringikums und des Moldanubikums sowie einer weiteren Einheit, des Böhmikums, zum Variszischen Gebirge zusammengeschoben und verschweißt wurden.

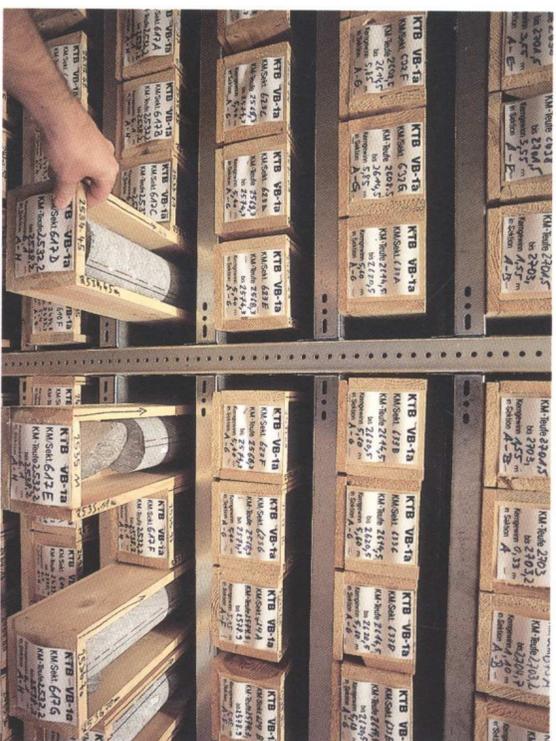
Dem rätselhaften Erben-dorfkörper konnten die Forscher mit ihren Meßgeräten immerhin sehr nahe rücken. Das ganze erbohrte Profil bot reichlich Gelegenheit zu untersuchen, was hinter den von der Erdoberfläche aus gewonnenen geophysikalischen Daten aus dem Grundgebirge wirklich steckt.

Aber auch das beim KTB festgestellte Ausmaß jüngerer tektonischer Prozesse, die bis in die Erdneuzeit reichen, ist bemerkenswert. Teile des Gebirges am Westrand des Böhmischen Massivs wurden mehr als drei Kilometer herausgehoben und auf angrenzende Gebirgsteile aufgeschoben. Die bedeutendste dieser Aufschubungsbahnen wurde in rund sieben Kilometer Tiefe durchbohrt und steht nun Geologen, Mineralogen und Geophysikern als verheißungsvolles Forschungsobjekt zur Verfügung.



Schwierigkeiten trifft es sich eigentlich gut, daß die Temperatur schneller als zunächst erwartet zugenommen hat und am Ende mit rund 270 Grad im angestrebten Bereich liegt.

Immerhin gelang es KTB-Forschern und -Ingenieuren, das Bohrloch bis in 9080 Meter Tiefe mit Meßsonden zu untersuchen. Und einige Wochen darauf wurden drei große, seit langem vorgeplante Experimente zu vollen Erfolgen. Dabei ging es um elektrisch



Im Zentralmagazin des Feldlabors waren die Bohrkern in riesigen Regalen untergebracht. Inzwischen unquartiert, stehen sie Forstern in einem Kernlager in Wackerndorf zur Verfügung

leitende Rutschbahnen in der Erdkruste, noch einmal um Fluide und schließlich um den Spannungszustand in der Tiefe.

Beim geoelektrischen „Dipol-Dipol-Experiment“ wurden aus Entfernungen bis zu 40 Kilometern elektrische Impulse in den Untergrund geschickt. Eine eigens entwickelte hitzebeständige Sonde wurde ins Bohrloch gesenkt, um zu registrieren, was von den Impulsen unten ankam. Aus diesen Daten und den Aufzeichnungen von 33 Meßpunkten an der Erdoberfläche erzielten die Wissenschaftler ein dreidimensionales Abbild elektrisch gut leitender Zonen in der Umgebung der Bohrlochs.

Hintergrund des Experiments war der Wunsch, Genaueres über die Dynamik von Bewegungen in der Erdkruste zu erfahren. Gesteinsblöcke innerhalb der Kruste gleiten auf Flächen, gleichsam auf Rutschbahnen, um Spannungen auszugleichen, die durch die Bewegungen der Platten entstehen. Solche Rutschbahnen wurden beim KTB durchbohrt, und die Forscher entdeckten, daß das dort zerklüftete Gestein mit Graphit bedeckt ist, sondern auch ein guter elektrischer Leiter.

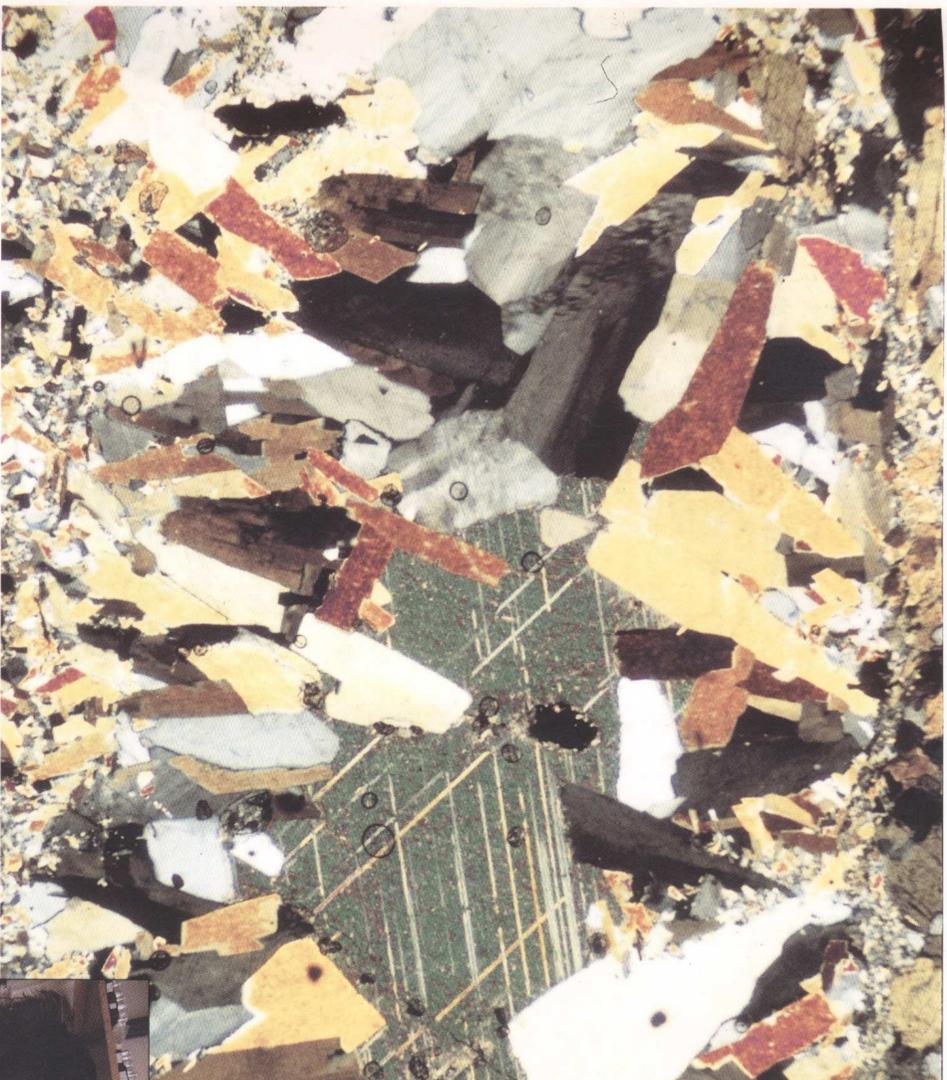
Das KTB-Bohrloch bot somit eine gute Möglichkeit, geoelektrische Verfahren zu eichen, mit denen solche Leiter – und damit Rutschbahnen – künftig von der Erdoberfläche aus geortet werden können. Detailliert untersucht wurde bei diesem Experiment auch ein elektrischer Leiter in etwa zehn Kilometer Tiefe, der weltweit aus geophysikalischen Tiefensondierungen abgeleitet worden war.

Den Fluiden hatten die KTB-Forscher schon die ganze Zeit über große Aufmerksamkeit gewidmet. Beim abschließenden „Fluid/Hydraulik-Test“ galt es nun, noch einmal eine umfassende Untersuchung im Bohrlochtiefsen vorzunehmen. Die untersten 70 Meter des Bohrlochs, die nicht verrohrt sind, wurden vom übrigen Teil isoliert und einem Unterdruck bis 398 bar ausgesetzt. Dadurch konnten 4,9 Kubikmeter Flüssigkeit aus dem Gestein gesogen werden. Dieses Ergebnis und andere Messungen bei diesem Test lieferten wichtige Aufschlüsse über die „Hydraulik“ in der Kruste. Von besonderer Bedeutung ist der Nachweis, daß bis in die tiefere Kruste Systeme von Rissen existieren, die für Fluide durchlässig sind.

Geradezu als Schlüsselexperiment galt die dritte Abschlussuntersuchung: das „Integrierte Hydratrac/Seismik-Experiment“. Eine ins Bohrloch gepumpte Schwerelösung wurde so lange unter Druck gesetzt, bis das umgebende Gestein anfang aufzubrechen. Im Bohrloch untergebrachte Druck- und Temperaturmeßgeräte zeichneten präzise auf, was beim „Frac“ vor sich ging. Gleichzeitig registrierten empfindliche Geophone an der Erdoberfläche sowie in der benachbarten Vorbohrung die ausgelösten Erschütterungen, von denen einige auch noch in Passau und Leipzig aufgezeichnet wurden. Über 400 solcher für Menschen nicht spürbaren Minibebeben nahm das in die Vorbohrung abgesenkte Geophon auf.

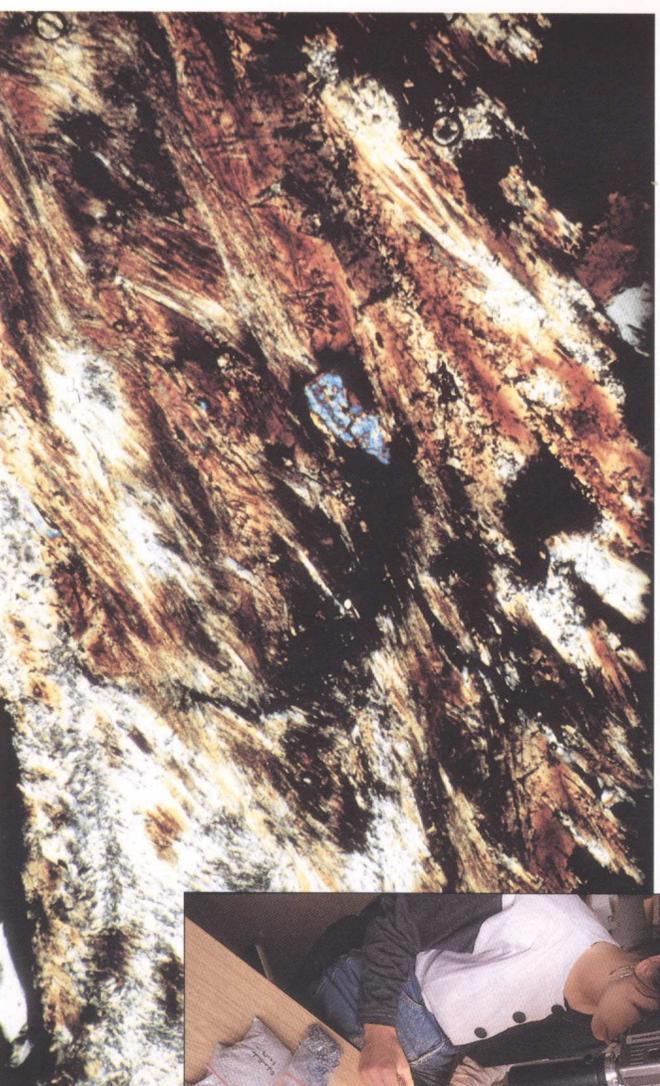
Mit diesen und vorhergehenden ähnlichen Experimenten sowie den Relaxationsversuchen wurde zum erstenmal ein Profil des Spannungszustandes in der Erdkruste bis in über 9000 Meter Tiefe gewonnen. Die Forscher stellten fest, daß der Hauptdruck in einem weitgehend konstanten Spannungsfeld über das ganze Profil hinweg aus annähernd südlicher Richtung kommt – Afrika läßt grüßen. Seit Jahrmillionen treiben Kräfte im Erdinnern die Eurasische und die Afrikanische Platte gegeneinander. Dabei wurden die Alpen aufgeworfen, aber der Druck wirkt sich auch im mitteleuropäischen Untergrund noch immer aus.

Die Herde der beim Hydratrac/Seismik-Experiment ausgelösten Minibebeben markieren Rißflächen, die auch schon beim Fluid/Hydraulik-Test nachgewiesen werden konnten. Die noch laufende Auswertung verspricht zudem Erkenntnisse über die Mechanismen bei der Ent-



BUNT ENTHÜLLTE SICH DAS SCHICKSAL DER GESTEINE

Durch eine mikroskopische Untersuchung des Bohrkerns, das von der Spülung lautend angeliefert wurde, konnte schnell festgestellt werden, welche Art von Gesteinen gerade durchbohrt worden waren. Für eingehende Studien über die Umwandlungen der Gesteine wurden Dünnschliffe angefertigt und in polarisiertem Licht betrachtet. Dadurch kam Farbe ins Bild, und die einzelnen Minerale hoben sich deutlicher voneinander ab. Auf dem oberen Foto ragen in einem Metabasit »Klufminerale« wie Zähe in einen früheren Hohlraum, der schließlich mit Kalkspat ausgefüllt wurde. Die Aufnahme unten zeigt einen Gneis mit den Mineralen Sillimanit (weiß), Biotit (braun), Pyrit (schwarz) und Chlorit (blau)



Vom KTB zum internationalen Bohrprogramm

Als noch niemand daran dachte, im Meer zu bohren, wurde an Land schon längst nach verborgenen Bodenschätzen sondiert: nach Erdöl und Salz, Kohle und Erzen. Auf der Suche nach Rohstoffen wurden seit dem vergangenen Jahrhundert weltweit Hunderttausende von Bohrungen niedergebracht. Durch die Stiche in die kontinentale Kruste erweiterte sich unser Bild der Erde ungemain. Geologie wurde zunächst ganz überwiegend an Land betrieben.

Die Situation änderte sich in den sechziger Jahren, als amerikanische Forscher ein Programm wissenschaftlicher Bohrungen in der Tiefsee starteten. Im Rahmen des Deep Sea Drilling Project und des ihm nachfolgenden Ocean Drilling Program wurde der Untergrund der Ozeane bald mit breiter internationaler Beteiligung erforscht, und die Meeresgeologen konnten mit spektakulären Entdeckungen aufwarten.

Auf den Kontinenten aber sind bis heute weite Teile von Bohrungen fast oder gänzlich unberührt geblieben. Wo nämlich keine Rohstoffe lockten, war die Neigung gering, Geld für einen Vorstoß in die Tiefe aufzubringen. Forschungsbohrungen wie beim KTB blieben die große Ausnahme.

Das ist eigentlich erstaunlich. Schließlich ist die Menschheit mehr denn je darauf angewiesen zu verstehen, wie der Planet Erde funktioniert, den sie immer stärker in Anspruch nimmt. Die Kontinente haben die Hauptlast zu tragen. Die Nachfrage nach Rohstoffen, Energie und Wasser steigt ständig. Auf der anderen Seite nehmen die Umweltschäden dramatisch zu,

ter* Wissenschaft einerseits und Grundlagenforschung andererseits macht in diesem Fall besonders wenig Sinn, denn ohne mehr Wissen über die Grundlagen gibt es auf viele Fragen keine Antwort.

Viele Rätsel der Kruste aber sind nur durch Bohren zu lösen. Darauf wurde schon seit längerem auf wissenschaftlichen Konferenzen immer wieder hingewiesen. Jetzt



Zu den attraktiven Zielen für wissenschaftliche Bohrungen zählen die Alpen als relativ junge »Knaustschzone« aus der Kollision von Kontinenten. Mit den Linien über dem Gebirge wurde zu rekonstruieren versucht, was bereits der Erosion anheimgefallen ist

müssen. Für die KTB-Wissenschaftler hatte die Fehlinterpretation zur Folge, daß sie im ausgeklügelten platzierten Bohrloch an Stelle der erwarteten geologisch unterschiedlichen Einheiten völlig andere Verhältnisse antrafen (siehe Seite 24).

Mancherlei Fragen stellen sich angesichts der durch die Bohrung so drastisch korrigierten Einschätzung der Temperatur. Warum kommt der Wärmestrom nicht in einem Ausmaß oben an, das seiner Stärke in der Tiefe entspricht, warum gelangt er nur bis etwa 1000 Meter unter die Erdoberfläche? Führen Grundwässer mehr Wärme ab, als bislang bekannt ist? Oder spielen paläoklimatische Einflüsse eine Rolle – wirkt die Eiszeit nach? Im Hinblick auf die Diskussionen über umweltfreundliche Energie interessiert insbesondere die Frage, ob die nach Flachbohrungen für das tiefere Grundgebirge errechneten Wärmestromdichten prinzipiell zu niedrig liegen – ob nicht das Potential an geothermischer Energie weitaus höher ist als allgemein angenommen.

Viele Ergebnisse, viele Fragen. Zahlreiche Arbeitsgruppen sind noch mit der Auswertung der gewonnenen Daten beschäftigt. Das große Gesamtbild steht noch aus.

Unterdes hieß es Abschied nehmen in Windischeschenbach. Forscher und Ingenieure räumten das Feldlabor bis Ende 1995, um einem Energieunternehmen Platz zu machen. Die Einrichtung mitsamt allem wissenschaftlichen Gerät wurde nach Potsdam in das Geoforschungszentrum überführt, wo die Koordination für das internationale kontinentale Bohrprogramm vorbereitet wird. Die Bohrkern- und alle anderen Proben hat das Bayerische Geologische Landesamt in seine Obhut genommen: In einem Lager in Wackersdorf sind sie für die Forschung zugänglich.

Als Symbol des ehrgeizigen und erfolgreichen Projekts ragt noch der hohe Bohrturm über die hügelige Landschaft. Ein Abkommen mit dem Käufer des KTB-Geländes sichert Wissenschaftlern für ihre Experimente weiterhin den Zugang zu den Bohrlöchern. Und nach wie vor können sich Besucher, wie schon Hunderttausende vor ihnen, in einem Informationszentrum am Eingang des ehemaligen KTB-Geländes über die Ziele und geowissenschaftlichen Hintergründe der Forschungsbohrung, die technischen Herausforderungen und deren Bewältigung informieren.

Das Informationszentrum an der Tiefbohranlage ist täglich von 9 bis 16 Uhr geöffnet. Auskünfte erteilt das Presse- und Fremdenverkehrsamt der Stadt Windischeschenbach.

Telefon 09681-401 240



In regelmäßigen Zeitstrahlen wurden die Forscher zu »sampling parties« eingeladen, auf denen sie die gewonnenen Bohrkern begutachten und Proben für wissenschaftliche Untersuchungen bestellen konnten

EIN JAHR-MARKT DER GESTEINE

stehung von Erdbeben. Die Beben-Herde liegen häufig um zehn Kilometer und reichen bis in zwölf Kilometer Tiefe. Von da ab reagiert das Gestein offenbar schon derart plastisch, daß es unter starker Spannung nicht bricht, sondern sich verformt. Diffizile Untersuchungen an Quarzkristallen vom Grund des Bohrlochs sollen noch zeigen, ob es dort bereits Anzeichen für einen Übergang in den verformbaren Zustand gibt.

In allen Aufgabenbereichen des KTB wurden wesentliche neue Erkenntnisse gewonnen (siehe Seite 21). Herausragend ist die Neuinterpretation der seismischen Reflektoren im Grundgebirge. Diese zeigen im Umfeld des KTB nicht, wie zuvor angenommen, Grenzen zwischen geologischen Formationen, sondern Gesteinswechsel, Fluid-führende Horizonte und Störungszone innerhalb derselben Gebirgsseinheit an. Damit wird man in Zukunft auch anderswo im Grundgebirge rechnen

wurde. 250 Geowissenschaftler und Ingenieure aus 28 Ländern, einschließlich der Präsidenten der geowissenschaftlichen Spitzenorganisationen International Union of Geological Sciences und International Union of Geodesy and Geophysics, berieten über Schlüsselt Themen von globaler Bedeutung, die nur mit Hilfe von Bohrungen bearbeitet werden können. Als „World Geological Sites“ wurden Lokationen vorgeschlagen, an denen diese Fragestellungen exemplarisch zu studieren sind.

Die ins Auge gefassten Themen-Schwerpunkte sind vielfältig:

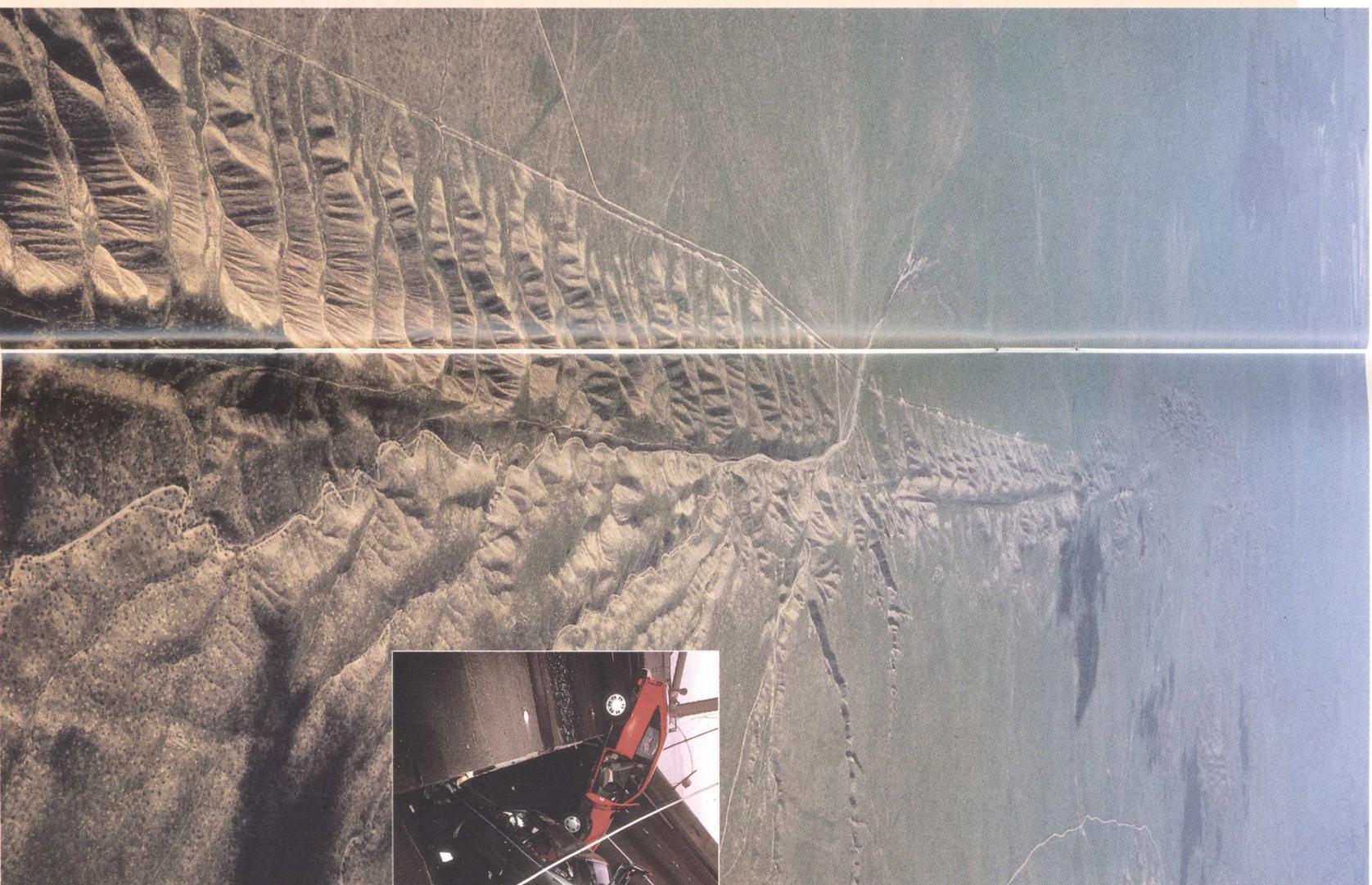
- die auf den Kontinenten sehr viel weiter als in den Ozeanen zurückreichende Erdgeschichte;
- die Entwicklung des Klimas in der Vergangenheit;
- die Entstehung von Erzlagerstätten;
- die Evolution von Sedimentbecken und die Voraussetzungen dafür, daß sich dort Erdöl- und Erdgasvorkommen bilden;
- die Dynamik innerhalb der Erdkruste und die Deformation der Gesteine;
- Vulkansysteme und die unterschiedliche Verteilung der Erdwärme;
- das Geschehen in den Erschütterungszonen der Erde, wo sich Lithosphären-Platten bebenauslösend aneinander reiben;
- die Struktur und die Entwicklung von Grundgebirgseinheiten;
- die Fluide in der Kruste;
- die Untersuchung der „tiefen Biosphäre“, einer mehrere Kilometer tiefen Krustenzone, in der noch Lebewesen vorkommen;
- Einschlagkrater auf der Erde und ihre Rolle bei Massenaussterben wie jenem, dem wohl die Dinosaurier zum Opfer fielen.

Die Bohrprojekte sollen im Rahmen eines International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) verfolgt werden, das multidisziplinär und eng mit anderen geowissenschaftlichen Aktivitäten abgestimmt ist. Vorgesehen ist, daß interessierte Länder jeweils bilaterale Verträge mit dem Geoforschungszentrum Potsdam abschließen, das zentrale Aufgaben bei der Organisation der einzelnen Projekte übernimmt und dafür einen Stab ehemaliger KTB-Mitarbeiter bereitstellt. Ein erster Vertrag wurde mit den USA paraphiert. China hat seine Teilnahme fest zugesagt. Die Verhandlungen mit Japan stehen kurz vor dem Abschluß. Weitere Länder haben lebhaftes Interesse signalisiert, so Frankreich, Griechenland, Mexiko, Rußland, Spanien, Südafrika.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt einschlägige Projekte deutscher Geowissenschaftler ab 1996 durch ein neues Schwerpunktprogramm KTB/ICDP. Zahlreiche Anträge wurden für Untersuchungen und Experimente im KTB-Tiefenlabor gestellt, das im Rahmen des ICDP auch Forschern anderer Länder zur Verfügung steht. Und natürlich geht es um neue internationale Vorhaben, von denen über ein Dutzend im Gespräch sind.

Die künftigen kontinentalen Bohrprojekte sollen nach dem Vorbild des KTB drei Phasen durchlaufen: eine detaillierte geologische Vorerkundung mit geophysikalischen Messungen von der Erdoberfläche aus, die aktive Bohrphase mit kontinuierlichen Messungen im Bohrloch sowie gezielter Entnahme von Kernen und eine anschließende Experimentierphase, in der die Bohrung als Tiefenlabor genutzt wird.

Weit fortgeschritten ist die Planung für ein amerikanisches Projekt, an dem sich auch deutsche



BOHREN, WO BEBEN GEBOREN WERDEN

Wie eine gewaltige Narbe zieht sich die San-Andreas-Verwerfung durch Kalifornien. Sie markiert eine durch ihre zahlreichen und schweren Erdbeben berüchtigte Bruchzone der Erde. Hier gleiten zwei der Platten, aus denen die äußere Hülle der Erde besteht, aneinander entlang.

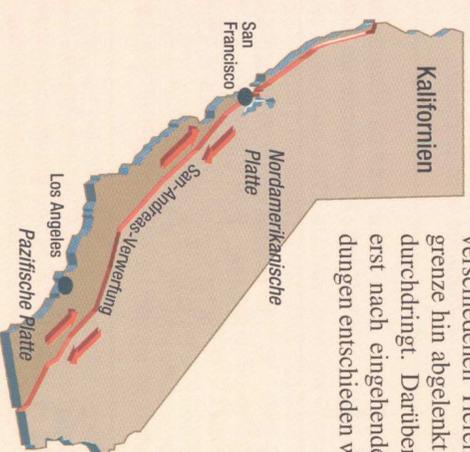


Forscher beteiligen wollen: eine Bohrung durch die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien. An dieser durch ihre Erdbeben berühmten Störungszone schrammen die Pazifische und die Nordamerikanische Platte über Hunderte von Kilometern aneinander entlang – die eine unterwegs nach Nordwest, die andere nach Südost. Ähnliche Verwerfungen gibt es auch in anderen Teilen der Erde.

Bei der geplanten Bohrung geht es um grundlegende Fragen zur Entstehung von Erdbeben, etwa:

- Warum verhalten sich die Platten in manchen Segmenten der Verwerfung, so daß sich grobe Spannungen aufbauen, während sich andere Segmente laufend durch langsames „Kriechen“ der Gesteine entspannen?
- Welche Faktoren kontrollieren Verschiebungen und Deformationsraten?
- Wie verteilt sich der Energiefluß innerhalb der Störungszone auf die Abstrahlung von Erdbebenwellen, auf Reibungsverluste und auf chemische Reaktionen?
- Welche Rolle spielen Fluide?

Antworten auf solche Fragen erhoffen sich die Geowissenschaftler von einer neben der Störungszone angesetzten Bohrung, die in verschiedenen Tiefen zur Plattengrenze hin abgeleitet wird und sie durchdringt. Darüber soll jedoch erst nach eingehenden Vorerkundungen entschieden werden.



1977

Die Senatskommission für geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) schlägt die Erkundung der kontinentalen Erdkruste durch eine übertiefe Bohrung vor.

1981

Das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), heute Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, finanziert erste Vorarbeiten für ein deutsches kontinentales Tiefbohrprojekt. Aus 30 Standortvorschlägen werden vier potentielle Standorte ausgewählt.

1985

Das BMFT beschließt die Förderung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KT B). Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung wird mit der Projektleitung beauftragt. Die DFG übernimmt die Koordination der wissenschaftlichen Arbeiten.

1986

Auf der Grundlage eines Volums von Geowissenschaftlern und Ingenieuren wird Windischeschenbach in der Oberpfalz als Standort für das KT B ausgewählt. Das BMFT gibt „grünes Licht“ für die Bohrarbeiten.

1987

Start der Vorbohrung mit neuer Bohrentechnik im September.

1989

Im April wird die Vorbohrung mit zum Teil sensationellen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen bei 4000,1 Meter Tiefe abgeschlossen. Ein Langzeit-Meß- und -Testprogramm im Bohrloch folgt. Aufgrund der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse genehmigt das BMFT die Hauptbohrung.

1990

Im Oktober beginnt die KT B-Hauptbohrung nach einer umfassenden Projektneubeurteilung. Sie soll bis 1994 einen Temperaturbereich von 250 bis 300 Grad erreichen, der bei etwa zehn Kilometer Tiefe erwartet wird. Über eine eventuelle Vertiefung soll später entschieden werden.

1993

Im August findet in Potsdam die International Conference on Scientific Continental Drilling statt. Ein Konzept für ein weltweit operierendes kontinentales Bohrprogramm wird erarbeitet.

1994

Im Oktober wird die Hauptbohrung in 9101 Meter Tiefe bei etwa 270 Grad beendet. Drei große Experimente im Bohrloch folgen.

1995

Die Bohranlage wird bis auf den Turm demontiert. Die Arbeiten im Feldlabor werden beendet, doch die intensive wissenschaftliche Auswertung an Forschungsinstituten geht weiter. Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung übergibt die beiden Bohrlöcher an das Geoforschungszentrum Potsdam. Das Gelände und die beiden Gebäude werden an das regionale Elektrizitätsversorgungsunternehmen verkauft.

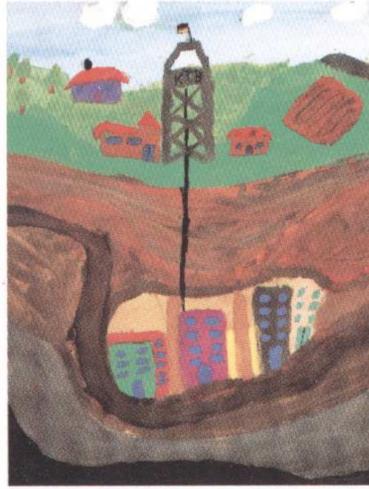
1996

Die Bohrlöcher werden für Experimente im Rahmen des KT B-Tiefenlabors genutzt. Die DFG beschließt ein neues Schwerpunktprogramm „KT B/ICDP“ (International Continental Scientific Drilling Program).

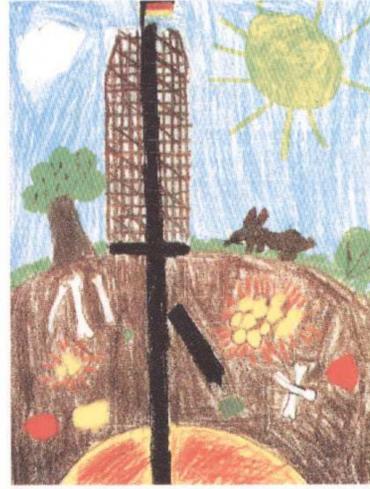
Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundesstags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für die Wahlen zum Europäischen Parlament. Mäßbrüchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



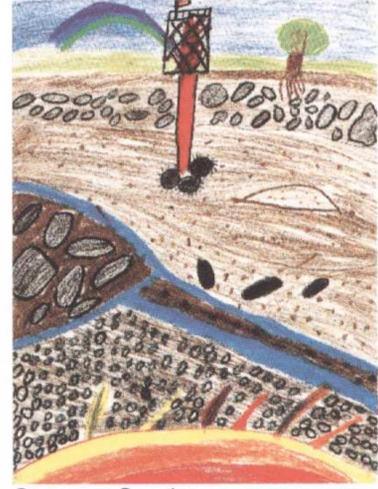
Robert Knott



Thomas Riebl



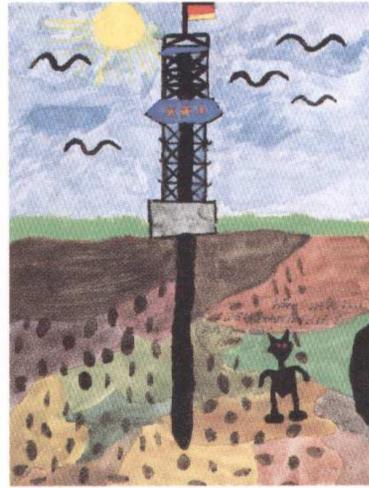
Carmen Mauerer



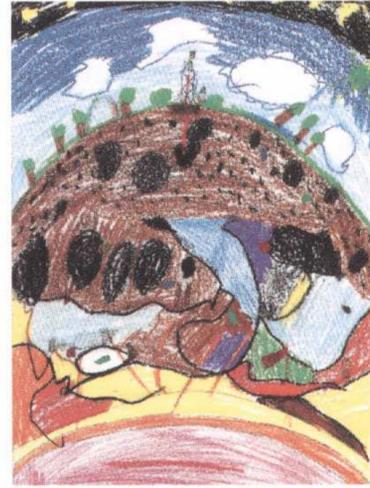
Susanne Sperber



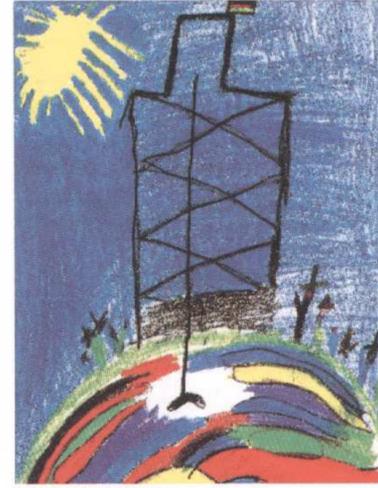
Martin Schieder



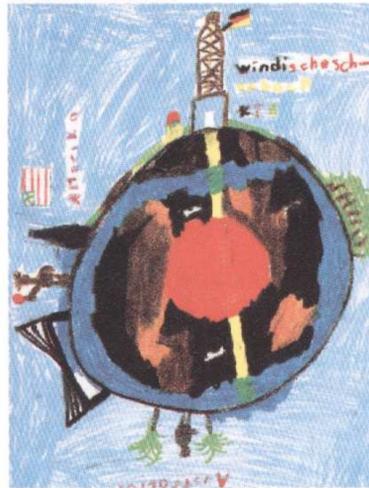
Silvia Bauer



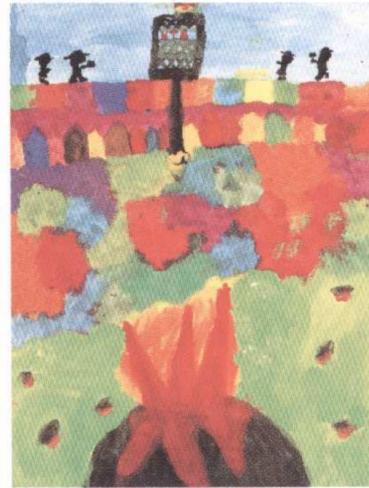
Alexander Giehl



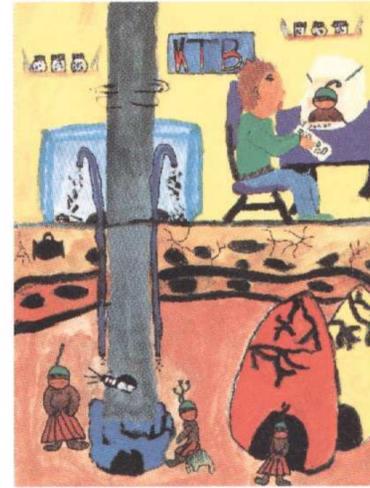
Melanie Lang



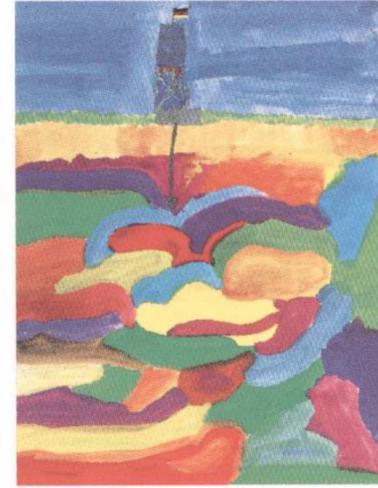
Michael Schmiegl



Monika Kunz



Marion Reis



Kerstin Zimmerer

»Wie Windischeschenbacher Schüler KTB sehen«: Unter diesem Titel veranstaltete die Projektleitung KTB zusammen mit der Volksschule der Stadt einen Malwettbewerb, an dem sich die Kinder mit viel Eifer und Phantasie beteiligten

Zeichnung auf der Titelseite: Christian Mayerhöfer