
C-4 Zusammenfassung und Bewertung

Zusammenfassung und Bewertung

Mit einer in insgesamt 1 468 Bohrtagen erreichten Endteufe von 9 101 m steht die KTB-HB nach der Bohrung Kola SG3 und zwei weiteren Bohrungen in den USA an vierter Stelle der weltweit tiefsten Bohrungen und ist mit weitem Abstand vor der Zistersdorf ÜT2a die tiefste Bohrung Mitteleuropas.

Wenn auch die Erzielung eines Teufenrekordes zu keiner Zeit eine Rolle in den Planungen für die KTB-HB gespielt hat, so gehört das Erreichen einer Teufe von mehr als 9 km, zusammen mit dem erreichten Temperaturniveau von 260-270 °C, doch zu den wichtigsten Leistungen der KTB-HB, da an die hiermit verknüpften Zustandsbedingungen und Prozesse eine Vielzahl der originären wissenschaftlichen Ziele des KTB gekoppelt waren [1]. Die in den tiefen Phasen zunehmenden und am Ende nahezu unüberwindbaren Schwierigkeiten mit der Bohrlochstabilität machten deutlich, daß die KTB-HB mit der erreichten Teufe bis in den Grenzbereich der bohrtechnischen Machbarkeit vorgestoßen ist.

Dieser Vorstoß in die Grenzbereiche derzeitiger Bohrtechnologie konnte nur durch ein sorgfältig geplantes Gesamtkonzept und die konsequente Ausschöpfung modernster Technik, aber auch der Bereitschaft, dort wo notwendig, auch innovative Wege zu beschreiten, gelingen. Dies wird durch eine ganze Reihe bohrtechnischer Leistungen verdeutlicht, die nicht nur wegen ihrer weltweiten Spitzenposition Maßstäbe gesetzt haben, sondern auch wegen ihres Einsatzpotentials in der konventionellen Tiefbohrtechnik zukünftige Bedeutung haben [9].

Zu den Bereichen, die in besonderer Weise zum Erreichen der erzielten Leistungen beigetragen haben, zählen:

- Basisstrategie mit dem Zwei-Bohrungskonzept

Die Realisierung der wissenschaftlichen Ziele im Rahmen eines dualen gestuften Konzeptes mit der KTB-Vorbohrung und der KTB-Hauptbohrung und einem jeder Bohrung zugeordneten klaren Aufgabenkatalog und der hiermit erreichten Risikoteilung, hat sich in vollem Umfang bewährt und hat mittlerweile auch für zukünftige wissenschaftliche Projekte auf internationaler Ebene Modellcharakter. So konnten nicht nur die wertvollen Erfahrungen der KTB-VB nutzbringend in der KTB-HB angewendet werden (s. a. Kap. B-4), sondern auch die Projektziele und die Organisationsstruktur dem verbesserten Kenntnisstand nach dem Abteufen der KTB-VB angepaßt werden.

- Bohr- und Verrohrungsstrategie

Die neben der Vertikalbohrstrategie wichtigste konzeptionelle Grundlage für das Erreichen der Endteufe war die Entscheidung, anstatt eines konventionellen Bohr- und Verrohrungsschemas, wie es bei Tiefbohrungen auf Erdöl und Erdgas Standard ist, ein spezielles Schema mit wesentlich geringeren Clearance-Verhältnissen (Slim Clearance Bohr- und Verrohrungsprogramm) zwischen Bohrlochwand und Verrohrung anzuwenden. Hierdurch konnte nicht nur eine erhebliche Einsparung an zu zerstörendem Gesteinsvolumen erreicht werden, sondern vor allem die notwendigen Reserven für Zwischenverrohrungen und die am Ende notwendigen Liner-Verrohrungen geschaffen werden, ohne die aus Bohrlochstabilitätsgründen festgelegte Begrenzung der offenen Bohrlochabschnitte auf maximal 3 km aufzugeben (s. a. Kap. C-1.2 und C-3.3).

Daß die KTB-HB trotz der Schwierigkeiten mit der Bohrlochstabilität erfolgreich mit einem 5 1/2"-Liner bis über 9 km verrohrt werden konnte, und somit die entscheidenden Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung der Abschlußexperimente mit der zukünftigen Befahrbarkeit für Meßsonden im Rahmen des Tiefenobservatoriums geschaffen werden konnten, ist ein wesentlicher Verdienst dieses speziellen KTB-Bohr- und Verrohrungsschemas.

Auch die Strategie, felderprobt, international standardisierte Bohrdurchmesser zu verwenden, hat sich bewährt, wie die vergleichsweise guten Bohrleistungen der Bohrwerkzeuge, die auch ein Ergebnis der breiten Auswahlpalette an verfügbaren Werkzeugen darstellt, gezeigt hat (s. a. Kap. C-3.7). Die Reduzierung der Bohrkosten durch Verringerung des Bohrdurchmessers und der Clearance-Verhältnisse bei den Bohr- und Verrohrungsschemen findet zwischenzeitlich als "Slim Hole Drilling"-Strategie breite Anwendung in der Industrie [2].

- Vertikalbohrstrategie

Wichtigste Voraussetzung für das Erreichen der Endteufe der KTB-HB war die erfolgreiche Realisierung der Vertikalbohrstrategie.

Durch den erfolgreichen Einsatz der neu entwickelten Vertikalbohrsysteme bis in den Teufenbereich von 7 500 m wurde die KTB-

liche Kernbohrstrategie auf der Basis von dünnlippigen Diamantkernbohrsystemen für große Durchmesser (LDCS-Technik) war eine folgerichtige Entscheidung auf der Grundlage der hervorragenden Erfahrungen in der KTB-VB (s. a. Kap. C-1.4 und C-3.6). Wenn auch der Einsatz der Systeme durch die zunehmenden Bohrlochstabilitätsprobleme in der 12 $\frac{1}{4}$ "-Phase der KTB-HB stark beeinträchtigt war, und die Anzahl der Kernmärsche stark reduziert werden mußte, setzten die Qualität und die Dimensionen der gewonnenen Großkerne neue Maßstäbe in der Kernbohrtechnik, aber auch in den Möglichkeiten der geowissenschaftlichen Bearbeitung.

Die Entscheidung, nicht wie in der KTB-VB praktiziert, auf kontinuierliche Kernbohrverfahren zu setzen, sondern dem diskontinuierlichen Kernen den Vorzug zu geben (s. a. Kap. C-1.4), erwies sich nicht nur vor dem Hintergrund des gegenüber der ursprünglichen Planung drastisch reduzierten Kernbohranteils, sondern auch wegen der hohen technischen Risiken, wie sie durch die Schwierigkeiten mit der Entwicklung des Pilotkernbohrsystems (s. a. Kap. C-3.6.4) dokumentiert sind, als richtig.

- Bohrstrang

Vergleicht man die Intensität der Planung und den Aufwand an Forschung und Entwicklung, gibt es neben dem Design der Bohranlage und der Entwicklung der Vertikalbohrstrategie keinen Bereich, der mehr an Engineering erfahren hat, als der KTB-Bohrstrang (s. a. Kap. C-1.6).

Um so überraschender war der Abriß des Stranges im Februar 1993 (s. a. Kap. C-3.4.2.3.1) und die im Laufe der anschließenden Untersuchungen wachsende Erkenntnis, mit dem neu gefertigten U-160-Bohrstrang auf Basis eines hochfesten Vergütungsstahles an die Grenze der Werkstofftechnologie gestoßen zu sein.

Die Entscheidung, nicht wie in der Kola-Bohrung praktiziert, Leichtmetalllegierungen auf Aluminium-Basis einzusetzen, sondern für die KTB-HB hochfesten Vergütungsstahl als Bohrgestängewerkstoff zu verwenden, muß angesichts der extremen Beanspruchungen in der KTB-HB und des hohen Temperaturniveaus sowie der nach den Modifikationsmaßnahmen erreichten hohen Zuverlässigkeit des Stranges

als grundsätzlich richtig beurteilt werden.

Die Ursachen des Muffenrißes zeigten jedoch, daß die Verwendung von auf hohe Festigkeit vergüteten Stählen bei dem heterogenen und komplexen bohrtechnischen Beanspruchungsprofil nur unter besonders sorgfältiger Beachtung der hiermit verbundenen Risiken verantwortet werden kann.

Das multifaktorielle Spektrum möglicher Versagensrisiken durch die korrosionsfördernde Umgebung, die Kerbwirkung durch die betriebliche Handhabung und die mit zunehmender Festigkeit ansteigende Gefährdung der Stahlwerkstoffe, erschweren die Festlegung einer Obergrenze des Festigkeitsniveaus mit allgemeiner Gültigkeit. Die nach API genormte Vergütungsstufe S-135 definiert hierbei den aufgrund der Erfahrungen als sicher erkannten Grenzwert für die Festigkeit von Bohrgestängewerkstoffen unter den betriebsüblichen Beanspruchungen.

- Spülungssystem

Eine wesentliche Voraussetzung für die erstmalige erfolgreiche Anwendung quasi-kontinuierlicher Analyseverfahren an der KTB-VB zur geochemischen Bilanzierung der Bohrspülung durch Wissenschaftler des KTB-Feldlabors, war der Einsatz eines neu entwickelten, besonders auf die Anforderungen der geowissenschaftlichen Auswertung hin ausgerichteten Spülungssystems auf der Grundlage eines synthetisch hergestellten Tonminerals (s. a. Kap. B-1.1 und B-3.6).

Trotz der Korrosionsschäden am Seilkernbohrstrang wurde die KTB-HB mit dem in der KTB-VB eingesetzten Spülungssystem begonnen. Ausschlaggebend hierfür war neben den hervorragenden Erfahrungen mit der geowissenschaftlichen Kompatibilität des Systems, der aufgrund intensiver Untersuchungen fortgeschrittene Erkenntnisstand zu den Ursachen der Korrosion und die verfügbaren Bekämpfungsmöglichkeiten, die die Risiken angesichts der geowissenschaftlichen Vorteile als tolerierbar erwarten ließen (s. a. Kap. C-1.7).

Durch die Modifikation des Systems mit einem Hochtemperaturpolymer konnte zwar das Korrosionsverhalten des Systems entschieden verbessert werden, die grundsätzlichen Schwachstellen des Systems in der Hoch-

temperatur- und Elektrolyt-Verträglichkeit wurden aber nach Überschreiten der 7 000 m Teufe offensichtlich und führten schließlich zum Austausch (s. a. Kap. C-3.8). Daß es gelungen ist, das anschließend eingesetzte Hochtemperatursystem aus hochtemperaturstabilen Polymeren und Bentonit trotz der extremen Temperaturbelastung bis zur Endteufe und auch bei den Abschlußexperimenten stabil zu halten, ist nicht nur auf die ausgezeichneten Systemeigenschaften zurückzuführen, sondern ganz wesentlich auf die ständige Optimierung und intensive Überwachung in den Spülungslabors der Serviceunternehmen und auf der Lokation. Einen wesentlichen Beitrag leistete hierzu auch das auf der Lokation verfügbare Hochtemperatur/Hochdruckviskosimeter (s. a. Kap. C-3.8).

Neben diesen, für das Erreichen der technischen und wissenschaftlichen Ziele wichtigen Leistungen, wurden in der KTB-HB aber auch die technologischen Grenzen deutlich. Kein anderer Bereich machte die Grenzen der technischen Machbarkeit, in die die KTB-HB vorgestoßen ist, deutlicher sichtbar als die in den tiefsten Abschnitten aufgetretenen Bohrlochstabilitätsprobleme.

Die mit den Bohrlochinstabilitäten verknüpften bohrtechnischen Schwierigkeiten verhinderten das Erreichen des angestrebten Teufenzieles im gegebenen Zeit- und Kostenrahmen (s. a. Kap. C-3.14). Ob die Umstellung auf ein ölbasisches System angesichts der durch die Lithologie, den Spannungszustand und die hohen Temperaturen dominierten Versagensmechanismen eine substantielle Verbesserung bewirkt hätte, bleibt mehr als fraglich. Als Antwort auf diese Probleme bleibt daher neben einer Intensivierung der Anstrengungen für ein besseres Verständnis der ablaufenden Prozesse mittels Laboruntersuchungen und Modellrechnungen sowie Auswertung von Erfahrungen, nur die präventive Berücksichtigung dieser Schwierigkeiten durch ein Bohr- und Verrohrungsschema mit möglichst kurzen offenen Bohrlochstrecken, die so rasch wie technisch möglich durch eine Zwischenverrohrung gesichert werden müssen.

Als Konsequenz aus den Erfahrungen der KTB-HB ergibt sich für einen zukünftigen bohrtechnischen Vorstoß in den Teufenbereich von 10 km und darüber hinaus prioritär Optimierungs- aber auch Forschungs- und Entwicklungsbedarf in folgenden Bereichen:

- Wechselwirkung zwischen Spülung und Gebirge im Hinblick auf die Bohrlochstabilität

- Entwicklung eines Bohrlochstabilitätsmodells mit Prognosefähigkeit zur Erklärung der aufgetretenen Konvergenzerscheinungen
- Weiterentwicklung leistungsfähiger Untertageantriebe für den Temperaturbereich über 200 °C
- Reduzierung des Roundtripbedarfes durch Erhöhung der Zuverlässigkeit untertägiger Komponenten
- Verbesserung der Technik bei tiefen Ablenkeoperationen unter hohen Temperaturen. Dies betrifft nicht nur die eingesetzten Richtbohr-garnituren, sondern vor allem auch die Herstellung von qualitativ guten Zementbrücken.
- Einsatz eines Topdrive in der Bohranlage
- Optimierung des Hochtemperaturverhaltens von Bohrspülungen mit besonderer Berücksichtigung günstiger Bohrlochstabilitätseigenschaften und eines möglichst niedrigen Reibbeiwertes
- Überprüfung alternativer Bohrstrangwerkstoffe für einen kombinierten, auf die Anforderungen im jeweiligen Teufenbereich optimal abgestimmten Bohrstrang
- Weiterentwicklung des spülungsbetriebenen Hammerbohrverfahrens und Prüfung der Anwendung von Lufthammerbohrverfahren zur Effizienzsteigerung in den oberen Abschnitten mit großem Bohrdurchmesser
- Umsetzung und Nutzung der Bohranlagenautomatisierung für Zeit- und Personaleinsparungen
- Realisierung eines kontinuierlichen Bohrstranginspektionssystems als präventive Maßnahme zur Vermeidung von Havariearbeiten aufgrund von Bohrstrangversagen

Für das Erreichen der Endteufe von 9 101 m der KTB-HB wurden insgesamt 1 468 Bohrtage erforderlich. Die bohrtechnischen Gesamtkosten beliefen sich auf 266,9 Mio DM (s. a. Kap. C-2.2). Dies entspricht spezifischen Kosten von 29 TDM/m bzw. 182 TDM/Tag.

Vergleicht man die in der KTB-HB erreichten Produktivitätskennziffern (Bruttobohrleistung/Tag) mit

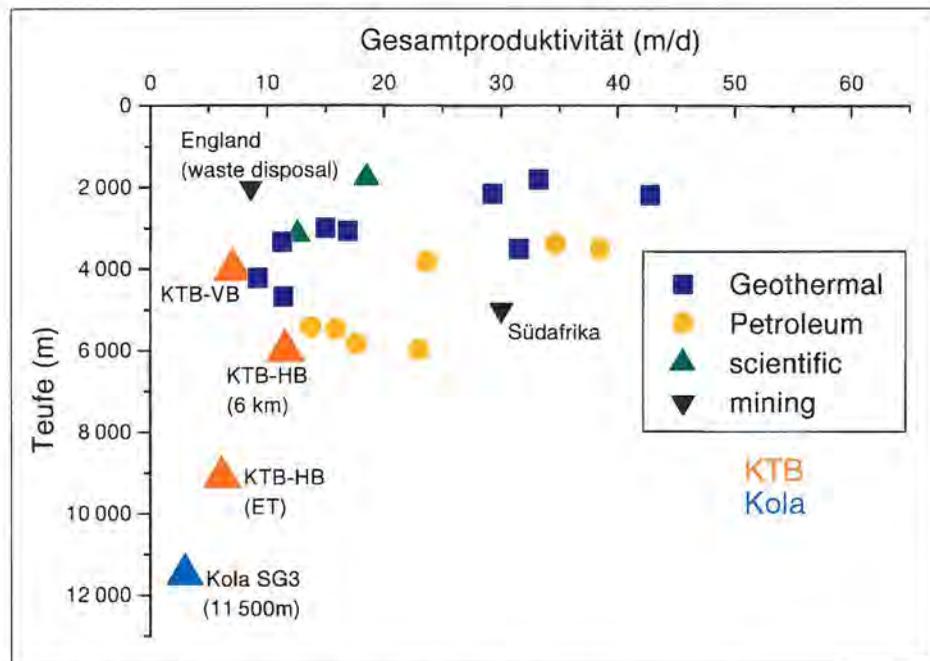


Abb. 1/C-4: Produktivitätskennziffern von Kristallinbohrungen im Vergleich

den internationalen Erfahrungswerten aus Kristallinbohrungen (Abb. 1/C-4) [4], [5], [6], [7], [8], so liegt die KTB-HB bis zur Teufe von 6 km mit 11,6 m/d im unteren Bereich der bei tiefen Geothermalbohrungen erzielten Werte und erreicht im direkten Vergleich mit der Kola-Bohrung [7] nahezu den doppelten Wert.

Der auf die Endteufe von 9 101 m bezogene Wert von 6,2 m/d ist hauptsächlich verursacht durch die in den tieferen Abschnitten infolge der Bohrlochinstabilitäten verursachten Verzögerungen und repräsentiert somit auch die erwartete überproportionale Zunahme der Risiken mit der Teufe.

Daß sich dieser Trend mit zunehmendem Vorstoß in die Tiefe weiter fortsetzt und verstärkt, wird durch die Erfahrung der Kola-Bohrung bestätigt, die bezogen auf eine Teufe von 11 500 m einen Wert von nur noch 3,2 m/d erreichte [7].

Bei der Beurteilung der technischen Machbarkeit zukünftiger ultratiefer Bohrungen bis in den Teufenbereich von 14 km, wie er den ursprünglichen Planungen der KTB-HB zugrunde lag und auch für die Kola-Bohrung angestrebt war, werden diese Erfahrungswerte eine entscheidende Rolle spielen.

Quellen

- [1] Emmermann, R.: Abenteuer Tiefbohrung, Geowissenschaften, Heft 4/1995, KTB-Resümee und Ausblick, Ernst & Sohn-Verlag, Berlin, 1995
- [2] Spörker, H. F.; Kröll, E.; Frühmann, P.: Applicability of Slimhole Wells as an Alternative to Standard Exploration/Production Operations in a Mature Area, SPE 29360, SPE/ADC Drilling Conference, Amsterdam, 28 Feb-2 March 1995
- [3] Donati, F.; Oppelt, I.; Ragnitz, D.; Ligrone, A.; Calderoni, A.: Closed Loop Steerable Drilling Tools for High Temperature Application, Geothermal Resources Council Heating, Reno, Nevada, Oct 8-11, 1995
- [4] Beswick, J.: High quality coring for scientific purposes on hard rock to 2 000 m, KTB-Report 95-1, S. 121-123, Hannover, 1995
- [5] Beswick, J.: Summary of Deep Slimhole Wireline Drilling in South Africa, KTB-Report 95-1, S. 127-130, Hannover, 1995
- [6] Rowley, S. C.; Schuh, F. S.: Experience from Crystalline Rock Drilling and Technology Directions for Effective Ultra-Deep Coring and Drilling, Deep Drilling in Crystalline Bedrock, Vol. 2, S. 13-53, ISBN 3-540-18996-3, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1988

[7] Kozlowsky, Y.: The superdeep well of the Kola Peninsula, ISBN 3-540-16416-2, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987

[8] DOE: Second Annual Report to Congress in response to Public Law 100-441 "Continental Scientific Drilling and Exploration Act", Washington DC, April 1990, NLFB-Archiv, Archiv-Nr. 115305

[9] Engeser, B.; Tran Viet, T.; Wohlgemuth, L.: KTB-Experiences Applicable in Continental Deep Drilling Technology, Oil Gas European Magazine, 3/95, Urban Verlag, Hamburg, 1995

Abbildungen

Abb. 1/C-4: Produktivitätskennziffern von Kristallinbohrungen im Vergleich