

Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Grundlagen für den Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung

Prof. Dr.-Ing. C. Marx
Dipl.-Ing. J. Schamp
Dipl.-Ing. U. Deutsch

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Schamp, J.: Literatursammlung zum Stand der Tiefbohrtechnik.....	89
2. Schamp, J.: Die Gesteinszerstörung mit Bohrhämmern.....	96
3. Schamp, J.: Einsatzbedingungen in über-tiefen Bohrungen unter den speziellen Anforderungen der wissenschaftlichen Untersuchungen für KTB.....	98
4. Deutsch, U.; Schamp, J.: Die Hammerwirksamkeit unter Bohrlochsbedingungen.....	105
4.1 Hydraulische Bohrhämmer in der Volksrepublik China.....	105
4.2 Anwendung des Hammers in der Hauptbohrung.....	108
5. Zusammenfassung.....	114
6. Literaturverzeichnis.....	116

1. SCHAMP, J.: LITERATURSAMMLUNG ZUR TIEFBOHRTECHNIK

Es ist allgemein bekannt, daß die Bohrgeschwindigkeit beim Schlagbohrverfahren in harten Gesteinen höher liegt als beim drehenden Bohren. Diese Erfahrung gab immer wieder Anlaß, die Technik des drehschlagenden Bohrens für den Bereich der Tiefbohrtechnik - bei der in größeren Teufen zunehmend härtere Gesteine angetroffen werden - nutzbar zu machen.

In den Anfängen der Tiefbohrtechnik gab es zahlreiche Varianten des Schlagbohrverfahrens. Es wurde mit Meißeln am Seil oder am Gestänge gearbeitet und das Bohrklein wurde mit einer Schlambüchse aus dem Bohrloch entfernt. Die geringe Schlagzahl (Raky'sches Schnellschlagen 70-100/min) und die Form der benutzten Meißel verhinderten allerdings eine zufriedenstellende Bohrleistung in hartem Gestein und das Bohrgestänge war der Belastung oft nicht gewachsen.

Diese Nachteile verhalfen dem Rotarybohren zum Durchbruch, das in vergleichbaren Gesteinen wesentlich höhere Bohrleistungen erzielte. Gleichzeitig wurde aber die Verbesserung hydraulischer Bohrhämmer vorangetrieben und WOLSKI entwickelte 1909 einen spülungsbetriebenen Untertagehammer, der mit einer hohen Schlagzahl von ca. 1000/min arbeitete. Obwohl damit das Gestänge wesentlich weniger belastet wurde, gelang es nicht, die Störanfälligkeit bedingt durch Verunreinigungen der Spülung in Grenzen zu halten.

In den sechziger Jahren wurde die Idee des hydraulischen Schlagbohrens wieder aufgegriffen. Allerdings scheiterte ein wirtschaftlicher Einsatz immer wieder an der zu großen Störanfälligkeit und zu hohem Verschleiß. Erst neuere Entwicklungen luft- und spülungsbetriebener Bohrhämmer in jüngster Zeit deuten wieder auf das hohe Anwendungspotential dieser Bohrtechnik hin.

So wird als mögliches zukünftiges Einsatzgebiet von Bohrhämmern die Anwendung im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes erwogen. Da bei der Kontinentalen Tiefbohrung nahezu von der Ackersohle an hartes bis sehr hartes Gebirge (Kristallin) ansteht, kann die Bohrung mit einem schlagenden Bohrverfahren u.U. erheblich kostengünstiger abgeteuft werden.

Die hier durchgeführte Untersuchung hat nun zum Ziel, festzustellen, ob das unter anderen Einsatzbedingungen prinzipiell bewährte und sehr effektive Schlagbohrverfahren für den Einsatz in der Kontinentalen Tiefbohrung geeignet ist. Ein Teilprojekt ist dabei die Erstellung einer umfangreichen Literatursammlung zum Stand der Tiefbohrtechnik. Eine Literatúrauswertung zum Stand der Technik innerhalb eines bestimmten begrenzten Themenkomplexes wird immer die zeitliche Entwicklung der Forschung auf diesem Gebiet widerspiegeln.

So wurden die wichtigsten Erkenntnisse über die Grundlagen der Gesteinszerstörung beim Bohren in der Zeit von ca. 1960 bis 1970 gewonnen. Dieser Zeitraum war gekennzeichnet von einer intensiven Forschungstätigkeit, die sich hauptsächlich den beiden Hauptfaktoren des Bohrprozesses widmete, dem

- Ablösen von Gesteinsteilen aus dem Gebirgsverband und dem
- Abtransport des abgelösten Bohrkleins von der Bohrlochsohle.

Es erschienen weit über 100 Veröffentlichungen zu diesem Thema, unter denen besonders die Arbeiten von MAURER /1/ hervorzuheben sind. MAURER erklärte die einzelnen Phasen der Kraterbildung unter einem Meißelzahn, wie sie in Abbildung 1.1 dargestellt sind und definierte den Schwellenwert der Andruckskraft, oberhalb dem es überhaupt erst zu einer Kraterbildung kommen kann.

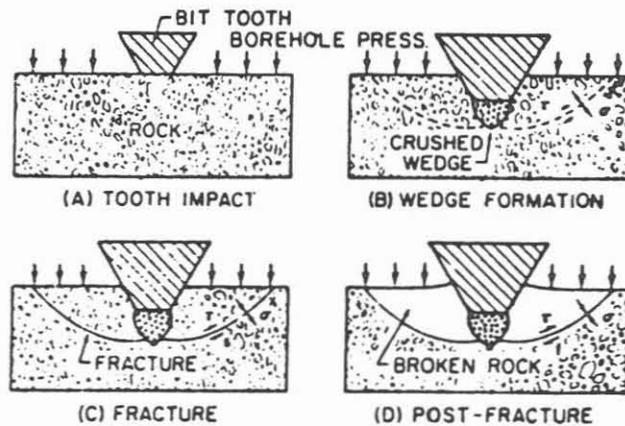


Abb. 1.1 : Phasen der Kraterbildung nach MAURER /1/

Weiterhin untersuchte er die Abhängigkeit des Schwellenwertes vom Differenzdruck auf der Bohrlochsohle und fand heraus, daß eine Zunahme des Differenzdrucks eine starke Vergrößerung des Schwellenandruckwertes bewirkt.

GNIRK und CHEATHAM /2/ führten Eindring-Versuche von Meißelzähnen unter verschiedenen Druckverhältnissen durch. Die dabei auftretenden Veränderungen der Andruckkraft-Eindringtiefe-Kurven (Abbildung 1.2) interpretierten sie als Übergang des Bruchmechanismus zum duktilen Bruchverhalten unter steigendem Bohrlochdruck.

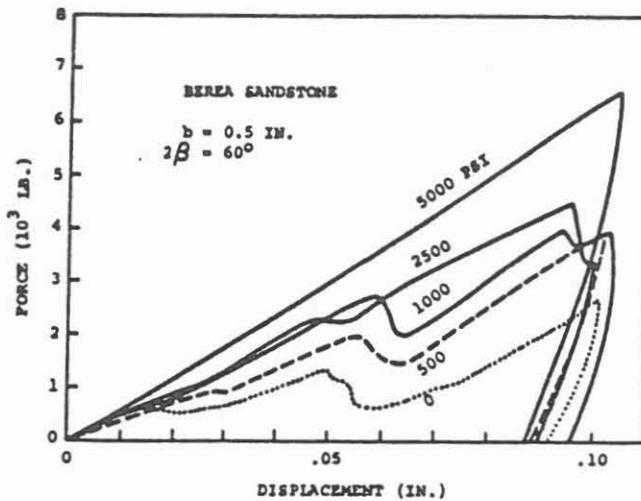


Abb. 1.2 : Darstellung von Eindringkraft über Eindringtiefe für verschiedene Druckstufen /2/

VAN LINGEN /3/ untersuchte die Kräfte, die unmittelbar auf der Bohrlochsohle den Abtransport des aus dem Gebirgsverband herausgebrochenen Bohrkleins behindern. GARNER /4/ untersuchte an Diamantmeißeln den Einfluß der Kontur einer einzelnen Diamantschneide auf das abgelöste Gebirgsvolumen und damit die Bohrgeschwindigkeit.

Im Folgenden sollen einige neuere Arbeiten über den Gesteinszerstörungsprozeß vorgestellt werden, welche die grundlegenden Erkenntnisse der intensiven Forschungen auf diesem Gebiet in den sechziger Jahren erweitern und vertiefen. Abschließend sollen dann spezielle Arbeiten zum drehschlagenden Bohren vorgestellt werden, die für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet von Bedeutung sind.

Einen nützlichen Weg ging SWENSON /5/, der mit der Methode der Finiten Elemente über zwei verschiedene Bruchspannungskriterien (max. Zug- bzw. Schubspannung) die Ribildung unter einer polykristallinen Diamantschneide simulierte. Die analytischen Ergebnisse, wie sie beispielhaft in Abbildung 1.3 gezeigt sind, deckten sich dabei gut mit denen von parallel durchgeführten Laborversuchen. Auf diese Weise konnte auch im simulierenden Rechnerprogramm ein Übergang von sprödem zu pseudo-elastischem Bruchverhalten unter steigenden Bohrlochdrücken beobachtet werden, wie es MAURER /1/ schon 1965 aus seinen Versuchen geschlossen hatte.

WARREN /6/ geht von der Spannungsverteilung um das Bohrloch während des Bohrvorganges aus und berücksichtigt dabei erstmals den Effekt einer lokalen Porendruck-Veränderung in impermeablen Gestein.

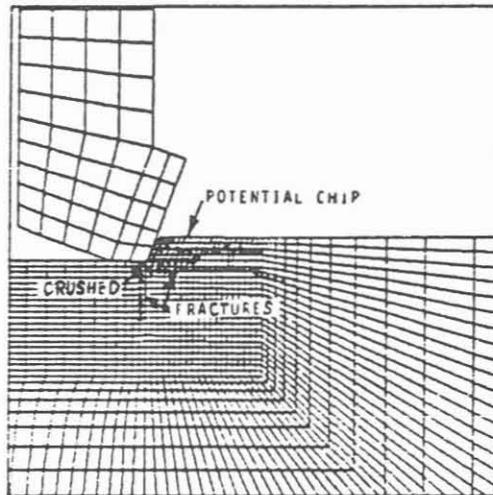


Abb. 1.3 : Rißbildung unter einer PDC Schneide mittels Rechnersimulation /5/

Durch das Freilegen von neuem Gestein auf der Bohrlochsohle kommt es zu einer Erniedrigung der mittleren Gebirgsspannungen in der Umgebung des Bohrloches. Dies bewirkt eine Vergrößerung des Porenvolumens. Innerhalb eines impermeablen Gesteins muß nun eine solche Vergrößerung des Porenvolumens eine Reduzierung des Porendruckes nach sich ziehen, während es bei einem permeablen Gestein zu keiner Veränderung kommt. Durch diese Absenkung des Porendruckes tritt nun selbst bei "balanced drilling" ein zusätzlicher Differenzdruck auf Sohle auf, der einen Übergang von sprödem zu mehr duktilem Gesteinsverhalten hervorruft. Dieser induzierte Differenzdruck mit einer verbundenen Absenkung der Bohrgeschwindigkeit mit der Teufe ist aus den genannten Gründen bei impermeablem Gestein größer als bei permeablem Gestein.

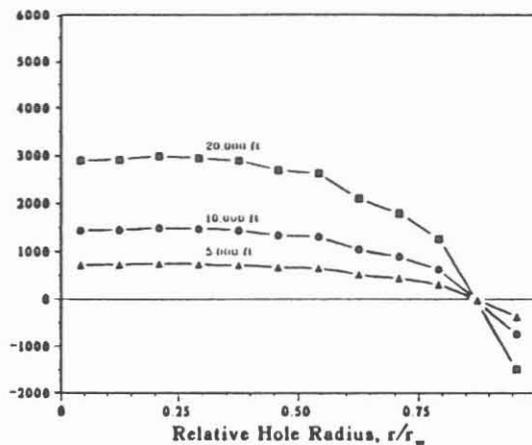


Abb. 1.4 : Variation des induzierten Differenzdruckes über der Bohrlochsohle für verschiedene Teufen /6/

Mit dem Problem der Bohrlochsohlenreinigung beschäftigt sich die Arbeit von JOHNSTON et al /7/, bei der es um die Entwicklung spezieller Meißeldüsen geht, die durch Ausnutzung von Kavitationskräften und Wirbelbildung einen Gegendruck auf der Bohrlochsohle bilden, der dem Differenzdruck auf Sohle entgegenwirkt und die somit eine höhere Bohrgeschwindigkeit ermöglichen.

In JOHNSTON's "STRATOJET"-Konzept (STRUCTURED Acoustically Oscillating JET) wird nun - begünstigt durch eine genau definierte Düsenform - der Düsenstrahl über eine von der Strouhal-Nummer bestimmten Frequenz f zu einzelnen diskreten Wirbeln angeregt.

Solange diese Wirbel stabil sind, erzeugen sie auf der Bohrlochsohle einen negativen Gegendruck, der in etwa zehnmal größer ist, als der Druckabfall über der Düse (vergl.: turbulente Fluktuationen eines "normalen" Düsenstrahls betragen ca. ein Zehntel des Düsendruckabfalls.)

Diese Kräfte mögen daher groß genug sein, um Bohrklein gegen den Differenzdruck auf Sohle abzulösen. Den Vergleich eines solchen zu Wirbeln angeregten Düsenstrahls mit einem normalen Jet-Strahl zeigt Abbildung 1.5:

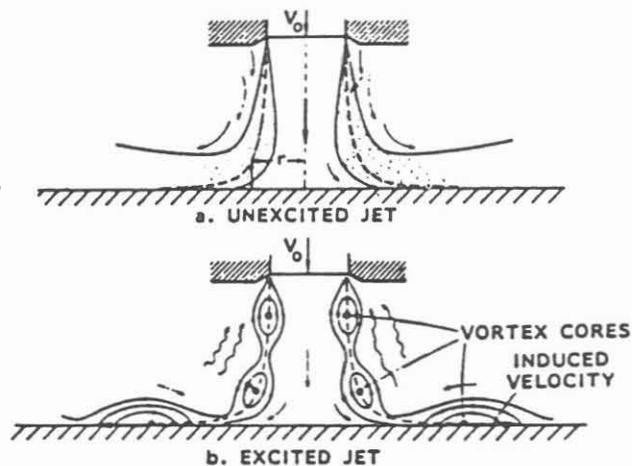


Abb. 1.5 : Fließvergleich eines normalen und eines angeregten Düsenstrahls /7/

JOHNSTON beschreibt das STRATOJET-Konzept als drei- bis viermal so effektiv im Abtransport von Bohrklein als herkömmliche Systeme. Die Entwicklungen laufen zur Zeit darauf hinaus, die bisher nur mit Wasser erzielten Ergebnisse auch auf Bohrspülungen zu übertragen. Sollte dies gelingen, so ist mit einer potentiellen Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit zu rechnen.

Auf dem Gebiet des schlagenden Bohrens sind vor allem die Arbeiten von BRENNSTEINER /8,9,10/ zu erwähnen. In /8/ faßt BRENNSTEINER den Stand der Erkenntnisse beim schlagenden Bohren bis zum Jahr 1974 zusammen. Dabei analysiert er die erfaßbaren Parameter des Energieübertragungsmechanismus und ihre funktionelle Verknüpfung.

So gibt es für Kratertiefe, Spanvolumen und spezifische Energie jeweils ein Optimum, das bei einem bestimmten Umsetzwinkel auftritt, dessen Größe wiederum von der Schlagenergie bestimmt wird (Abbildung 1.6).

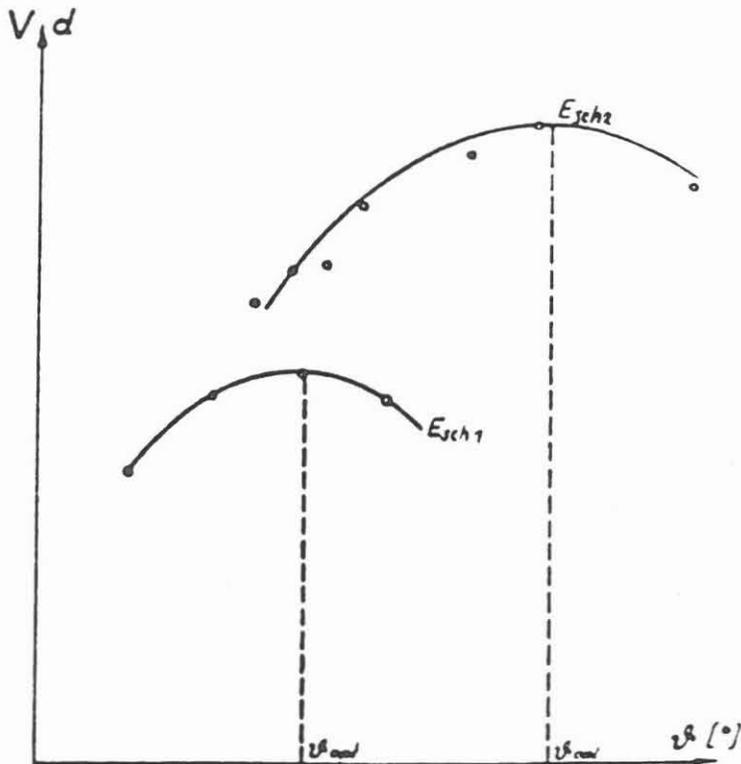


Abb. 1.6 : Kratertiefe d und Spanvolumen V in Abhängigkeit vom Umsetzwinkel und der Schlagenergie E_{sch}

Die einachsiale Druckfestigkeit scheint dabei einen Grenzwert für den minimalen spezifischen Energieverbrauch darzustellen, wie Abbildung 1.7 zeigt. Auch für die Andruckskraft gibt es einen optimalen Wert, bei dem eine maximale Energieübertragung an das Gestein stattfindet.

Große Unterschiede gibt es bei der derzeitigen Spannungswellenform und der theoretisch optimalen Form. Jede Annäherung der derzeitigen Spannungswellenform an das theoretische Optimum würde aber eine Verbesserung des Energieübertragungsgrades bedeuten. Verbesserungen lassen sich auch noch bei der Schlagenergie und der Schlagzahl erreichen, die beide einen linearen Einfluß auf die Bohrgeschwindigkeit haben.

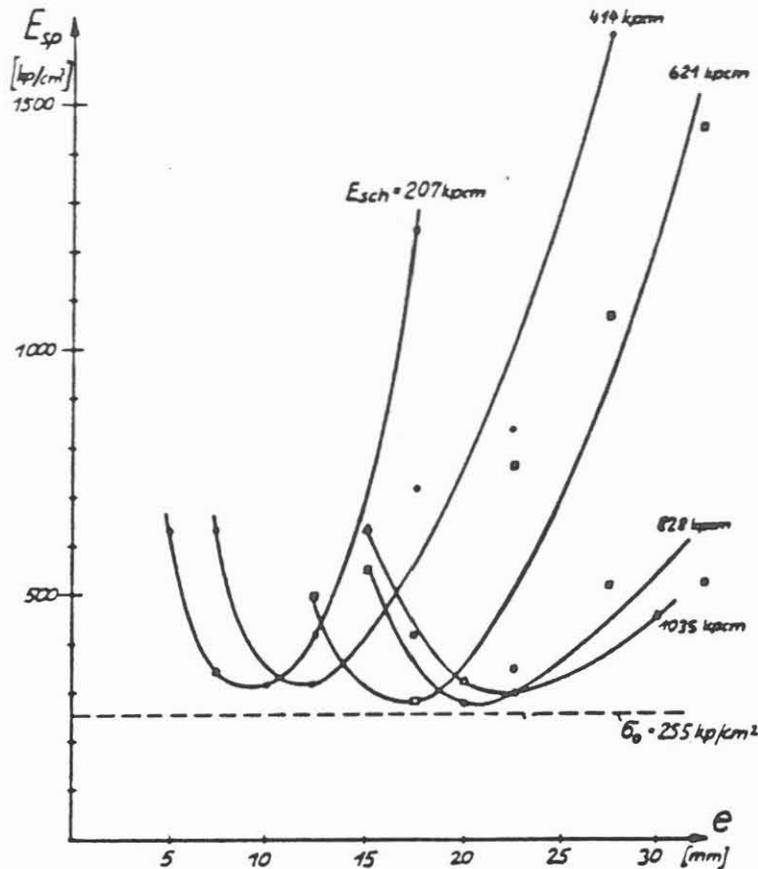


Abb. 1.7 : Spezifische Energie E_{sp} in Abhängigkeit von der Umsetzdistanz e beim parallelen Umsetzen in Kalk

In /9/ werden die genannten Erkenntnisse noch vertieft und genauer untersucht. Für den optimalen Umsetzwinkel werden von BRENNSTEINER drei Faktoren genannt:

1. Ausbrechen unterschiedlich großer Späne in Abhängigkeit vom Umsetzwinkel,
2. Beeinflussung der Energieübertragung durch unterschiedliche Ausbildung der Bohrlochsohle und
3. Häufigkeitsverteilung von mehr oder weniger günstigen Abständen der Kraterbildung.

Alle drei Effekte ergeben nun den Einfluß des Umsetzwinkels auf die Kraterbildung und damit auf die Bohrgeschwindigkeit. Weiterhin wird der Einfluß der Gesteinsparameter auf das schlagende Bohren untersucht. Dabei wurde bei dem Point-Load-Test (PLT-Wert) ein signifikanter Einfluß auf die resultierenden Bohrparameter erkannt. Dies führte zu einer Neuinterpretation des Gesteinsbruchmechanismus, bei der die Bildung der Hauptspäne als Trennbruch und nicht als Gleitbruch gedeutet wird.

Für eine gezielte Weiterentwicklung des schlagenden Bohrens im Hinblick auf einen Einsatz in tiefen Bohrungen (KTB) scheint die Entwicklung eines spülungsgetriebenen Bohrhammers mit einem Fluidik-Element zur Steuerung des Schlagkolbens von Interesse zu sein. Dieser in der Volksrepublik China gebaute Bohrer zeigte besonders gute Ergebnisse beim Kernbohren und soll auf seine Verwendungsfähigkeit für das Kontinentale Tiefbohrprojekt am Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung getestet werden /11-15/.

Die genannten Arbeiten verfolgen allesamt positive Ansätze auf dem Wege zu einem besseren Verständnis des Gesteinszerstörungsprozesses und zeigen zum Teil vielversprechende technische Lösungsmöglichkeiten, die aber in einigen Fällen noch in der Entwicklungs- oder Erprobungsphase stecken.

2. SCHAMP, J.: DIE GESTEINSZERSTÖRUNG MIT BOHRHÄMMERN

Bei dem schlagenden Bohren handelt es sich um ein Verfahren, das vorwiegend in hartem Gestein angewendet wird und eigentlich in der traditionellen Untertage-Bohrtechnik beheimatet ist. Durch die Überlagerung einer hohen Andruckkraft mit einem Schlagimpuls wird ein Eindringen in Gesteine ermöglicht, die nur sehr schwer oder überhaupt nicht drehend, ritzend, spangebend oder drückend gebohrt werden können /16/.

Durch die Kombination des Schlagimpulses mit einer Rotation des Bohrkopfes werden beim *drehschlagenden Bohren*, daß in erster Linie hier besprochen werden soll, die Vorteile des drehenden und des schlagenden Bohrens vereinigt.

Fortschritte in der wissenschaftlichen Erforschung des drehschlagenden Bohrens wurden ab dem Ende der fünfziger Jahre gemacht, als HARTMANN /17/ noch 1959 feststellte, daß in mehr als 70 Jahren kein nennenswerter Fortschritt auf diesem Gebiet zu verzeichnen sei und das "Gesteinsbohren noch immer eine Kunst sei, wo es eine Wissenschaft sein sollte." Parallel zu der allgemeinen Erforschung von Gesteinszerstörungsmechanismen wurden die Einflußfaktoren auf das drehschlagende Bohren untersucht. Dabei wurden in der Literatur zwei Problemkreise vorwiegend behandelt /8/:

1. Der Energieübertragungsmechanismus und
2. der Gesteinsbruchmechanismus.

Die Untersuchungen profitierten von den allgemeinen Erkenntnissen, welche die Arbeiten von MAURER, CHEATHAM, SIMON, u.v.a. gebracht hatten und führten zu einem besseren Verständnis des drehschlagenden Bohrens.

HUSTRULID und FAIRHURST erarbeiteten eine theoretische und experimentelle Studie über das Schlagbohren im Gestein /18/, die sich hauptsächlich mit der Effektivität der Energieübertragung vom Bohrstrang auf das Gestein, dem minimal benötigten Andruck des Bohrkopfes an das Gestein und spezifischen Energiebetrachtungen befaßte.

SIMON /19/ und LUNDBERG /20,21/ untersuchten speziell den Energietransfer von Spannungswellen aus dem Bohrstrang in das Gebirge. DUTTA /22/ untersuchte den Gesteinsbruchmechanismus und entwickelte an Hand von Druck-Weg Diagrammen ein mathematisches Modell der Kraterbildung beim Eindringen der Bohrschneide. BRENNSTEINER /8,9/ schließlich fertigte eine ausgezeichnete Literaturzusammenstellung zu diesem Themenkreis an und führte eigene weiterführende Untersuchungen über die Zusammenhänge der wichtigsten Parameter beim schlagenden Bohren durch.

Seit die Suche nach Kohlenwasserstoffen in immer grössere Teufen führt, wird der Einsatz von Drehschlagbohrgeräten in der Rotary Bohrtechnik versucht, da hier besonders harte Tiefengesteine angetroffen werden, die bei herkömmlichen Bohrmethoden zu grossem Verschleiß und geringen Bohrgeschwindigkeiten führen. Erfolgreiche Einsätze in Verbindung mit Luftspülung als Antriebsmedium wurden bereits durchgeführt /23/ und lassen auf eine erfolgreiche Anwendung dieser Technik in der Zukunft hoffen.

Bei der Literaturrecherche zeigte sich, daß es noch große Gebiete gibt, auf denen bis heute nur wenig Forschungsmaterial zur Verfügung steht. So ist der Verschleiß von Werkzeug und Schneide und sein Einfluß auf den Bohrprozeß zwar qualitativ bekannt, kann aber immer noch nur sehr unzureichend quantitativ abgeschätzt werden. Der Einfluß des Verschleisses auf das Schlagbohren ist noch immer nahezu unbekannt, sieht man einmal von der statistisch abgesicherten Erkenntnis ab, daß die Bohrgeschwindigkeit mit zunehmendem Schneidenwinkel abnimmt. Ähnliches gilt für den Einfluß von Reibungskräften oder die Frage des Rißfortschrittes unter der Bohrschneide.

Allerdings gibt es auch eine ganze Reihe positiver Ansätze, die auf ein besseres Verständnis und die bessere Ausnutzung bohrspezifischer Gegebenheiten hoffen lassen.

Wertvolle Arbeit auf dem Gebiet des drehschlagenden Bohrens leistete BRENNSTEINER. Seine Literaturübersicht wird ergänzt durch eigene Versuche, die zur Klärung offener Fragen beitragen. So kommt er aufgrund phänomenologischer Betrachtungen und gleichzeitiger statistischer Analysen zu einer Neuinterpretation des Bruchmechanismus bei der Bildung der Hauptspäne.

Diese genannten Beispiele zeigen das große Entwicklungspotential, daß noch in dem Gebiet der Schlagbohrtechnik steckt.

Einen entscheidenden Einfluß auf die weitere Entwicklung haben dabei sicherlich auch die verbesserten Simulationsbedingungen im Labor und die einfache Handhabung und Auswertung großer Datenmengen durch rechnergestützte Bohrstände. Demgegenüber steht die große Zahl der Einflußfaktoren auf den Schlagbohrprozeß und ihre komplexe Beeinflussung untereinander, die eine stete Herausforderung für weitere Untersuchungen bleiben wird.

3. SCHAMP, J.: EINSATZBEDINGUNGEN IN ÜBERTIEFEN BOHRUNGEN UNTER DEN SPEZIELLEN ANFORDERUNGEN DER WISSENSCHAFTLICHEN UNTERSUCHUNGEN FÜR KTB

Bei den zwei Bohrungen des Kontinentalen Tiefbohrprojektes handelt es sich um wissenschaftliche Forschungsbohrungen, die im Hartgestein der Lithosphäre abgeteuft werden. Dadurch unterscheiden sich Schwierigkeitsgrad und Aufgabenstellung erheblich von "normalen" Tiefbohrungen auf Erdöl oder Erdgaslagerstätten. Dies konnte durch die Erfahrungen, die beim Abteufen der russischen Bohrung Kola SG-3 gemacht wurden bestätigt werden.

Der gesamte Bohrprozeß und im Besonderen die Techniken für das Kernbohren müssen für einen Teufenbereich von über 10.000 Meter ausgelegt sein und Temperaturen von mehr als 200° aushalten. Diese Temperaturen und die gleichzeitig zu erwartenden hohen Drücke stellen eine besondere Herausforderung dar, die durch eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gemeistert werden soll. Über die gesamte Bohrstrecke hinweg sind Gesteins-, Flüssigkeits- und Gasproben, die Messung der physikochemischen Bedingungen und geophysikalische Bohrlochmessungen erforderlich, um die weitreichenden geowissenschaftlichen Ziele des KTB zu erreichen. Dazu müssen einige spezielle Anforderungen an die bohrtechnische Ausführung gestellt werden:

- vertikales und maßhaltiges Bohrloch,
- dabei möglichst hoher Kerngewinn und
- Verwendung einer feststofffreien und äußerst sauberen Spülung

Die dominierende technologische Begrenzung ist dabei die Temperatur, und zwar für einen großen Teil der bohrtechnischen Geräte und die Bohrspülung sowie insbesondere für die Meßtechnik im Bohrloch.

Eine der grundlegendsten Erfahrungen beim Abteufen tiefer Bohrungen äußert sich darin, daß mit zunehmender Teufe die Bohrgeschwindigkeit stark abnimmt. Dies führt zu einer beträchtlichen Steigerung der Bohrkosten, bezogen auf die Zeit, bzw. den einzelnen Bohrmeter.

Aus der schematischen Darstellung dieses Sachverhaltes in Abbildung 3.1 kann man ersehen, daß die Bohrgeschwindigkeit exponentiell mit der Teufe abnimmt:

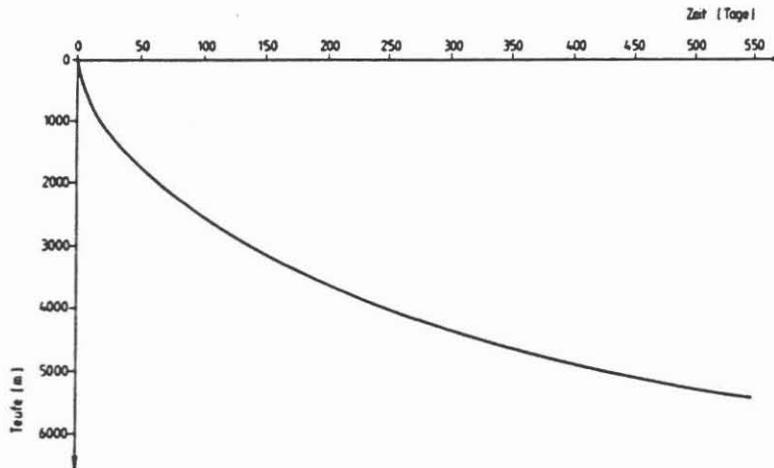


Abb. 3.1: Schematisches Zeit-Teufe Diagramm einer Tiefbohrung /24/

Die mit dieser Entwicklung einhergehende dramatische Kostensteigerung bei der Exploration großer Teufen wirft die Frage auf, inwieweit eine technische Lösung für dieses Problem gefunden werden kann. Nach MARX /24/ werden im Allgemeinen folgende Gründe für den Rückgang der Bohrleistung genannt:

- Verminderung der Bohrgeschwindigkeit auf Sohle infolge Verfestigung des Gebirges
- die geringen Standlängen der Bohrwerkzeuge erfordern zeitraubende Roundtrips und vermindern die aktive Bohrzeit auf Sohle
- zusätzliche Nebenzeiten entstehen durch Aufbereitung der Spülung, Messungen, Tests usw.

Dabei wird innerhalb dieses Berichtes zum Stand der Schlagbohrtechnik das Hauptaugenmerk naturgemäß auf die Verminderung der Bohrgeschwindigkeit auf Sohle infolge der Verfestigung des Gebirges zu legen sein. Allerdings wird auch die werkzeugtechnische Seite angesprochen werden, insbesondere im Hinblick auf den Einfluß des Verschleißes auf die Bohrleistung.

Die Verfestigung des Gebirges mit zunehmender Teufe läßt sich am Besten durch die Kenntnis des primären Gebirgsspannungszustandes erfassen. Dabei geht man in der Regel von einem hydrostatischen Spannungszustand innerhalb des Gebirges aus, für den gilt:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$$

(Gl. 3.1)

Übereinstimmung herrscht in der Literatur bei der Ermittlung der vertikalen Druckkomponente σ_z , die sich zu

$$\sigma_z = \delta_g \cdot g \cdot L \quad (\text{Gl. 3.2})$$

errechnet, mit:

- δ_g = mittlere Dichte des Gebirges,
- g = Gravitationskonstante,
- L = Bohrlochsteufe

Die Vertikalspannung wächst damit linear mit der Teufe und auch starke Inhomogenitäten des Gebirges können nur geringe, örtlich bedingte Abweichungen des lotrechten Druckes vom Mittelwert nach oben oder unten bewirken /25/. Daraus ergibt sich z.B. in einer Teufe von 10.000 Metern ein Druck von ca. 226 MPa, der nach allen Seiten gleich wirkt. Dieser allseitige Druck bewirkt eine Verfestigung des Gesteines, welche sich deutlich an einer Zunahme der Druckfestigkeit erkennen läßt.

Abbildung 3.2 zeigt Eindrückversuche mit Schneiden unter steigender Vorspannung und den Einfluß auf die Druckfestigkeit des Gesteins nach GNIRK und CHEATHAM /2/. Abbildung 3.3 zeigt den direkten Einfluß dieser Vorspannung auf die Bohrgeschwindigkeit für verschiedene Gesteinsarten nach MURRAY und CUNNINGHAM /26/.

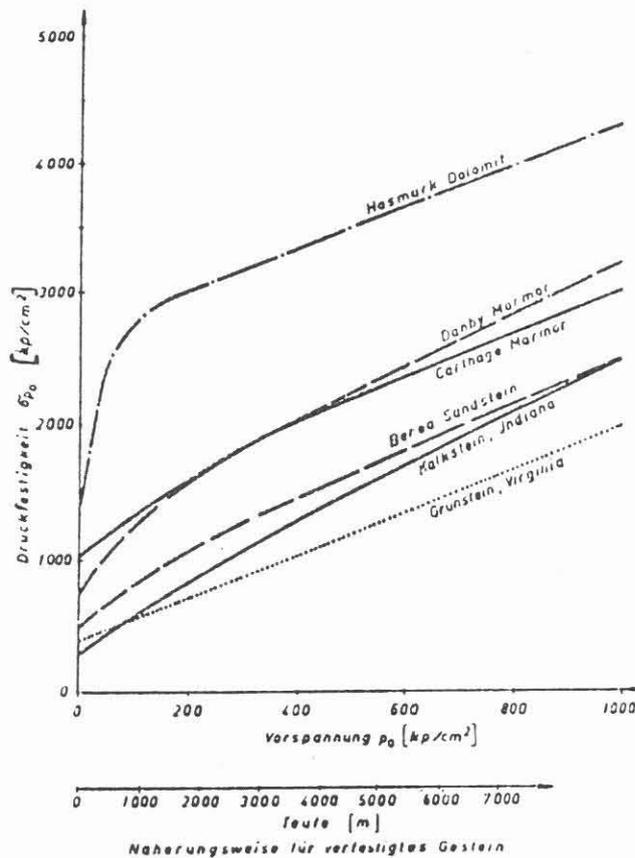


Abb. 3.2 : Zunahme der Druckfestigkeit bei allseitiger Vorspannung p_0

Eine Bohrung im Gestein stellt nun eine Störung dieses Gleichgewichtszustandes dar, weil die Bohrlochsohle vom Druck der lotrechten Komponente σ_z entlastet wird. Dadurch kommt es nicht zu einer Verfestigung des Gebirges und es werden hohe Bohrfortschritte erzielt, wie die Bohrergebnisse mit Luft- oder Schaumspülungen beweisen.

Allerdings ist dann innerhalb poröser und permeabler Formationen keine Kontrolle eventuell austretender Porenraumflüssigkeiten gewährleistet und das sichere Abteufen einer Bohrung nicht möglich.

Daher muß der unbekannte Porenraumdruck p_f durch das Gewicht der hydrostatischen Spülungssäule p_b ausgeglichen werden. Geht man zur Annäherung von einem mittleren hydrostatischen Druckgradienten von 0,115 MPa pro 100 Meter aus, so herrscht z.B. in einer Teufe von 10.000 m ein Druck von 115 MPa, der von der Spülungssäule kompensiert werden muß.

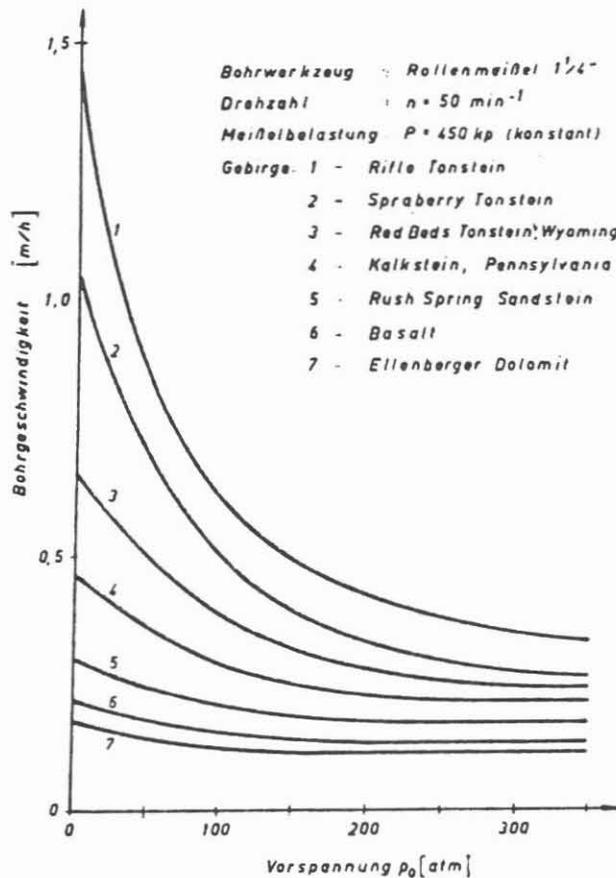


Abb. 3.3 : Einfluß der allseitigen Vorspannung p_0 auf die Bohrgeschwindigkeit nach /26/

Ist dies der Fall spricht man von "*balanced drilling*" und der Gleichgewichtszustand im Gestein ist wieder hergestellt. In vielen Situationen läßt sich aber ein *balanced drilling* nicht durchführen weil das genaue Druckgleichgewicht nicht bekannt ist, oder aus Sicherheitsgründen (z.B. in Hochdruckzonen, in denen der Lagerstättendruck weit über dem des mittleren hydrostatischen Druckgradienten liegt) mit einem höheren Spülgewicht gebohrt werden muß.

Aus diesem überhöhten hydrostatischen Spülungsdruck und dem Porenraumdruck ergibt sich nun ein Differenzdruck

$$\Delta p = p_b - p_f \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Dieser Differenzdruck hat sich nun schon relativ früh als eine Hauptursache für den verlangsamten Bohrfortschritt herausgestellt. Durch ihn tritt eine negative Beeinflussung der zwei Grundelemente des Bohrprozesses,

- dem Ablösen von Gesteinsteilen aus dem Gebirgsverband
- und dem Abtransport des abgelösten Bohrkleins

ein. Beim eigentlichen Gesteinszerstörungsprozeß kommt es zu einem Übergang von Sprödbbruchverhalten zu plastischem Bruchverhalten. Dadurch kommt es zu geringerer Rißbildung und es entstehen weniger Gesteinsbruchstücke, die von dem Spülungsstrom wegtransportiert werden können. Durch den Differenzdruck werden die abgelösten Gesteinsbruchstücke außerdem an Ihrer Bruchstelle festgehalten und können nicht abtransportiert werden. Dadurch kommt es zu einem wiederholten Überbohren des Gesteins, der Bohrfortschritt sinkt und der spezifische Energieverbrauch nimmt zu.

Die besondere Problematik des Bohrens in großer Teufe liegt darin, daß die ohnehin schon ungünstigen Bedingungen innerhalb des Gesteins (Zunahme der Druckfestigkeit mit der Teufe durch wachsende allseitige Vorspannung) durch die bohrtechnisch eingeleiteten Maßnahmen (Aufbringen eines Differenzdruckes auf die Bohrlochsohle zur Kontrolle des Porenraumdruckes) noch erheblich verschlechtert werden.

Beim eigentlichen Bohrprozeß wird dann das Gestein durch Lastaufgabe nochmals verfestigt bis die Kohäsionskraft überwunden wird und Bruch eintritt.

Das auf diese Weise immer noch wirtschaftlich gebohrt werden kann liegt daran, daß die Hauptenergie zum Zerstören des Gesteins durch das Gewicht des Bohrgestänges und der Schwerstangen nahezu kostenlos zur Verfügung gestellt wird und nur zum Drehen des Meißels noch Rotationsenergie über den Drehtisch - und zum Freispülen der Bohrlochsohle hydraulische Energie über die Spülung dem System zugeführt werden muß.

Andere exotische Bohrverfahren wie z.B. Laser- oder Fusionsbohren müssen an der Wirkstelle im Gestein enorme Energiemengen von außen zuführen (oftmals ohne dabei nennenswert höhere Bohrfortschritte zu erzielen) und werden dadurch schnell unwirtschaftlich gegenüber dem Rotarybohren.

Ein weiterer Faktor, der bei zunehmender Teufe eine immer bedeutendere Rolle spielt ist die Gesteinstemperatur. Geht man von einem in Deutschland üblichen Temperaturgradienten von $3^{\circ}/100\text{m}$ aus so beträgt die Temperatur in 10.000 Meter Teufe (ausgehend von einer Oberflächentemperatur von 15°C bereits 315° , ein Wert der auf das Abteufen einer Bohrung in mehrfacher Weise einen negativen Einfluß hat:

- Die physikalischen Eigenschaften des Gesteins verändern sich, das Bruchverhalten wird zunehmend plastisch. Dadurch verstärken sich die bereits weiter oben beschriebenen Probleme bei der Gesteinszerstörung. Dazu kommen Instabilitäten der Bohrlochswand, es besteht die Gefahr, daß das offene, unverrohrte Bohrloch langsam zuwächst.
- Spülungsprobleme werden immer größer, da auch neuentwickelte Bohrspülungstypen bei diesen Temperaturen nur noch kurze Zeit stabil sind und ihre rheologischen Eigenschaften fast völlig verlieren.
- Werkzeugtechnische Probleme häufen sich, da relativ temperaturempfindliche Bauteile wie Gummidichtungen (z.B. in Bohrmotoren) oder Elektrokabel (für Testgarnituren) diesen hohen Temperaturen nicht standhalten. Bei Bohrmeißeln mit künstlichen Diamantschneiden ist eine ausreichende Kühlung unbedingt nötig, da sonst ein Verbrennen der Diamantschneiden eintreten kann.

Besonders bei dem ersten Punkt bedarf es in der Zukunft eines verbesserten Verständnis der physikalischen Prozesse, die sich bei dem eigentlichen Bruchvorgang im Gestein abspielen. Bei den beiden letzteren Punkten sind insbesondere material- und werkzeugtechnische Weiterentwicklungen zu erwarten.

Abbildung 3.4 verdeutlicht den momentanen Stand der Technik und zeigt Einsatzgrenzen und Entwicklungspotential von Bohrwerkzeugen und Hilfsmitteln auf.

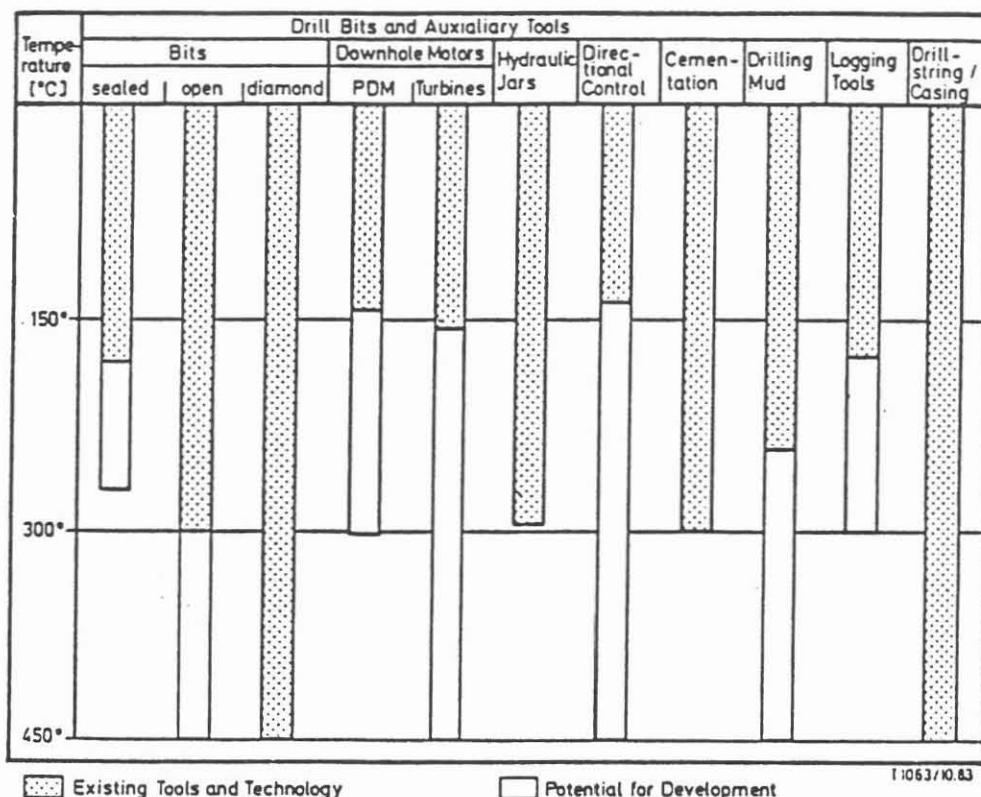


Abb. 3.4 : Einsatzgrenzen und Entwicklungspotential von Bohrwerkzeugen und Hilfsmitteln /27/

In Abbildung 3.5 wird die Veränderung der drei Faktoren Gebirgstemperatur, Gebirgsdruck und Porenraumdruck mit zunehmender Tiefe noch einmal zusammenfassend dargestellt:

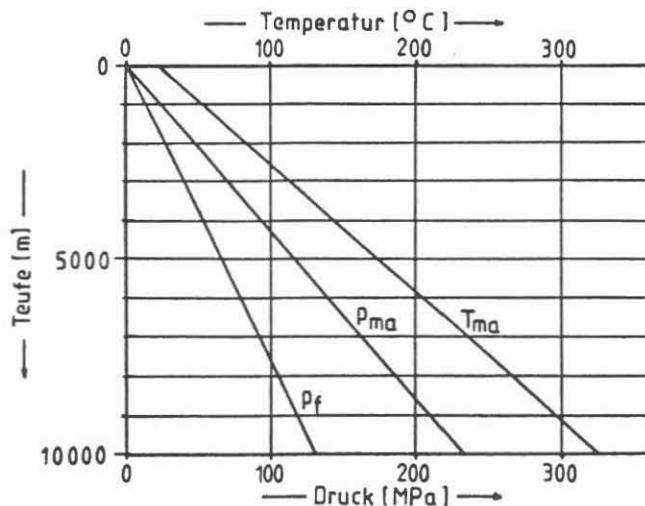


Abb. 3.5 : Zunahme von Temperatur, Gebirgsdruck und Porenraumdruck mit der Tiefe (für die Mittelwerte $\rho_{MA} = 2300 \text{ kg/m}^3$, $p_f = 0,115 \text{ MPa/100m}$ und $T = 3^\circ/100 \text{ m}$)

4. DEUTSCH, U. SCHAMP, J. : HAMMERWIRKSAMKEIT UNTER BOHR- LOCHBEDINGUNGEN

Praktische Erfahrungen mit dem Rotary-Bohrverfahren haben gezeigt, daß das Bohren von Hartgestein zwar möglich, jedoch nicht effektiv ist. Bohrfortschritt und Kronenstandzeiten sind in der Regel niedrig. Es ist daher für das KTB-Projekt erforderlich, alternative Bohrverfahren zu betrachten, welche in großen Teufen eine wirksamere Gesteinszerstörung und höhere Wirtschaftlichkeit versprechen.

Zu diesen Bohrverfahren zählt das Hammerbohren. Das Schlagwerk muß bei diesem Verfahren direkt über dem Meißel angeordnet sein und von der Spülung betrieben werden. Die auf das Gestein übertragene Kraft erreicht innerhalb kürzester Zeit den maximalen Wert. Das Gestein zeigt dadurch spröderes Verhalten, welches die Rißbildung begünstigt.

4.1. Hydraulische Bohrhämmer der Volksrepublik China

Hydraulische Bohrhämmer zerstören das Gestein durch ihre drehschlagende Wirkung, wobei der Schlagimpuls einen kerbenden Zerstörungsvorgang verursacht und die Drehbewegung eine scherende und spanende Wirkung hervorruft. Diese Technik der Gesteinszerstörung ist für Hartgestein sehr gut geeignet, wird aber bei uns aufgrund von Verschleißproblemen nicht eingesetzt. In der Volksrepublik China dagegen werden mehrere Bohrhammersysteme dieser Art verwendet.

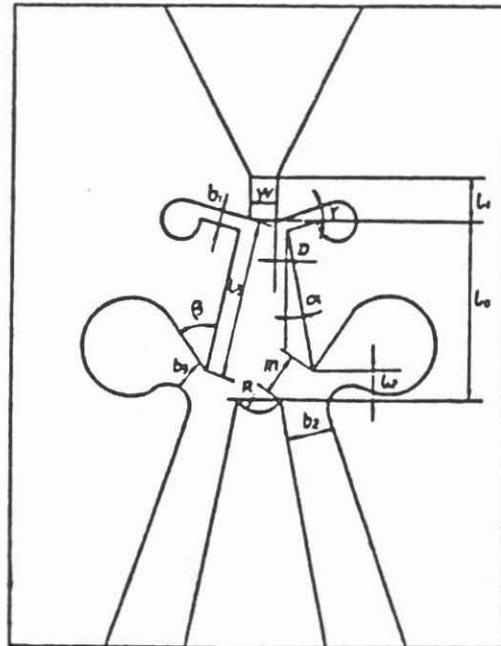
Es wurde Kontakt zu dem Institut aufgenommen, welches diese Entwicklung geleistet hat, und gegenseitige Besuche vorgenommen. Für die Bedingungen des Kontinentalen Tiefbohrprojektes sind vor allen Dingen solche Schlagsysteme von Interesse, die ohne verschleißanfällige Ventil- und Feder-elemente arbeiten. Unter diesem Aspekt sind besonders das "Fluidic-Valve" und das "Non Spring double acting Valve" interessant.

Das Fluidic-Valve ist eine ventillose Steuerung des Schlagkolbens. Dabei wird der *Coanda-Effekt* ausgenutzt, nach dem sich ein turbulenter freier Strahl an eine angrenzende Wand legt und dort unter bestimmten Bedingungen haften bleibt /13/. Dazu muß eine Düse vorhanden sein, durch die das Fluid herausstrahlt und das ausströmende Fluid muß einen bestimmten Druck und Geschwindigkeit besitzen, damit sich ein Strombündel bilden kann /15/. Ein Fluidik-Element arbeitet dann wie ein Verteilungsventil und kontrolliert den Hauptstrom. Dabei muß es folgenden Anforderungen genügen:

- Möglichst kleiner Druck- und Fluidverlust, damit eine ausreichende Leistung erzielt werden kann.
- Für eine lange Betriebszeit muß eine ausreichende Verschleißfestigkeit gewährleistet sein.

- Um einen stabilen Arbeitsvorgang und eine lange Lebensdauer zu gewährleisten muß der Strahl an der Wand haften, auch wenn kein Signal an der Kontrollöffnung ankommt.
- Das Element muß für einen hohen Gegendruck ausgelegt sein, der im Falle einer Kernverstopfung bei tiefen Bohrungen entstehen kann.

Abbildung 4.1 zeigt einen Querschnitt durch ein Fluidik-Element, wie es in den chinesischen Bohrhämmern eingesetzt wird:



- W = Düsenbreite
- D = Stelldifferenz
- b₁ = Breite der Kontrollöffnung
- b₂ = Breite des Strömkanals
- R = Radius des Verteilungskeils

Abb. 4.1 : Querschnitt durch ein Fluidik Element /15/

Über die Stelldifferenz D, den Winkel α und die Auslegung des Verteilungskeils wird die Stabilität des Strahles gewährleistet.

Der Bewegungsablauf im Bohrhämmer kann folgendermaßen beschrieben werden: Vom Gestänge strömt die Spülung in das Fluidik-Element (1) und gelangt durch die Bohrung (E) in die Vorkammer des Gehäuses (2). Der Kolben (3) bewegt sich mit dem Hammer (4) nach unten und schlägt auf den Amboß (5). Durch den Druckanstieg im Bereich (E-F) wird der Flüssigkeitsstrom über die Bohrung (C) in die Unterkammer des Kolbengehäuses gelenkt. Dadurch wird der Kolben wieder nach oben gedrückt. Durch den jetzt im Bereich C-D ansteigenden Druck wird der Flüssigkeitsstrom wieder in die Vorkammer gelenkt und der Vorgang beginnt von neuem /12/ (Abb. 4.2).

Insgesamt zeichnet sich diese Schlagkolbensteuerung über ein Fluidik-Element durch die einfache Bauweise und eine lange Lebensdauer aus. Es wird berichtet von möglichen Standzeiten um 700 Stunden.

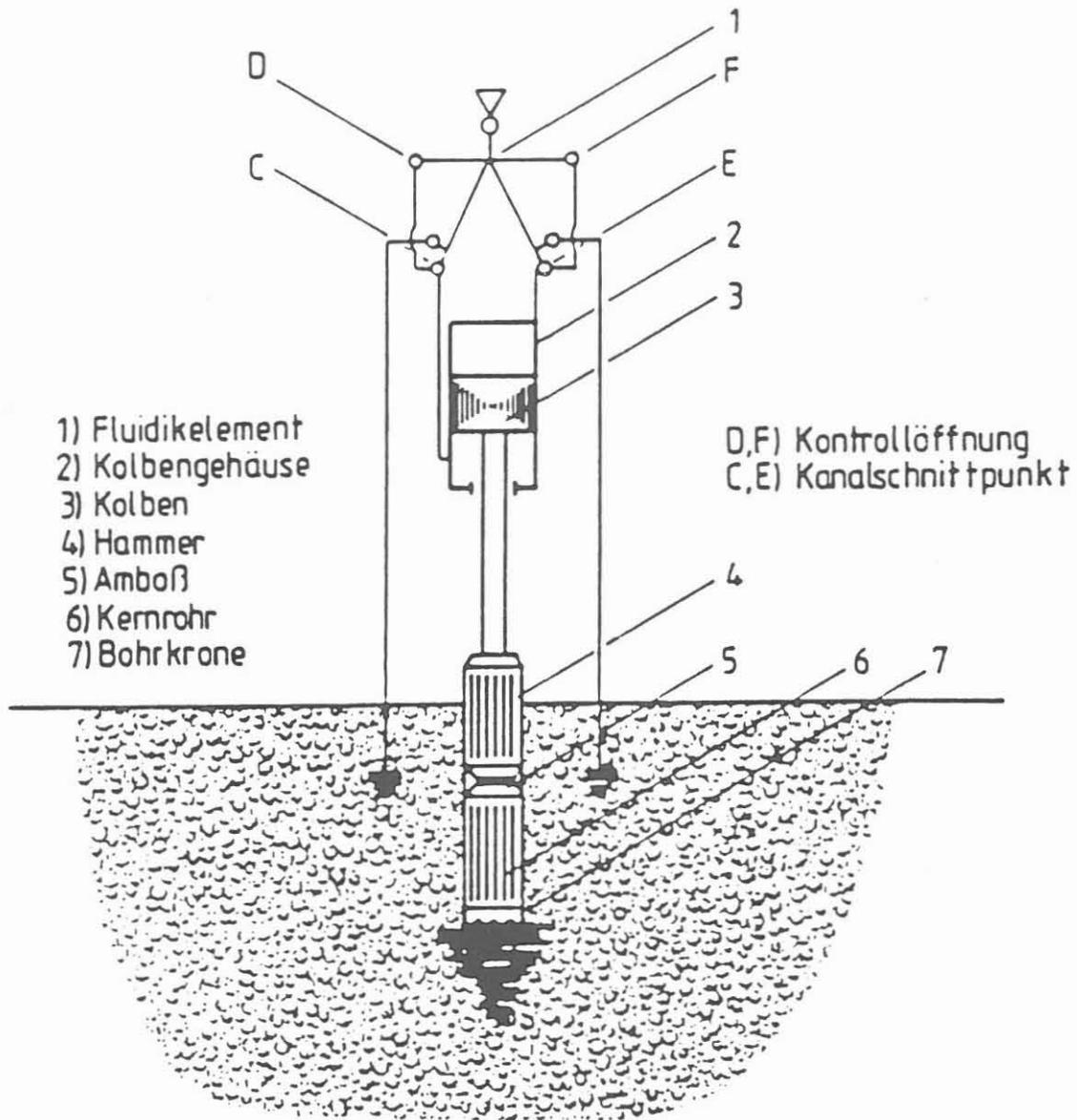


Abb. 4.2 : Funktionsprinzip des Fluidik Elementes nach /12/

Die mit dem Fluidik-Element ausgestatteten Bohrhämmer sind bisher in Größen von 54mm OD bis 150mm OD gebaut worden. Damit lassen sich Bohrkronen von 56 bis 200 mm kombinieren. Die Schlagzahl der Bohrhämmer variiert dabei von 600 bis maximal 2500 Schläge pro Minute. Der Druckabfall beträgt bei allen Geräten etwa 20 bar.

WANG /11/ berichtet, daß ein Vergleich zwischen Hammerbohren und Rotarybohren im gleichen Gestein gezeigt hat, daß mit diesen Hammerbohrgeräten ein um 40-100 % höherer Bohrfortschritt und eine um ca. 30 % gesteigerte Lebensdauer der Bohrwerkzeuge möglich ist. Beim Kernbohren lag der Kerngewinn zwischen 85 und 95%, wobei die Kernqualität sehr gut war und der von "drehend" gewonnenen Kernen entsprach.

Abbildung 4.3 zeigt den Aufbau des Bohrhammers mit dem Fluidik-Element und dem Schlagmechanismus, bestehend aus Kolben, Hammer und Amboß. Nicht dargestellt ist das Bohrwerkzeug selbst, bei dem ungewöhnlicherweise eine Diamantbohrkrone verwendet wurde. Die erzielten Ergebnisse deuten an, daß die allgemein als "schlagempfindlich" angesehene Diamantkrone anscheinend auch zum Hammerbohren verwendet werden kann. In einem Sandstein/Trachyt Konglomerat wurde eine Bohrgeschwindigkeit von 1,8 m/h erzielt /15/.

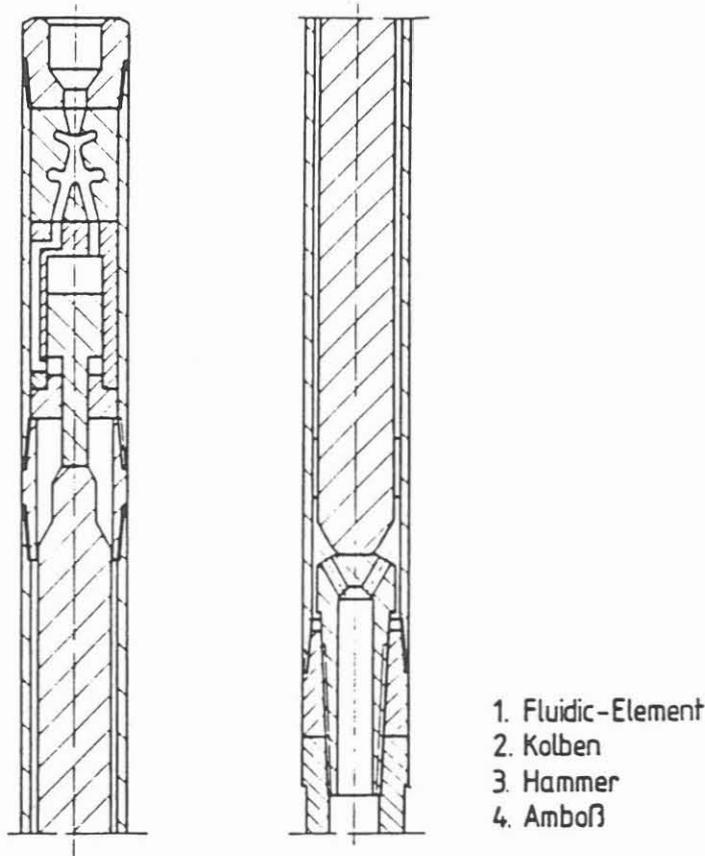


Abb. 4.3 : Schlagmechanismus mit Fluidik-Element /15/

4.2 Anwendung des Hammers in der Hauptbohrung

Die äußeren Abmessungen der Ringräume der Hauptbohrung sind durch das Bohr- und Verrohrungsschema gegeben. Verbunden mit der Planung der Kerngewinnung kann man die Einsatzgebiete des Hammers in zwei Bereiche einteilen.

Der erste Bereich ist die Strecke von der Oberfläche bis 3000 m bzw. 5000 m. Die Teufe richtet sich nach der Endteufe der Vorbohrung, die als Mindesttiefe 3000 m und als Option 5000 m vorsieht. Da die Bohrung durchgehend gekernt wird, ist ein Vorwärtskernen in diesem Bereich der Hauptbohrung nicht vorgesehen. Hieraus ergibt sich für den Bohrhämmer die Vorgabe, den gesamten Querschnitt des 14,75" Bohrlochdurchmessers zu bohren.

Hierbei soll der Bereich der ersten 500 m mit 17,5" Bohrlochdurchmesser erstellt werden. Nach dem Einbau einer 16" Rohrtour soll dann mit 14,75" Bohrlochdurchmesser auf 3000 - 5000 m weiter abgeteuft werden. Hierzu kann zuerst mit dem Hammer auf den ersten 500 m mit 14,75" ein Pilotloch gebohrt werden, das anschließend ebenfalls schlagend auf 17,5" erweitert wird. Erfahrungen des schlagenden Räumens mit 17,5" Durchmesser liegen hierzu vor.

Nach dem Einbau der 16" Rohrtour wird weiter mit dem 14,75" Durchmesser schlagend gebohrt. Die Auslegung des Hammers erfolgt nach dem Energie- und Frequenzbedarf an der Wirkstelle sowie nach den Ringraumverhältnissen. Letztere können durch die Auswahl des Gestängeaußendurchmessers beeinflusst werden. Die Optimierung des Hammereinsatzes wird durch das Zusammenwirken von Meißelauslegung mit den jeweiligen Betriebsparametern in Abhängigkeit vom Gestein gegeben.

Für das Schlagen des vollen Querschnitts ist der Einsatz eines sog. Kobra-Meißels (Schlagmeißel mit Hartmetallinserts ohne bewegliche Teile) am vorteilhaftesten. Die Meißelauslegung erfolgt hinsichtlich der Insertformen und -größen, der Besetzungsdichte und des Meißelprofils (Abbildung 4.4).

Bei den Inserts zeigen spitze Formen zwar ein aggressiveres Eindringverhalten, bei Hartgesteinen werden aber aus Verschleißgründen runde Profile eingesetzt. Die Insertdurchmesserfestlegung erfolgt im Zusammenhang mit der Schlagenergie und dem Besetzungsmuster und steht damit im Zusammenhang mit der Anzahl der Inserts. Für den angesprochenen Durchmesserbereich von 14,75" werden Insertdurchmesser von 10-12 mm verwendet. Die Schlagenergie für diese Inserts mit rundem Profil sollte 20-25 J betragen. Die Anzahl der Schneiden liegt dann im Bereich von 50-60 Stück. Hieraus ergibt sich für den Hammer eine Einzelschlagenergie von mindestens 1000 J.

Zur optimalen Gesteinszerstörung sollte der Hammer dabei einen Frequenzbereich von 20-60 HZ abdecken, da höhere Frequenzen ein Spröbruchverhalten erzeugen, das für die gewünschte Kraterbildung günstig ist. Dies ist insbesondere bei größeren Teufen wichtig, da hier das Gestein vom Spröbruch zur pseudoplastischen Verformung übergeht. Der Umsetzwinkel des Meißels liegt im Bereich von 15-22°. Im Zusammenhang mit der Frequenz ergibt sich hieraus ein Drehzahlbereich von 50-200 min⁻¹.

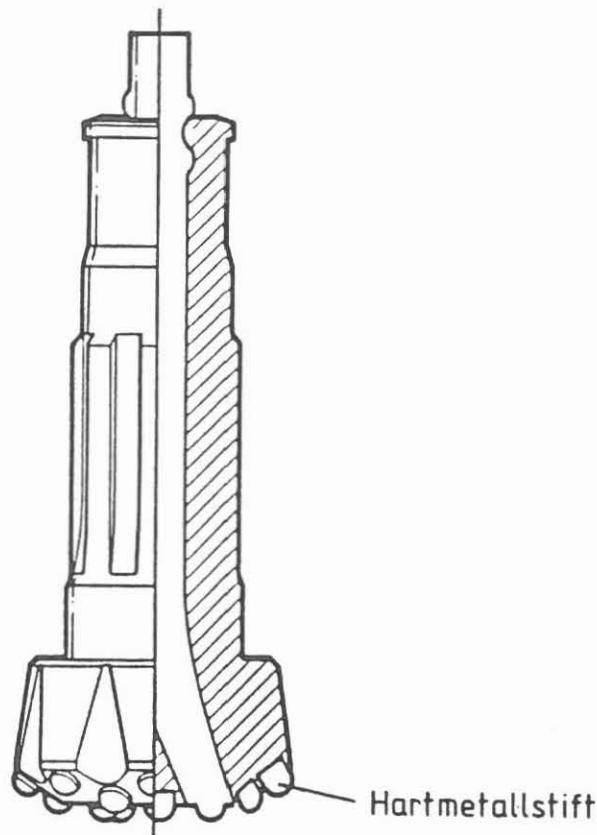


Abb. 4.5 : Festkopf-Meißel

Die Drehbewegung kann hierbei sowohl durch den Drehtisch als auch über einen Meißeldirektantrieb (PDM) erfolgen. Bei letzterem würde der Gestängeverschleiß reduziert.

Die Andruckkraft liegt im Bereich von 3-6 t. Ein wichtiger Punkt beim schlagenden Bohren ist der Kaliberverschleiß am Meißel, da ein maßhaltiges Bohrloch gebohrt werden soll. Hierzu wäre der Meißel mit Kaliberschutz beispielsweise aus PCD-Material und die Stabilisatoren mit entsprechenden Räumern zu bestücken.

Das Hauptaugenmerk der ersten 5000 m liegt in der Vertikalität des Bohrloches. Beim schlagenden Bohren ist die Vertikalität besser gewährleistet als beim drehenden Bohren, da die Andruckkräfte wesentlich geringer sind. Da beim Abteufen der Hauptbohrung die zu bohrenden Gesteinsschichten aus der Vorbohrung bekannt sind, ergibt sich eine leichtere Planung für den Hammereinsatz insbesondere beim Formationswechsel. Da für die Herstellung eines vertikalen Bohrloches der Einsatz der Zielbohrstange erwogen wird, besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, den Hammer in Verbindung mit diesem selbststeuernden Vertikalbohrsystem einzusetzen.

Der Hammer selber wird dabei zwischen Meißel und Zielbohrstange eingesetzt. Bei einem kontinuierlichen Durchströmprozeß der zufließenden Spülung durch Einsatz des Fluidik-Elementes würde das Druckpulssystem für die Datenübertragung der Zielbohrstange nicht gestört. Fluidik-Hämmer sind bisher für den 14,75" Durchmesser bei Bohren des vollen Querschnittes nicht entwickelt. Es wäre hier möglich, dieses Prinzip zu übernehmen und den Hammer entsprechend größer zu bauen.

Nach dem Abteufen der ersten 3000 bzw. 5000 m mit 14,75" Durchmesser wird ein 13 ³/₈" Casing eingebaut und in diesen eine 11 ³/₄" auswechselbare Verschleißrohrtour gehängt. Durch diese sind die äußeren hydraulischen Ringraumverhältnisse geben.

Das weitere Abteufen bis 10000 bzw. 12000 m soll mit 10 ⁵/₈" Bohrlochdurchmesser erfolgen. In diesem Abschnitt sollen mindestens 30% bis maximal 100% mit konventionellen bzw. Wirelinekern-bohrsystemen gekernt werden. Hiernach wird eine 9 ⁵/₈" Rohrtour eingebaut und so die neuen Ringraumverhältnisse gegeben. Das weitere Abteufen von 10000 bzw. 12000 m bis 14000 m erfolgt dann mit 8 ¹/₂" Durchmesser. Hierbei ist ein Kern von mindestens 30% vorgesehen. Für beide Abschnitte ist für den Hammereinsatz vom Bohren des vollen Querschnitts zum Kern überzugehen. Hierzu bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

Alternative 1: Der gesamte Durchmesser wird schlagend gekernt

Alternative 2: Durch eine Rollenbohrkrone hindurch wird ein kleines Bohrloch schlagend gekernt und auf den Enddurchmesser anschließend mit der Rollenbohrkrone erweitert.

Beide Alternativen sind für die Vertikalität des Bohrloches günstig, da die Schlagimpulse nicht durch die kritische Steckverbindung auf den Meißel gelangen, sondern auf ein stabilisiert geführtes Kernrohr geschlagen wird.

Bei der ersten Alternative gibt es vier mögliche Variationen :

- 1 Konventionelles Kern mit einem Bohrhammer. Ein entsprechender Fluidik-Bohrhammer für den 8 ¹/₂" Abschnitt steht mit 150 mm Außendurchmesser des Hammers zur Verfügung. Für den 10 ⁵/₈" Abschnitt befindet sich ein passender Hammer mit 250 mm Außendurchmesser im Bau.
- 2 Schlagendes Kern verbunden mit einem Drehantrieb durch PDM. Hierzu wäre der Hammer unterhalb eines Moineau-Motors einzusetzen. Gekernt wird konventionell.

- 3 Wireline-Kernen mit einem Bohrhammer. Hierbei wird das Innenkernrohr zusammen mit dem Schlagmechanismus gezogen. Das schlagende Wireline-Kernen ist in der Volksrepublik China erfolgreich im Einsatz. Die Kombination des Fluidik-Hammers mit einem, Wireline-System wäre möglich.
- 4 Wireline-Kernen mit Bohrhammer und Vorortdrehantrieb durch PDM. Ein Seilkernsystem mit Vorortantrieb ist vom ITE entwickelt worden. Hierbei wird der PDM zusammen mit dem Innenkernrohr eingesetzt. Der Schlagmechanismus müßte dann zwischen PDM und Kernrohr angeordnet werden. (Abbildung 4.6)

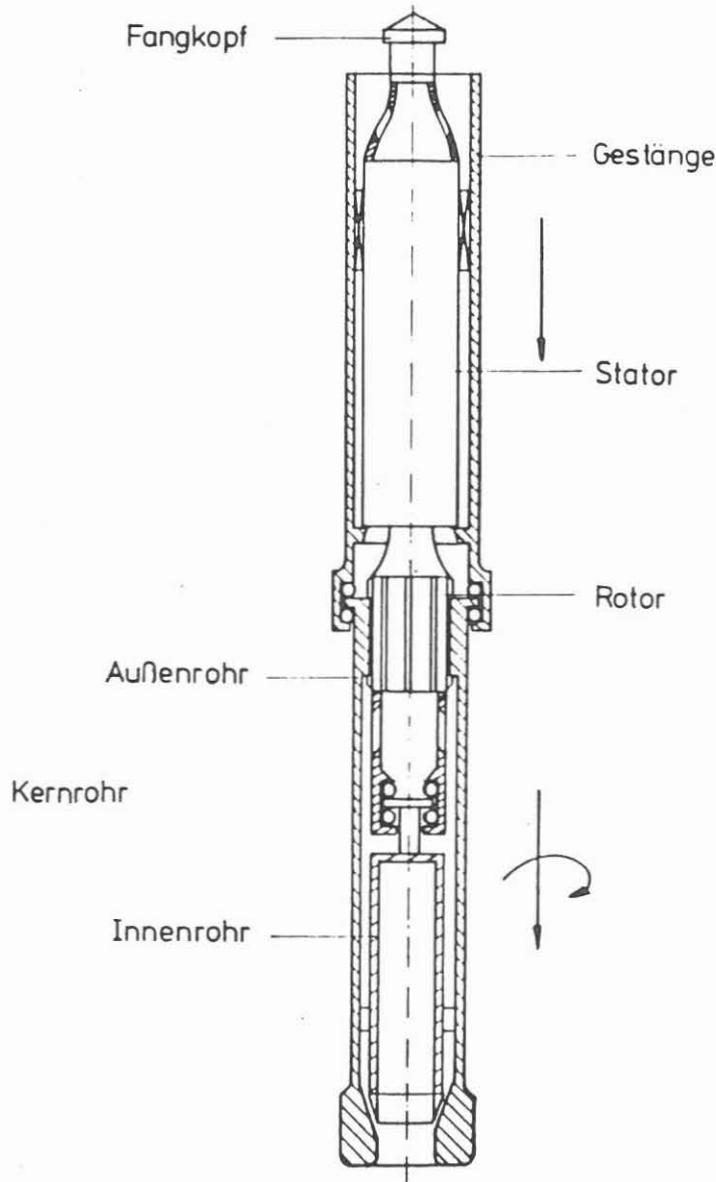


Abb. 4.6 : Seilkernsystem mit Vorortdrehantrieb (schematisch)

Der Vorteil des schlagenden Kernens gegenüber dem drehenden Kernen ist gegeben durch:

- eine höhere Bohrgeschwindigkeit
- eine größere Kronenstandlänge
- bessere Vertikalität des Bohrlochs
- Verringerung der Gefahr von Kernklemmern.

Bei der zweiten Alternative wird wie beim ODP-BHA durch die Rollenbohrkrone ein konventionelles Kernrohr vorangetrieben und mit seiner Krone am Wireline gezogen. Hier bestehen mehrere Möglichkeiten:

- 1 Den bestehenden Navi-Drill-Core-Barrel 2 (NCB-2) mit einem Schlagmechanismus einzusetzen. Der Hammer wird dann zwischen Navi-Drill und konventionellem Kernrohr eingesetzt. Die ganze Innengarnitur bestehend aus Krone, Kernrohr, Hammer und PDM wird am Wireline gezogen. Drehbewegung, Andruckkraft und Schlagbewegung werden hydraulisch aufgebracht.
- 2 Den Außenrohrstrang zur Erzeugung der Drehbewegung und des Drehmoments zu verwenden. Andruck und Schlagimpuls werden hydraulisch erzeugt. Der Navi-Drill entfällt hierdurch. Das Kernrohr gleitet dann mit dem Hammer und einem Drehmomentübertragungssystem in vertikalen Nuten im Außenkernrohr nach unten. Die Rollenbohrkrone braucht hierbei keinen Kontakt mit der Bohrlochsohle zu haben.

Der Vorteil der beiden Möglichkeiten der zweiten Alternative liegt in der Gelegenheit, mehrere Systeme abwechselnd einzusetzen:

- drehendes Kernen mit Rollenbohrkrone bei Wireline-ziehbarem Innenrohr
- drehendes Kernen mit NCB-2
- schlagendes Kernen mit NCB-2
- schlagendes Kernen ohne NCB-2

Da die Krone bei jedem Wireline-Roundtrip mitgezogen wird, kann sie je nach Verschleißzustand ausgetauscht werden. Die jeweiligen Schlagmechanismen mit dem Fluidik-Element stehen hier zur Verfügung. Auch für die 8 1/2" Rollenbohrkrone ist ein fertiger Hammer mit 54 mm Außendurchmesser vorhanden, der eine Krone mit 60 mm Außen- und 42 mm Innendurchmesser mit hohen Frequenzen beaufschlagen kann.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die seit Jahren weltweit vorangetriebene Suche nach Erdöl/ Erdgas -Lagerstätten wird in der nahen Zukunft eine immer größer werdende Anzahl von Bohrungen mit sich bringen, die in größere Teufenbereiche vordringen müssen. Diese Bohrungen werden in der Regel in Sedimentgestein abgeteuft, für das die Technik für eine erfolgreiche und wirtschaftliche Gesteinszerstörung entwickelt ist und einen hohen Grad an Zuverlässigkeit erreicht hat.

Probleme ergeben sich wenn harte und härteste Gesteinsschichten durchteuft werden müssen, die dem Eindringen von Meißel- oder Diamantschneiden einen großen Widerstand entgegensetzen. Die Diamanten werden beim Drehen einem hohen Verschleiß ausgesetzt und verlieren schnell ihre Wirksamkeit, während die Hartmetallstifte nur noch ungenügend in das Gestein eindringen können. Nun ist allgemein bekannt, daß die Bohrgeschwindigkeit in hartem Gestein beim Schlagbohrverfahren höher liegt und mit dieser Methode harte kristalline Gesteine gebohrt werden können, die mit drehenden, ritzenden Bohrmethoden nur sehr schlecht zerstört werden.

Bei den Bohrungen des Kontinentalen Tiefbohrprojektes handelt es sich um wissenschaftliche Forschungsbohrungen, die im Hartgestein der Lithosphäre abgeteuft werden. Dadurch unterscheiden sich Schwierigkeitsgrad und Aufgabenstellung erheblich von "normalen" Tiefbohrungen auf Erdöl- oder Erdgaslagerstätten. Dies konnte durch die Erfahrungen, die beim Abteufen der russischen Bohrung Kola SG-3 gemacht wurden bestätigt werden.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde alternativ zum Rotary-Bohren der Einsatz eines drehschlagenden Bohrverfahrens zum Abteufen der Kontinentalen Tiefbohrung in Erwägung gezogen. An der Realisierung eines drehschlagenden, spülungsgetriebenen Bohrhammers für den Bereich der Tiefbohrtechnik wurde schon mehrfach in der Vergangenheit gearbeitet. Das Vorhaben scheiterte immer an der hohen Störanfälligkeit des Hammers durch den Feststoffgehalt in der Spülung und den dadurch bedingten Verschleiß. Neuere Entwicklungen im Bereich der Schürfbohrtechnik lassen den Einsatz eines solchen Hammers erfolgreich erscheinen.

Entsprechend dem Grundkonzept soll bei KTB eine feststofffreie Spülung verwendet werden. Zusammen mit einer optimalen Spülsaufbereitung sind von daher gute Bedingungen für einen Bohrer gegeben. In der Volksrepublik China wurden ventillose Bohrhämmer (54-150 mm Außendurchmesser) mit Steuerung über ein Fluidik-Element entwickelt, die sehr gute Ergebnisse beim Vollbohren und Kernen erzielten. Bei der Salzgitter Maschinen AG ist ein spülungsgetriebener Bohrer in Entwicklung.

Die Studie soll dazu beitragen, die Grundlagen für den Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung darzustellen. In fünf Kapiteln wird der vereinbarten Aufgabenstellung nach ein Gesamtüberblick über den Wissensstand auf dem Gebiet des schlagenden Bohrens gegeben.

Im ersten Abschnitt wird in knapper Form ein Überblick über eine Literatursammlung zum Stand der Tiefbohrtechnik gegeben, in dem auch die anderen Wirkmechanismen der Gesteinszerstörung (Ritzen, Drücken, Spanen) eingeschlossen sind. Es zeigt sich, daß die Grundlagen der Tiefbohrtechnik (als Rotary-Technik) bereits vorliegen. Daher bringen gerade in jüngerer Zeit nur einige wenige Arbeiten neue Erkenntnisse über den Gesteinszerstörungsprozeß. Diese Arbeiten wurden kurz vorgestellt. Im zweiten Kapitel folgt eine Literaturstudie zum Stand der Schlagbohrtechnik, die auch Einsatzmöglichkeiten und -grenzen sowie ausgeführte Konzepte beinhaltet. Hier zeigte sich, daß die funktionelle Verknüpfung der entscheidenden Parameter wie Schlagenergie, Schlagfrequenz, Energieübertragungsgrad, Andruckkraft und Umsetzwinkel äußerst komplex ist und noch nicht alle Zusammenhänge geklärt sind, die den Bohrprozeß beeinflussen.

In einem weiteren Abschnitt wurden die Einsatzbedingungen in übertiefen Bohrungen unter den speziellen Anforderungen der wissenschaftlichen Untersuchungen für KTB beschrieben. Dabei wird auf das besonders kritische Verhalten von Gesteinen unter hohen Temperaturen eingegangen. Der aus diesen Bedingungen resultierende Mechanismus des Kriechens und der Einfluß verschiedener Parameter auf die Kriechverformung läßt Probleme dieser Art für den Temperaturbereich des KTB (über 250 °C) durchaus wahrscheinlich erscheinen. Dieses Verhalten hängt aber wiederum stark von der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins ab, so daß endgültige Aussagen hierüber noch nicht gemacht werden können.

Im vierten Abschnitt wurde dann auf die Hammerwirksamkeit unter Bohrlochsbedingungen eingegangen und verschiedene Hammertypen wurden vorgestellt. Die Grundlagen der Hammerauslegung wurden angesprochen und ein möglicher Einsatz des Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung wird diskutiert. Dabei werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten und die daraus resultierenden Vorteile des Hammerbohrens vorgestellt. Insbesondere für den zu kernenden Bereich des Bohrloches ist mit einer höheren Bohrgeschwindigkeit, einer größeren Kronenstandlänge, einer verbesserten Vertikalität des Bohrloches und der Verringerung der Gefahr von Kernklemmern zu rechnen.

Insgesamt erscheint ein effektiver Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung durchaus möglich und sehr erfolgversprechend zu sein. Eine endgültige Bewertung dieses Bohrverfahrens kann natürlich erst erfolgen wenn nach einer intensiven Testphase mit den verschiedenen möglichen Hammertypen konkrete Ergebnisse vorliegen. Aufgrund der hier durchgeführten Untersuchung von bestehender Literatur und vorliegenden Forschungsergebnissen kann allerdings eine verstärkte weitere Entwicklung dieses Bohrverfahrens ohne Einschränkungen empfohlen werden.

- Literaturverzeichnis

- /1/ MAURER, W.C. (1965): Bit-Tooth Penetration under Simulated Borehole Conditions - J.Pet.Tech., Dec. 1965, S. 1433-1442
- /2/ GNIRK, P.F.; CHEATHAM, J.B. (1965): An Experimental Study of Single Bit-Tooth Penetration into Dry Rock at Confining Pressures 0 to 5000 psi - SPE Journal, June 1965, S.117-130
- /3/ LINGEN, N.H. van (1964): Ursachen des kleinen Bohrfortschrittes auf Teufe - Erdöl, Erdgas, Petrochemie 17(1964), S.266-272
- /4/ GARNER, N.E.(1967): Cutting Action of a Single Diamond under Simulated Borehole Conditions - SPE paper 1701
- /5/ SWENSON, D.V.; WESENBERG, D.L. (1981): Analytical and Experimental Investigations of Rock Cutting Using Polycrystalline Diamond Compact Drag Cutter - SPE paper 10150, San Antonio, Texas
- /6/ WARREN, T.M.; SMITH, M.B. (1985): Bottom Hole Stress Factors Affecting Drilling Rate at Depth - J. Pet. Tech., August 1985, S.1523-1533
- /7/ JOHNSON, V.E. et al (1983): The Development of Structured Cavitating Jets for Deep Hole Bits - SPE paper 11060, New Orleans, Louisiana
- /8/ BRENNSTEINER, E. (1975): Neuere Erkenntnisse über die Wirkungsweise des schlagenden Bohrens - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 120(1975)2, S.60-68
- /9/ BRENNSTEINER, E.(1979): Untersuchungen über die Zusammenhänge beim schlagenden Bohren mit hydraulischen Hammerbohrmaschinen - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 124(1979)10, S.473-481
- /10/ BRENNSTEINER, E.(1978): Untersuchungen über die Zusammenhänge beim schlagenden Bohren mit hydraulischen Hammerbohrmaschinen - Dissertation, Montanuniversität Leoben
- /11/ WANG, R.et al (1985): Hydro-Percussive-Rotary Drilling Equipment and Technology - Proc Workshop on Drilling Sampling and Borehole Logging, VR China
- /12/ XIANG, Z. (1985): Hydro-Percussive-Rotary Type Wire-Line Coring System - Proc. Workshop on Drilling, Sampling and Borehole Logging, VR China
- /13/ JIANG, R. (1985): Fluidic Type Hydro-Percussive-Rotary Drilling Tool - Proc. Workshop on Drilling, Sampling and Borehole Logging, VR China

- /14/ WU, J. (1987): Bericht über hydraulische Bohrhämmer Chinas - unveröffentl. Bericht ITE Clausthal
- /15/ WU, J. (1987): Bohren im Hartgestein (unter besonderer Berücksichtigung der chinesischen Literatur) - Studienarbeit, ITE Clausthal
- /16/ SCHWATE, W. (1983): Handbuch der Gesteinsbohrtechnik - VEB Deutscher Verl. für Grundstoff-Ind., Leipzig
- /17/ HARTMANN, H.L. (1959): Basic Studies of Percussion Drilling - Mining Engineering (1959)1, S.68-75
- /18/ HUSTRULID, W.A.; FAIRHURST, C. (1971): A Theoretical and Experimental Study of the Percussive Drilling of Rock - Part I-IV - Int.J.Rock Mech.Min.Sci.8, S.311-333, S.335-356, 9, S.417-429, S.431-449
- /19/ SIMON, R. (1964): Transfer of the Stress Wave Energy in the Drill Steel of a Percussive Drill to the Rock - Int.J.Rock Mech.Min.Sci. (1964)1, S.397-411
- /20/ LUNDBERG, B.(1982): Microcomputer Simulation of Stress Wave Energy Transfer to Rock in Percussive Drilling - Int.J.Rock Mech.Min.Sci. 19(1982)5, S.229-239
- /21/ LUNDBERG, B.(1973): Energy Transfer in Percussive Rock Destruction - Part I,II,III Int.J.Rock Mech.Min.Sci. 10(1973), S.381-399 + S.401-419
- /22/ DUTTA, P.K. (1972): A Theory of Percussive Drill Bit Penetration - Int.J.Rock Mech.Min.Sci. 9(1972), S.543-567
- /23/ WHITELEY, M.C.; ENGLAND, W.P. (1986): Air Drilling Operations Improved by Percussion Bit/Hammer Tool Tandem - SPE Drilling Eng. Oct. 1986, S.377-386
- /24/ MARX, C. (1967): Über die Gesteinszerstörung in großer Teufe beim drehenden Bohren - EEZ 83(1967) Nr.10 S.354-363
- /25/ EVERLING, G. (1960): Der Spannungszustand im unverritzten Gebirge - Glückauf 96(1960)19, S.1199-1202
- /26/ MURRAY, A.S.; CUNNINGHAM, R.A. (1955): Effect of Mud Column Pressure on Drilling Rates - Trans. AIME 204 S.196-204
- /27/ MARX, C.; RISCHMÜLLER, H. (1986): Drilling and Coring Techniques for Hard Rock - Erdöl, Erdgas, Kohle 102 (1986), S.333-337