

KTB REPORT 88-5

**Forschung und Entwicklung
im Fachbereich Technik**

**Kurzfassungen der bisher bearbeiteten
F+E-Projekte**



Herausgegeben von der
Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

C. Chur, B. Engeser, B. Hoffers, H. Rischmüller, A. Sperber, L. Wohlgemuth

Redaktion: M. Frühwald, M. Schaefer, A. Sperber

Druck: A. Bernecker, 3508 Melsungen

Titelbild: Laser-optische Vermessung eines mit dem selbsttätig steuernden Zielbohrsystems lotrecht abgeteuferten Bohrloches von 191 m Länge im Bergwerk Waterschei, Belgien

Die diesen Berichten zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert. Die Verwertung des im Rahmen der F- und E-Projekte erarbeiteten Know-how und aller ggf. entstandenen schutzrechtsfähigen Innovationen steht grundsätzlich dem NLFB zu. Interessenten werden gebeten, sich an die Projektleitung des KTB zu wenden.

Anschrift des Herausgebers: Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Postfach 51 01 53, D - 3000 Hannover 51, Telefon (05 11) 6 43-26 70.

VORWORT

Die vom Fachbereich Technik der KTB-Projektleitung initiierten und betreuten Forschungs- und Entwicklungsprojekte bilden einen integralen Bestandteil im technischen Gesamtkonzept des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland.

Die in diesem Band zusammengestellten Kurzfassungen sind in fünf Themenkreise unterteilt:

- Allgemeine Untersuchungen zu Bohrbarkeit und Bohrverfahren,
- Entwicklung von Bohrwerkzeugen und Untertageequipment,
- Bohrplatz und Bohranlage,
- Spülung, Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle,
- Spezialuntersuchungen.

Zunächst galt es, den aktuellen Stand der Technik festzustellen und zu untersuchen, ob dieser den hochgesteckten technischen und wissenschaftlichen Zielen des KTB-Projektes gerecht wird. Davon ausgehend war in einigen Bereichen noch "technische Grundlagenforschung" erforderlich. Überwiegend haben die technischen Forschungs- und Entwicklungsprojekte jedoch die Aufgabe, bestehende Techniken zielgerichtet zu optimieren oder auch neue Technik bis zur Einsatzreife zu entwickeln.

Der mit der bisherigen technischen Durchführung des KTB-Projektes vertraute Leser wird feststellen, daß die mit diesen F- und E-Arbeiten erzielten Ergebnisse zum Teil bereits bei der Durchführung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms berücksichtigt wurden. Dies gilt insbesondere für die in der Vorbohrung eingesetzte Bohrtechnik, aber auch für die Vorbereitung und Planung der Hauptbohrung.

Die bisher erzielten Erfolge der F- und E-Projekte im technischen Bereich waren nur möglich durch die konsequente und vertrauensvolle Zusammenarbeit von KTB-Projektleitung, DFG-Schwerpunkt, Hochschulen und Industrie, die mit großem Engagement und zum Teil erheblichen finanziellen Eigenbeteiligungen dazu beigetragen hat.

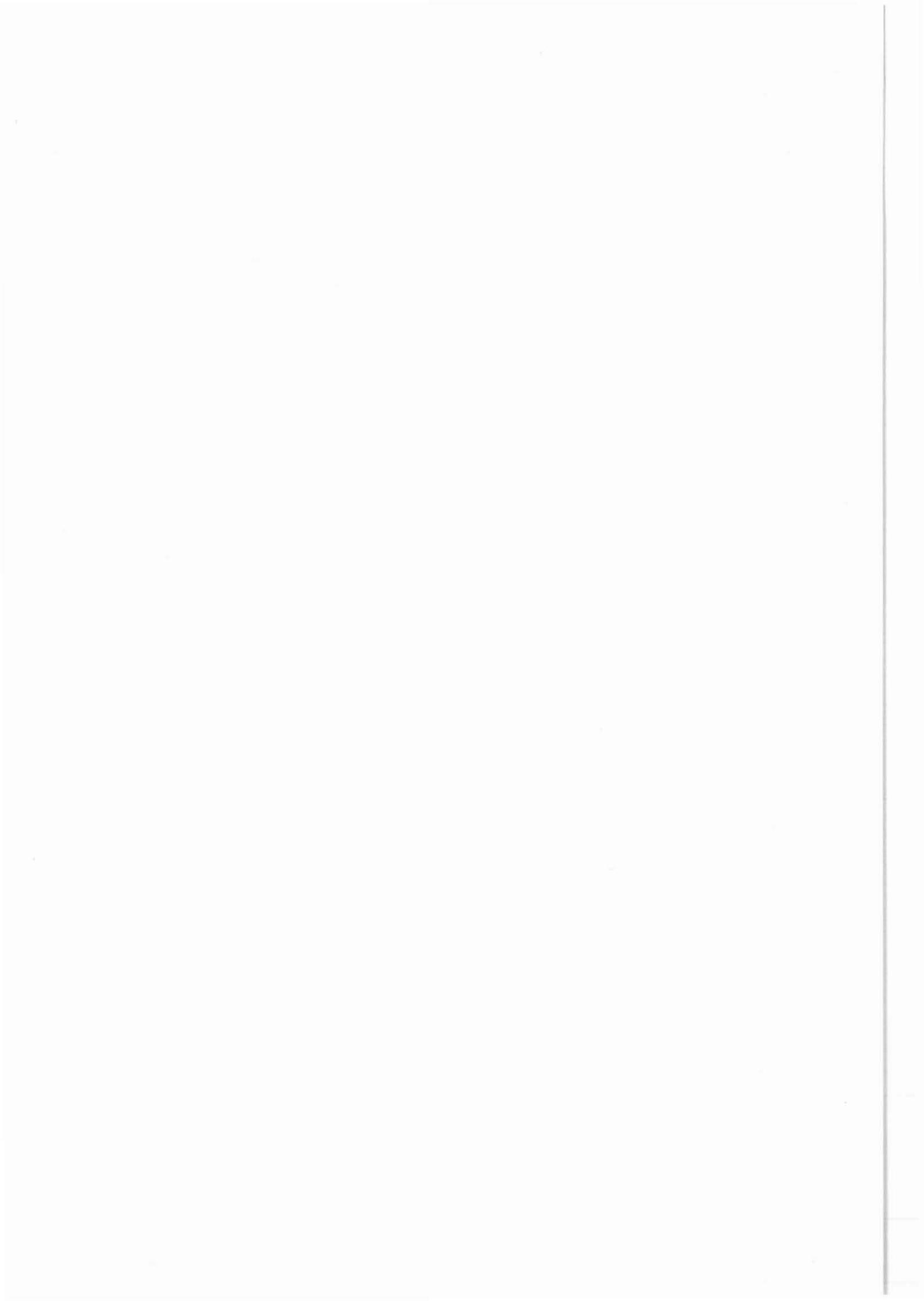
Die Beibehaltung dieser fruchtbaren Zusammenarbeit auch für die zukünftig zu bewältigenden Projekte ist eine grundlegende Voraussetzung, um die noch anstehenden Aufgaben im KTB fristgerecht zielorientiert abzuwickeln und die ehrgeizigen wissenschaftlichen Ziele zu erreichen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A Allgemeine Untersuchungen zu Bohrbarkeit und Bohrverfahren.....	1
B Entwicklung von Bohrwerkzeugen und Untertageequipment.....	215
C Bohrplatz und Bohranlage.....	349
D Spülung, Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle.....	421
E Spezialuntersuchungen.....	543
A Allgemeine Untersuchungen zu Bohrbarkeit und Bohrverfahren.....	1
1. Untersuchung der Mechanismen beim Bohren in Hartgesteinen zur Optimierung des Bohrprozesses.....	3
2. Auswertung von Erfahrungen beim Bohren in Hartgestein.....	33
3. Vergleichende Untersuchung bohrtechnischer und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher Kernbohrverfahren.....	53
4. Grundlagen für den Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung.....	85
5. Untersuchung zur Entwicklung eines hydraulischen Bohrhammers mit Antrieb und Steuerung durch die Spülflüssigkeit für Tiefbohrungen im Hartgestein in Teufen bis 14 000 m.....	119
6. Erarbeitung eines Konzeptes für die weitere Entwicklung von Systemen zum kontinuierlichen Vorwärtskernen und zum Seitenkernen in der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB).....	135
7. Kernbohren im Hartgestein - Seitenkerntechnik.....	181

B	Entwicklung von Bohrwerkzeugen und Untertageequipment.....	215
1.	Untersuchungen zur Beanspruchung von Bohrsträngen für übertiefe Bohrungen.....	217
2.	Werkstoffauswahl und Konzept für das Bohrgestänge im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland.....	257
3.	Erarbeitung eines Konzeptes für die weitere Entwicklung von Untertageantrieben, insbesondere Verdrängermotoren und Turbinen, zum Einsatz in der Kontinentalen Tiefbohrung.....	279
4.	Einsatz eines selbsttätig steuernden Zielbohrsystems zur Herstellung eines lotrechten, tiefen Bohrlochs beim Kontinentalen Tiefbohrprogramm KTB.....	327
C	Bohrplatz und Bohranlage.....	349
1.	Bohrplatzoptimierung.....	351
2.	Das Konzept für die Bohranlage (Neubau).....	367
3.	Entwicklung eines Konzeptes zum Umbau und zur Optimierung einer bestehenden Bohranlage entsprechend den besonderen Anforderungen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB).....	389
D	Spülung, Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle.....	421
1.	Untersuchung zum Spülungssystem für die Vorbohrung.....	423
2.	Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle.....	489
3.	Austragsfähigkeit von Cuttings.....	511
E	Spezialuntersuchungen.....	543
1.	Untersuchungen der Möglichkeiten zur Sammlung und Auswertung von Meßwerten aus dem Bohrlochsohlenbereich durch Bit-noise-Analyseverfahren.....	545
2.	Richtungskontrolle, Havarie und Casingverschleiß in übertiefen und heißen Bohrlöchern.....	575

A. Allgemeine Untersuchungen
zu Bohrbarkeit und
Bohrverfahren



Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Untersuchung der Mechanismen
beim Bohren in Hartgesteinen
zur Optimierung des
Bohrprozesses

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

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielsetzung.....	6
2. Arbeitsprogramm.....	6
3. Ergebnisse.....	9

1 Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes werden Ursache und Abläufe der Gesteinszerstörung bei verschiedenen Bohrtechniken im Hartgestein untersucht, um im Hinblick auf die Kontinentale Tiefbohrung Aussagen über die Optimierung des Bohrprozesses zu gewinnen.

Die Betrachtungsweise erfolgt hierbei durch Auswertung von bisher veröffentlichten Literaturstellen, in denen insbesondere die Mechanismen der Gesteinszerstörung im Hartgestein beschrieben werden, sowie durch experimentelle Untersuchungen der einzelnen Bohrprozesse in einem umfangreichen Versuchsprogramm.

Das Projekt gliedert sich in folgende Unterziele:

1. Erstellen eines Statusberichtes über die Gesteinszerstörung beim Bohren im Hartgestein
2. Aufbau bzw. Weiterentwicklung von Prüfständen für die Prozesse Drücken und Schlagen
3. Experimentelle Bestimmung der Wirksamkeit der Gesteinszerstörung beim Bohren im Hartgestein unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen
4. Entwicklung von Bewertungskriterien zur Beurteilung der Wirksamkeit der Gesteinszerstörungsmechanismen für verschiedene Hartgesteine
5. Ableitung von Empfehlungen für die Gestaltung der Bohrwerkzeuge für das Bohren im Hartgestein für die verschiedenen Mechanismen der Gesteinszerstörung

2 Arbeitsprogramm

Durch systematische Untersuchungen an ausgewählten Hartgesteinen soll die Wirksamkeit der verschiedenen Methoden der Gesteinszerstörung mit den Mechanismen

- Ritzen
- Drücken
- Schlagen

sowohl unter atmosphärischen Bedingungen, als auch für exemplarische Versuche im Bohrautoklaven untersucht werden.

Eine Übersicht über die Mechanismen der Gesteinszerstörung, die im Rahmen der Bohrung im Hartgestein für KTB untersucht werden, ist in Abb. 1 dargestellt.

Die experimentellen Untersuchungen analysieren den Gesteinszerstörungsablauf in der Bohrtechnik als das Zusammenwirken des Gesteins - als Werkstück - , des Bohrmeißels - als Werkstück - der Bohrparameter als prozeßspezifische Kenngrößen.

Die in der Tiefbohrtechnik angewendeten Arten der mechanischen Gesteinszerstörung lassen sich, bezogen auf die Wirkstelle in drei Elementarverfahren einteilen:

- Drückende Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit Rollenmeißeln. Eine als Zahn oder Hartmetallinsert ausgebildete Einzelschneide wird durch das auflastende Gewicht der Schwerstangen und die Abrollbewegung der Kegelrollen auf der Bohrlochsohle mit einer schwellenden Andruckkraft in das Gestein gedrückt und bewirkt einen kraterförmigen Einbruch.
- Ritzen Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit Diamantmeißeln. Der Diamant als Einzelschneide wird konstant belastet und zerspant durch die Drehbewegung des Gesteins.
- Schlagende Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit einem Bohrhammer. Das Insert wird mit einer konstanten Andruckkraft und einer schwellenden Schlagbeanspruchung beaufschlagt.

Die Versuchsanlagen zur Durchführung des experimentellen Arbeitsprogrammes sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Darstellung der in der Tabelle 1 aufgeführten Bohrprüfstände erfolgt in den Abbildungen 2-10. Der Status in der Tabelle bezieht sich auf den Stand zu Beginn des KTB-Projektes.

Des Weiteren ist die Zuordnung der Arbeitsprogramme zu den jeweiligen Bohrprüfständen der Tabelle zu entnehmen. Das Arbeitsprogramm gliedert sich in das eigentliche Bohrprogramm (Arbeitsprogrammpunkte 1-4.3), das an den Bohrprüfständen durchgeführt wird und die Funktionsüberprüfung des hydraulischen Bohrhammers (Arbeitsprogrammpunkt 5)

Arbeitsprogramm (1): ritzendes Bohren, atmosphärisch

Das Arbeitsprogramm (1) besteht aus der Untersuchung des ritzenden Bohrens unter atmosphärischen Bedingungen. Versuchsanlage ist der Bohrprüfstand 3 (Abb.2), bei dem eine Werkzeugschneide von einem hydraulischen Zylinder in eine drehende Gesteinsscheibe gedrückt wird. Es werden ausschließlich Diamantschneiden bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten (v_s) und Andruckkräften (F_A) getestet. Gemessen werden die spezifische Schnitttiefe, die spezifische Energie, der spezifische Verschleiß, die Schnittkraft und der Kopplungsfaktor als Quotient aus Schnitt- und Andruckkraft. Diese Meßgrößen werden als Funktion der eingestellten Werte (F_A , v_s) graphisch dargestellt.

Arbeitsprogramm (2): drückendes Bohren, atmosphärisch

Beim Arbeitsprogramm (2) werden die Mechanismen beim drückenden Bohren unter atmosphärischen Bedingungen untersucht. Die Versuche erfolgen am Bohrprüfstand 4 (Abb.3), einer Druckprüfanlage. Hierbei werden Hartmetallstifte verschiedener Kontur in Gesteinszylinder bei unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit eingedrückt. Es werden die Andruckkraft als Funktion der Eindringtiefe, die spezifische Energie und der Schwellenwert der Gesteinszerstörung festgehalten.

Arbeitsprogramm (3): schlagendes Bohren, atmosphärisch

Im Arbeitsprogramm (3) wird das schlagende Bohren unter atmosphärischen Bedingungen betrachtet. An zwei Versuchsständen wird das elektro-pneumatische (Bohrprüfstand 5.1, Abb.4) und das hydraulische Schlagen (Prüfstand 5.2, Abb.5) erprobt. Bei unterschiedlichen Andruckkräften und Schlagzahlen werden die spezifische Energie und die Bohrgeschwindigkeit gemessen. Hierzu werden für das elektro-pneumatischen Schlagen handelsübliche Schlag-, Spiral- und Schaftbohrwerkzeuge eingesetzt. Für das hydraulische Schlagen werden mit Hartmetall bestückte Stiftschlagbohrer für Versenkhammer mit unterschiedlicher Bestückung verwendet.

Arbeitsprogramm (4): Hochdruckbohrautoklavversuche

Das Arbeitsprogramm (4) untersucht die in den Teilen (1) - (3) betrachteten Mechanismen Ritzen, Drücken und Schlagen unter Lagerstättenbedingungen. Die Versuche werden am Hochdruckbohrautoklaven, Prüfstand 2, Abb 6, durchgeführt.

Das Unterteil des Autoklaven wird für ritzendes, drückendes und schlagendes Bohren mit verschiedenen Aufbauten bestückt (Abb. 7 - 9). Die Versuchsreihe "schlagendes Bohren" wird mit dem elektro-pneumatischen Bohrhammer durchgeführt. Die Einstell- und Meßgrößen richten sich nach den in den Arbeitsprogrammen (1) - (3) erzielten Ergebnissen.

Arbeitsprogramm (5): Hydraulikhammer, Hochdruckprüfung

Im Arbeitsprogramm (5) wird das Verhalten des im Arbeitsprogramm (3.2) unter atmosphärischen Bedingungen getesteten Hydrohammers unter hohem hydraulischem Systemdrücken untersucht. Diese Funktionsüberprüfung bei Drücken bis 1500 bar erfolgt in der Rohrprüfanlage 2 (Abb. 10).

3 Ergebnisse

Die systematische Untersuchung erfolgt an ausgewählten Hartgesteinen mit verschiedenen Bohrwerkzeugen und Bohrparametern, sowohl unter atmosphärischen, als auch unter simulierten Bohrlochbedingungen an insgesamt acht verschiedenen Bohrprüfständen des Institutes, wobei die jeweiligen Leistungskenngrößen ermittelt werden. Die gemeinsame prozessspezifische Kenngröße aller drei Mechanismen, die als Vergleich für die Bohrbarkeit herangezogen wird, ist die spezifische Energie als die aufzuwendende Arbeit, bezogen auf das zerstörte Gesteinsvolumen J/cm^3 .

Bei der energetischen Betrachtung zeigt sich deutlich die Überlegenheit des Drückens und Schlagens gegenüber dem Ritzen, da beim Diamantbohrwerkzeug die Energiewerte im Hartgestein wesentlich höher liegen. Obwohl das drückende Bohren bei den Energiewerten am günstigsten abschneidet, können diese nicht als alleinige Kenngröße herangezogen werden, da der Kratereinbruch nur im Zusammenhang mit der Überschreitung eines Andruckschwellenwertes auftritt, der als weitere Kenngröße betrachtet werden muß. (Abb. 11)

Bei der Aufgliederung des Arbeitsprozesses beim drückenden Bohren tritt bei Belastung der Schneide diese bei Überschreiten der Druckfestigkeit in das Gestein ein, wobei sich unter ihr ein Keil von feinstgebrochenem Gesteinsmaterial ausbildet. Erst bei wesentlicher Erhöhung der Andruckkraft kommt es bei weiterer Zusammenpressung des Keils zur Überschreitung der Scherfestigkeit infolge der Schubbeanspruchung. Um eine Rißbildung in Gang zu setzen muß die übertragene Druckspannung diesen Schwellenwert der Kraterbildung überschreiten, so daß sich das Krater-volumen löst. Gelingt es durch Lastaufgabe auf den Meißel nicht, diesen Schwellenwert zu überschreiten, bleibt es bei der Bildung des feinstgebrochenen Gesteinskeils und dem Bohrprozess ineffektiv.

Die Druckfestigkeit und der Schwellenwert liegen bei Hart-gestein wesentlich über denen der Sedimente. Beim Bohren mit Rollenmeißeln ist eine Erhöhung der Last aber nicht unbegrenzt möglich, da die Lager der Kegelrollen eine Grenze setzen, die bei etwa 3 t/Zoll Bohrlochdurchmesser liegt.

In dem Versuchsprogramm wurden verschiedene Einzelschnei-den in magmatische Gesteine gedrückt (Abb. 12). Es zeigte sich, daß bei zunehmender Gesteinsfestigkeit der Schwel-lenwert der Andruckkraft stieg. Pro Schneide sind durch-schnittlich 6 - 8 t Andruck mit Spitzenwerten von 10 - 12 t notwendig. Übertragen auf einen Rollenmeißel heißt dieses Ergebnis, daß bei normalerweise sechs Schneidelementen, die sich gleichzeitig im Eingriff befinden, eine Meißel-last von 40 - 50 t und mehr erforderlich ist. Diese Last ist doppelt so hoch, wie die zulässige Belastung eines 8½" Warzenmeißels. Um den durch die Auflast erzeugten Druck unter den Schneiden zu erklären, ist es möglich, eine andere Schneidengeometrie zu wählen, die ein aggressiveres Eindringen erlaubt. Diese spitzen Schneiden sind aber stärkerem Verschleiß unterworfen als die abgerunde-ten. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verkleinerung der Schneiden, was aber eine Verringerung des Kratervol-umens bedeutet. Die Reduzierung der Schneidenanzahl zur Minimierung der Kontaktfläche führt zu einer Ver-ringerung des Kratervolumens pro Umdrehung. Eine Kompen-sation dieses unerwünschten Effektes durch Erhöhung der Meißeldrehzahl ist nur sehr begrenzt möglich, da Rollen-meißel nur in bestimmten Drehzahlbereichen optimal laufen. So zeigt es sich, obwohl das drückende Bohren im Hartgestein energetisch günstig ist, daß die Tragfä-higkeit der Lager durch die erforderliche Meißellast überschritten wird, und somit der Effektivität des drük-kenden Bohrprozesses im Hartgestein materialbedingte Grenzen gesetzt sind.

Für das ritzende Bohren sind die geometrischen Verhältnisse beim Einzeldiamanten dargelegt: (Abb. 13) Die Einzeldiamanten sind zu $\frac{2}{3}$ ihres Durchmessers in der Matrix eingebettet. Die Schnitttiefe beträgt $\frac{1}{30}$ des Durchmessers, die Spurbreite das Zehnfache der Schnitttiefe. Der zerspannte Gesteinsvolumenstrom ist somit von der Größe der einzelnen Diamanten abhängig. Die Andruckkraft bestimmt die Schnitttiefe, die nicht mehr als 10% des Exposures betragen sollte, um die Bohrlochsohlenreinigung nicht zu behindern.

Die größten Schnitttiefen treten also bei größeren Diamanten, d.h. bei oberflächengesetzten Diamantwerkzeugen auf.

Das kristalline Hartgestein verursacht insbesondere bei hohem Quarzgehalt im Granit starken Verschleiß der Diamantschneiden. Hierdurch sinkt in starkem Maße die Schnitttiefe, und das Bohrwerkzeug verliert seine Wirksamkeit und muß ersetzt werden. Der Vergleich von Bohrfortschritt und imprägniertem Diamantmaterial zeigt zu Beginn der größeren Schnitttiefe bei SS-Diamanten (Abb. 14); dieser Wert sinkt jedoch verschleißbedingt rasch ab, während bei imprägnierten Kronen zwar geringere Schnitttiefen infolge des kleineren Diamantenmaterials erreicht, jedoch durch die Freilegung immer neuer Diamantsplitter die Bohrgeschwindigkeit konstant gehalten werden kann und längere Standzeiten erzielt werden. Neben den SS- und imprägnierten Bohrwerkzeugen wurden auch Schneidelemente aus künstlichem polykristallinen Diamantmaterial in Form von PCD-Schneidplatten und TSD-Prismen auf ihre Eignung im Hartgestein untersucht (Abb. 15). Das Schnittverhalten beider Bauformen entspricht dem der SS-Diamanten, wobei die PCD-Schneiden als ungeeignet angesehen werden müssen.

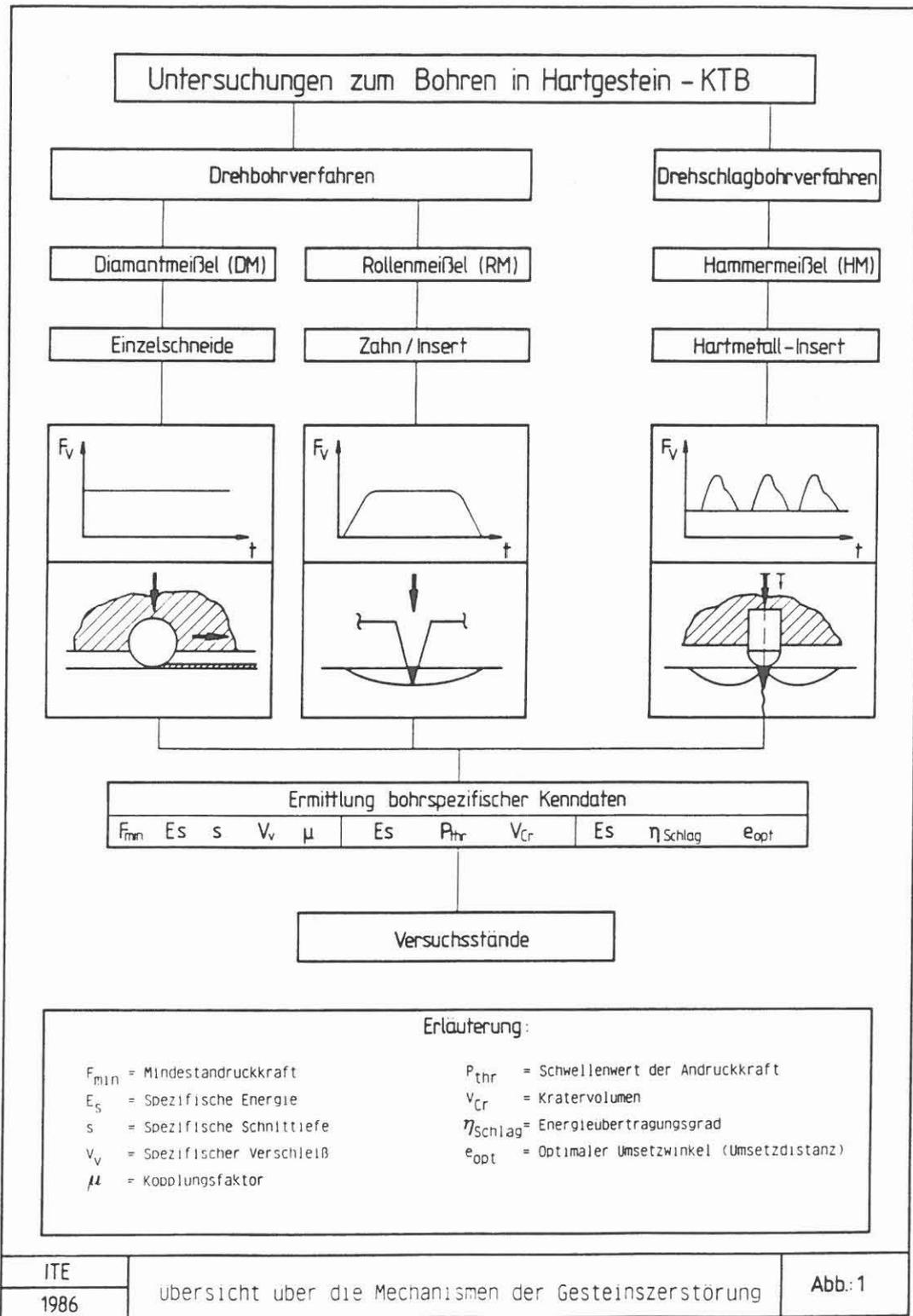
Beim schlagenden Bohren bewirkt die in das Gestein übertragene Druckspannungswelle eine Verformung der obersten Gebirgsschichten unter den Schneidelementen (Abb. 16). Diese Zone wird komprimiert, wobei sie sich in einer keilförmigen Ausbildung vertieft. Ab einer gewissen Phase kann dieser Gesteinskeil keine Verformungen mehr aufnehmen, und es baut sich im umliegenden Gesteinsbereich ein erhöhter Spannungszustand auf. Dabei kommt es dann zum Ausbrechen einzelner Gesteinspartikel.

Der schlagenden Bewegung ist eine Drehbewegung überlagert. Sie sorgt beim Bohrprozeß dafür, daß das Schneidelement seine Druckimpulse an eine noch unzerstörte Gesteinsoberfläche übertragen kann. Neben der Einleitung der Drehbewegung und der Erzeugung eines Schlagimpulses ist es beim drehschlagenden Bohren notwendig, den Bohrmeißel zusätzlich mit einer statischen Andruckkraft zu beaufschlagen.

Für diese Kraft gilt es, den optimalen Wert zu bestimmen, so daß der Meißel immer in Kontakt mit der Bohrlochsohle bleibt. Ist diese Kraft zu gering, geht ein Teil des Schlagimpulses durch Reflexion am Bohrmeißel verloren. Eine zu hohe Andruckkraft bringt keine Steigerung der Bohrgeschwindigkeit, erhöht aber den Verschleiß erheblich. Neben der Andruckkraft sind die anderen Parameter in Zusammenhang mit der Meißelgestaltung zu optimieren:

- Schneidenform
- Einzelschlagenergie
- Besetzungsmuster
- Drehzahl (Umsetzwinkel)

Die schlagende Gesteinszerstörung erweist sich in Bezug auf Standlänge und Bohrfortschritt als optimal im Hartgestein. Die heute üblichen Verfahren zum Bohren im kristallinen Gestein arbeiten daher auch größtenteils mit dem Prinzip der schlagenden Gesteinszerstörung. Das spröde Bruchverhalten des kristallinen Gesteins begünstigt den schlagenden Bohrprozeß. Es kann daher aus der Sicht der Gesteinszerstörung als das effektivste Verfahren angesehen werden.



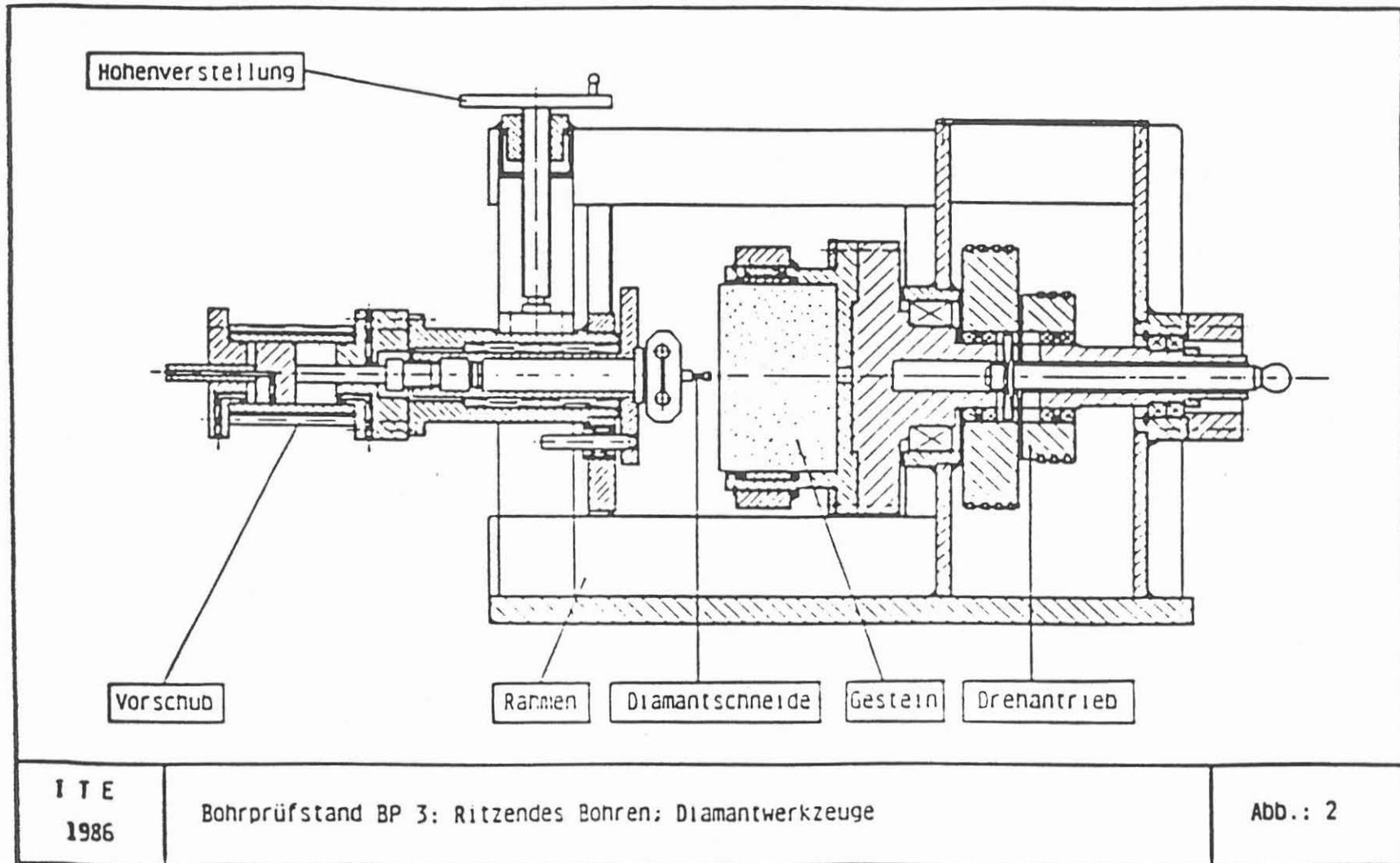
Lfd. Nr.	Bohrprüfstand		Abbildung	Status*	Arbeitsprogramm
	Bezeichnung	Mechanismus			
1	BP 3	Ritzen, Diamantwerkzeug	2	1	(1)
2	BP 4	Drücken, Rollenbohrwerkzeug	3	2	(2)
3	BP 5	Schlagen, Bohrhammer	-	-	-
3.1	BP 5.1	- pneumatisch	4	3	(3.1)
3.2	BP 5.2	- hydraulisch	5	2	(3.2)
4	BP 2	Bohrautoklav	6	1	-
4.1	BP 2.1	Ritzen, Diamantwerkzeug	7	1	(4.1)
4.2	BP 2.2	Drücken, Rollenbohrwerkzeug	8	1	(4.2)
4.3	BP 2.3	Schlagen, Bohrhammer	9	3	(4.3)
5	-	Funktionsprüfung hydraulischer Bohrhammer	10	2, 3	(5)

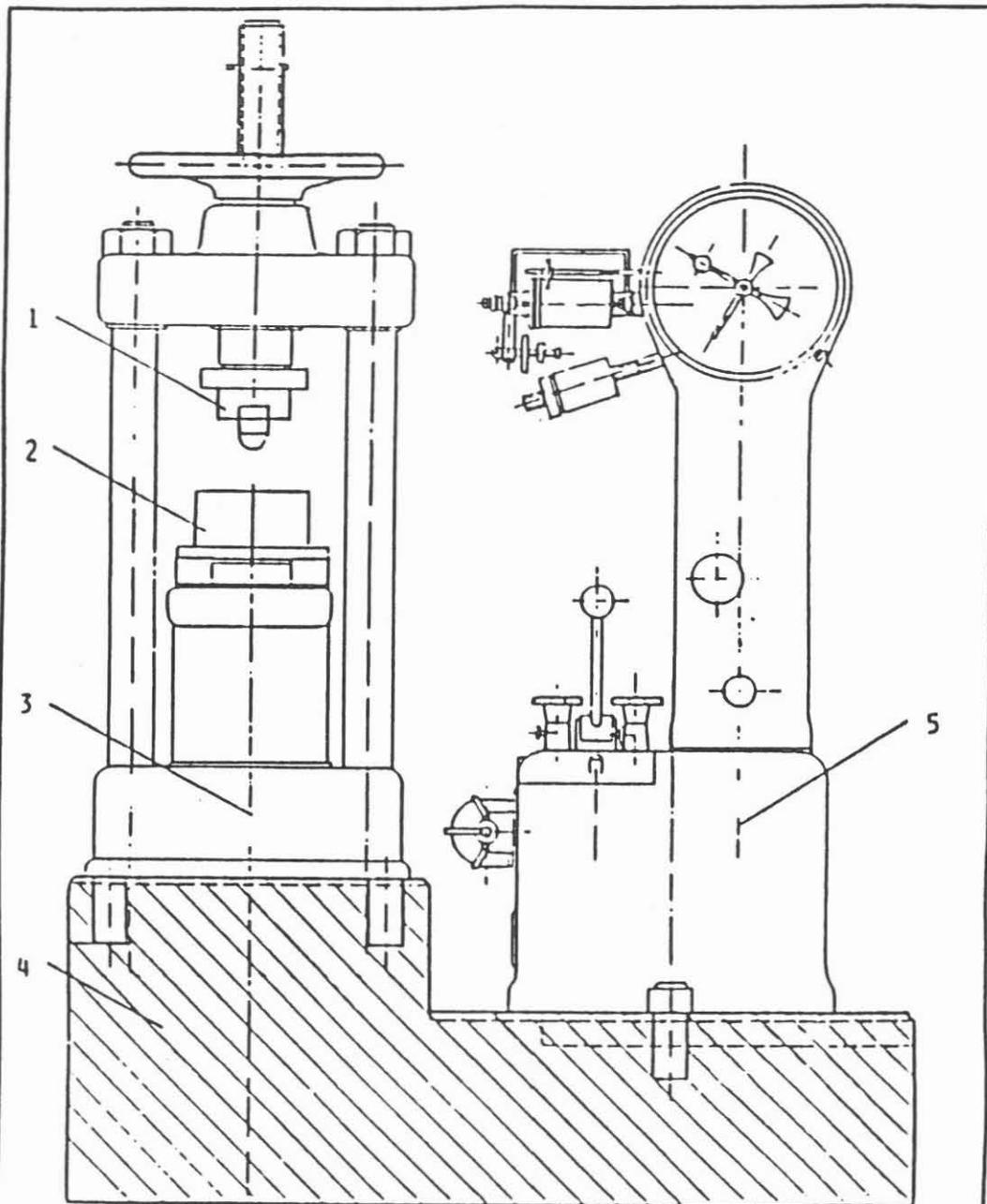
- * 1 = vorhanden
- 2 = Komponenten vorhanden
- 3 = zu entwickeln

ITE
1986

Versuchsstände für die geplanten Untersuchungen zum Bohren in Hartgestein,
KTB-Projekt

Tab. 1



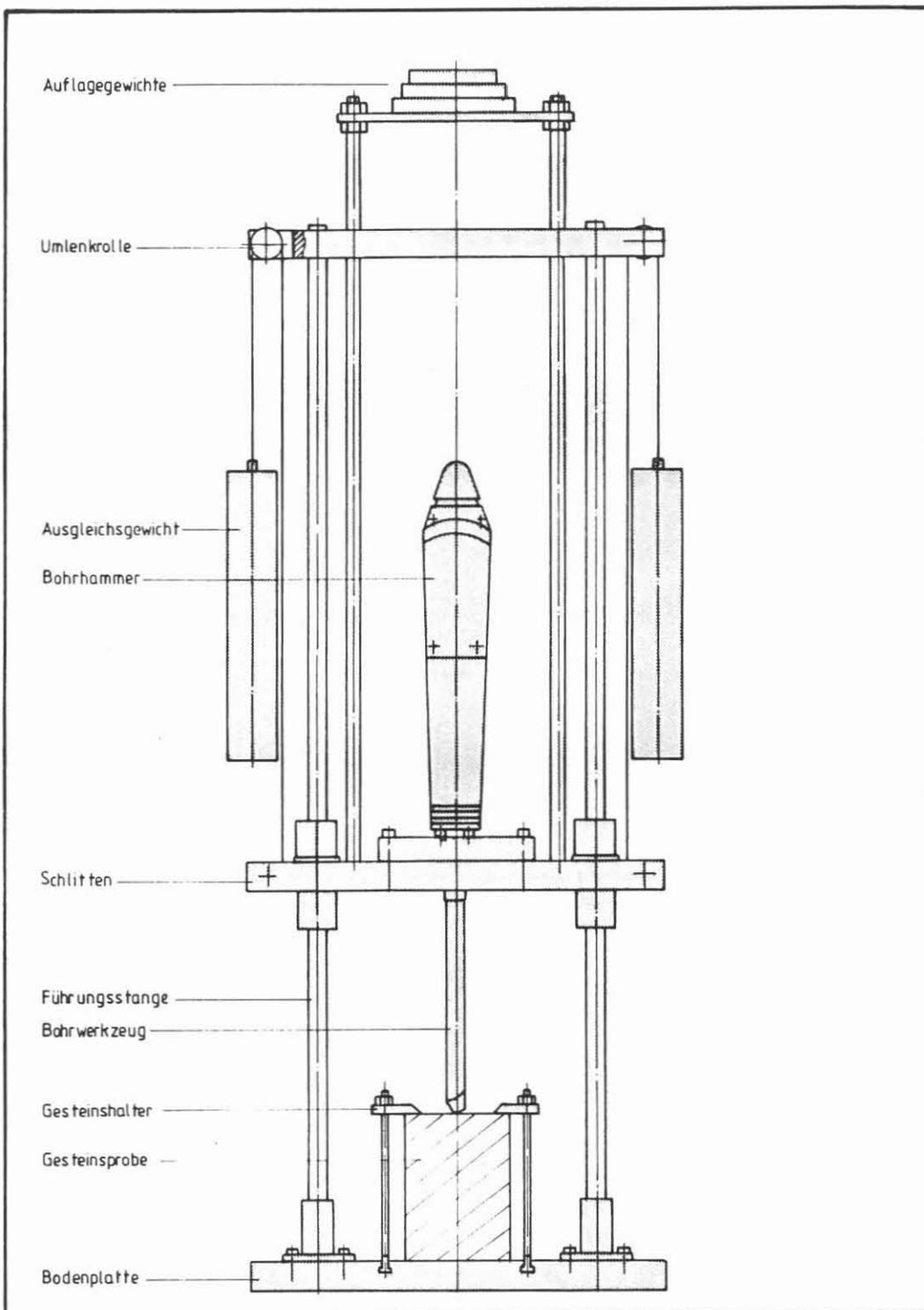


- Erläuterung:
- 1. Werkzeughalter mit Eindrückschneide
 - 2. Gestein
 - 3. Prüfmaschine
 - 4. Fundament
 - 5. Hydraulikpumpe und Pendel

ITE
1986

Bohrprüfstand BP 4: Druckprüfmaschine
(Losenhausen), Eindruckversuche

Abb.: 3

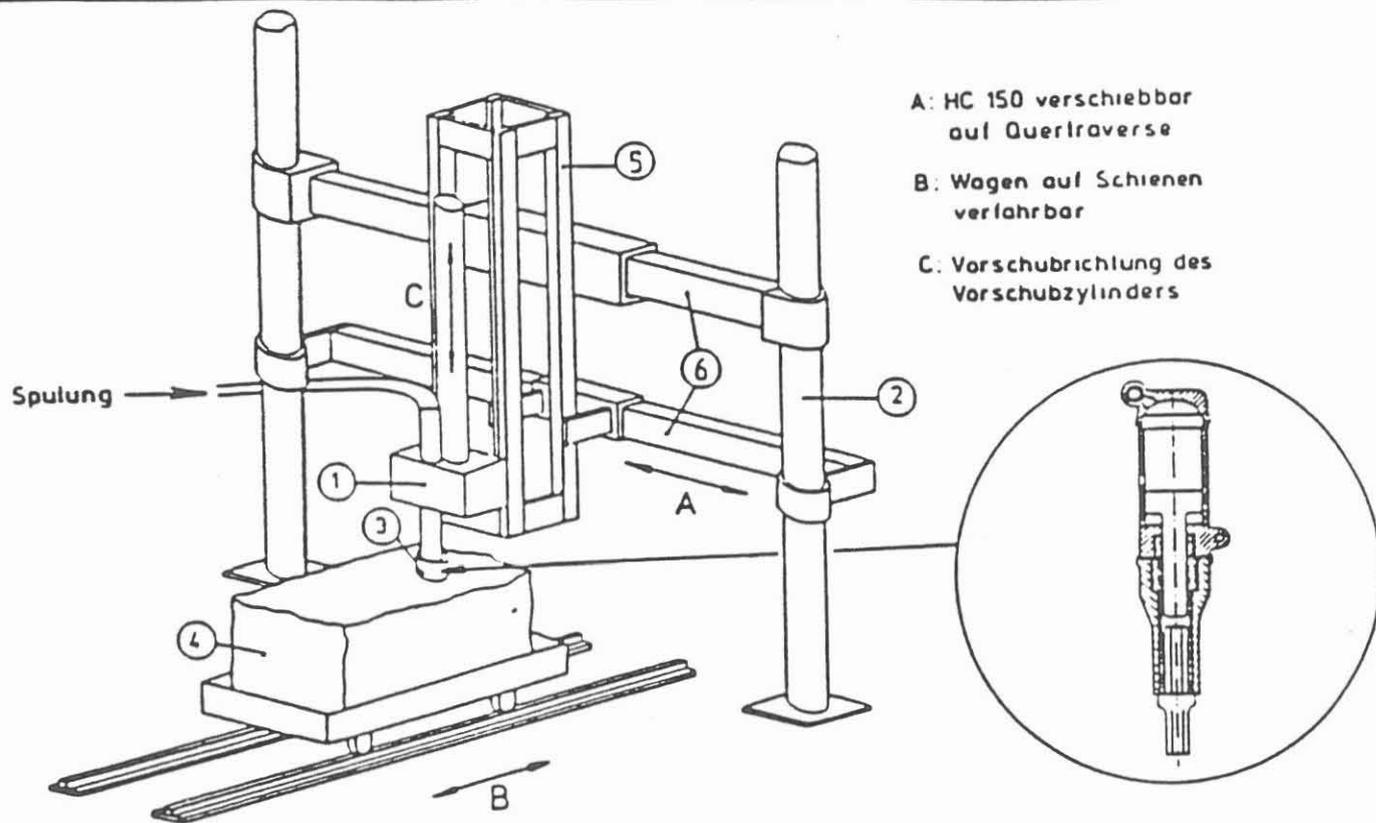


ITE

Bohrprüfstand BP 5.1:
elektropneumatischer Bohrhammer
Schlagendes Bohren

1987

Abb.: 4



A: HC 150 verschiebbar auf Quertraverse

B: Wagen auf Schienen verfahrbar

C: Vorschubrichtung des Vorschubzylinders

Erläuterung: 1: Kraftdrenkopf 2: Maschinenrahmen 3: Hydraulischer Bohrhämmer mit Stiftmeißel
 4: Bohrwagen mit Gestein 5: Grundrahmen 6: Quertraverse

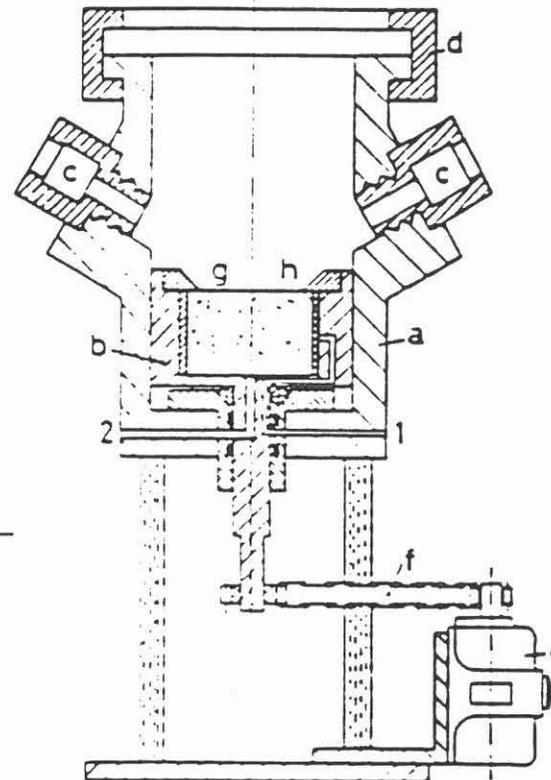
I T E
 1986

Bohrprüfstand BP 5.2: HC 150 mit Bohrhämmer, Schlagendes Bohren

Abb.: 5

Erläuterungen:

- a Autoklavgefäß
- b Gesteinshalter
- c Schaugläser
- d Klauenmechanik
- e Getriebemotor
- f Antriebskette
- g Probekörper
- h Gummimanschette
- i Befestigungsring für Probekörper
- 1 Anschluß für Manschettendruck
- 2 Anschluß für den Formationsinhaltsdruck
- 3 Anschluß für den Spülungsdruck



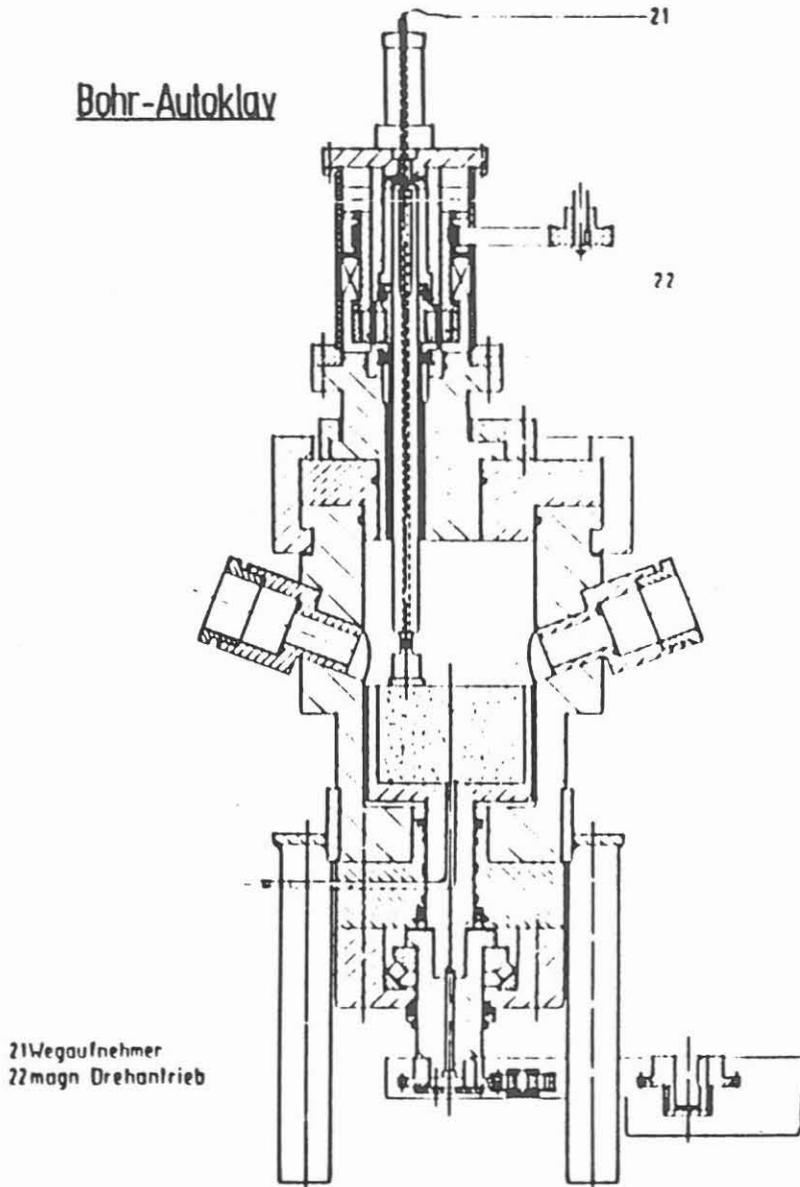
ITE

Druckkammer des Bohrautoklaven

1987

Abb. 6

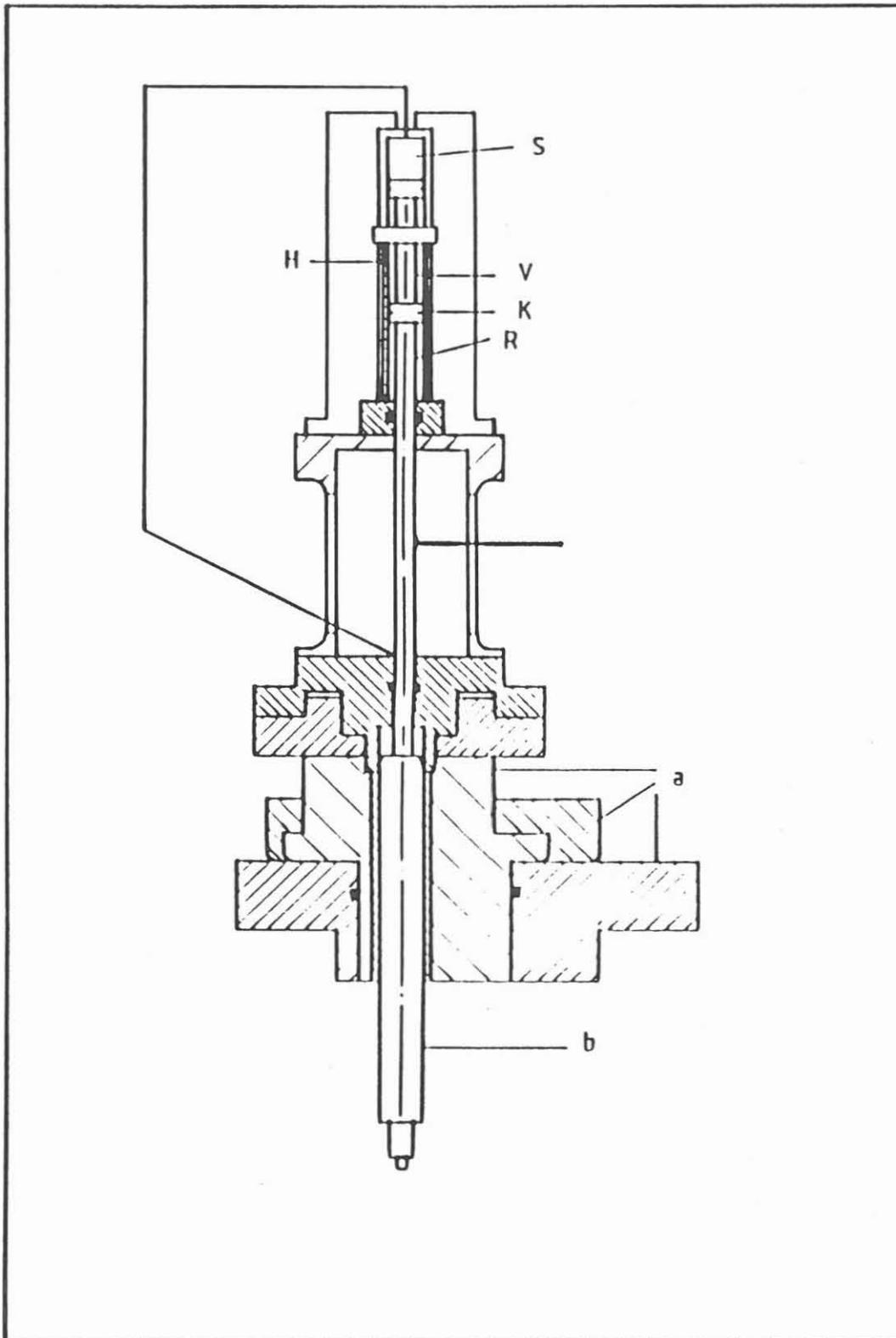
Bohr-Autoklav



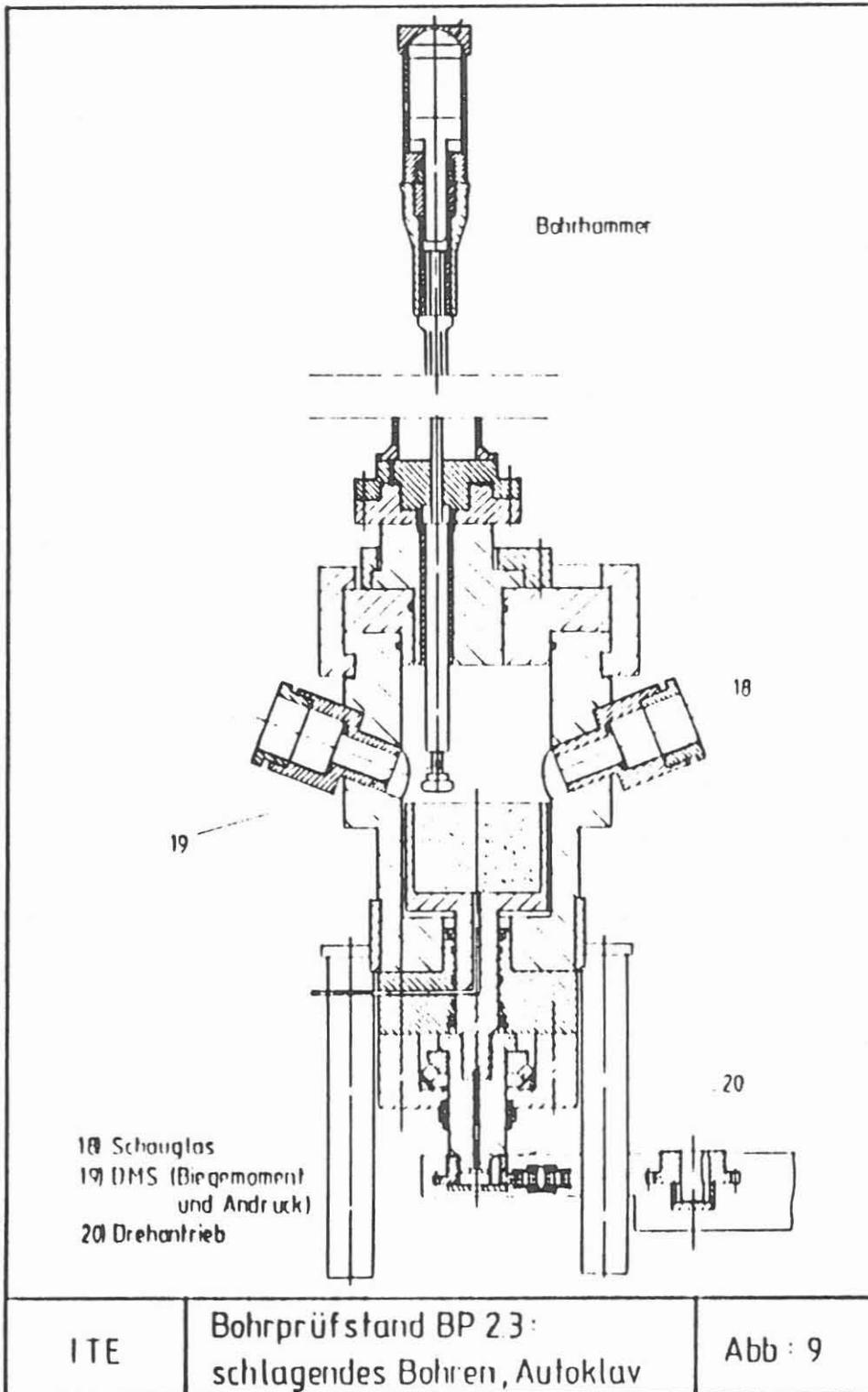
I T E
1985

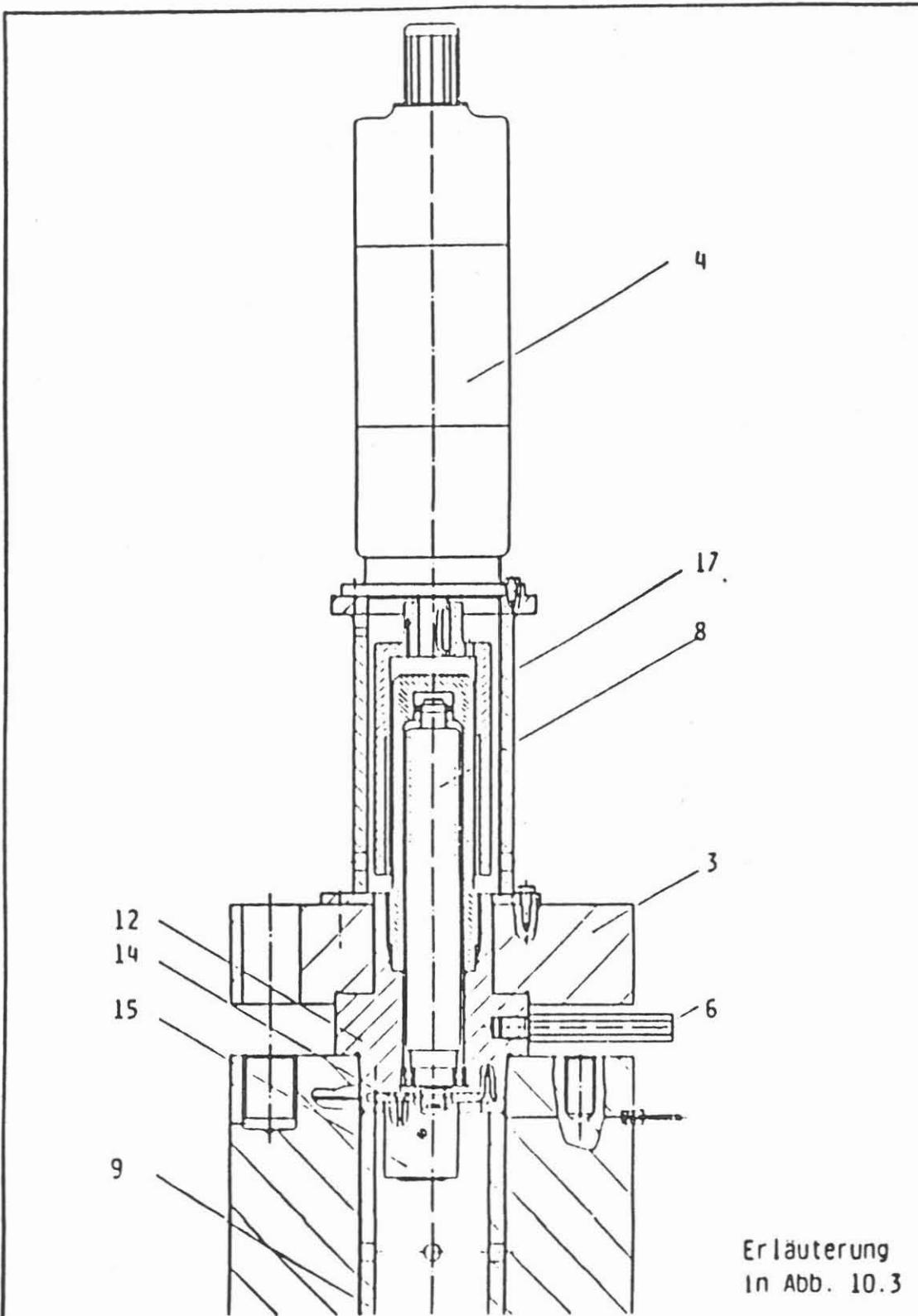
Bohrprüfstand BP 2.1: Ritzendes Bohren,
Diamantwerkzeug, Autoklav

Abb.: 7



ITE	Versuchsaufsatz für	Abb. 8
1987	drückendes Bohren	

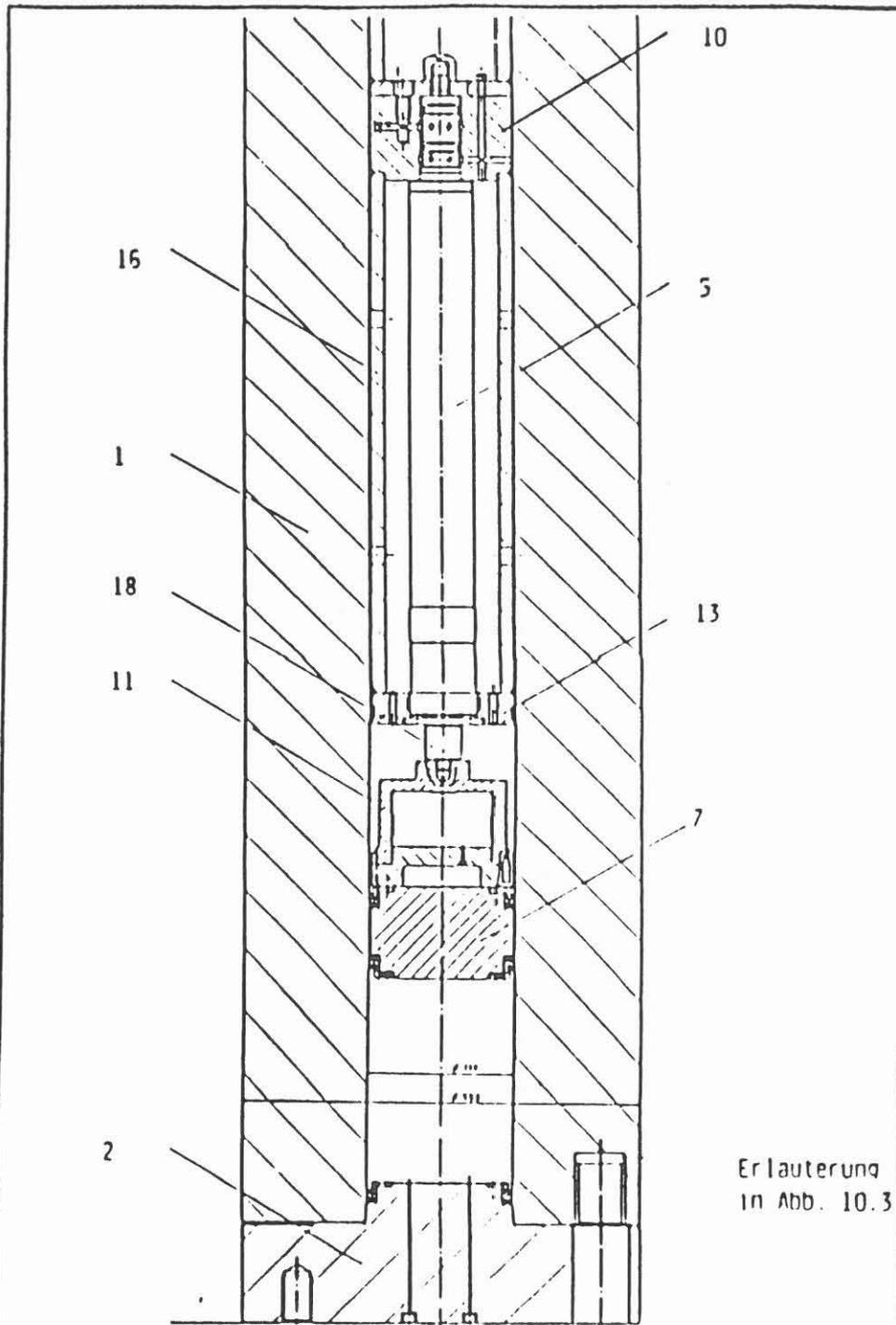




Erläuterung
in Abb. 10.3

Fortsetzung in Abbildung 10.2

I T E 1985	Funktionsprüfung hydraulischer Bohr- hammer in Rohrprüfanlage 2	Abb.: 10.1
---------------	--	------------



Erläuterung
in Abb. 10.3

I T E 1985	Funktionsprüfung hydraulischer Bohr- hammer in Rohrprüfanlage 2	Abb.: 10.2
---------------	--	------------

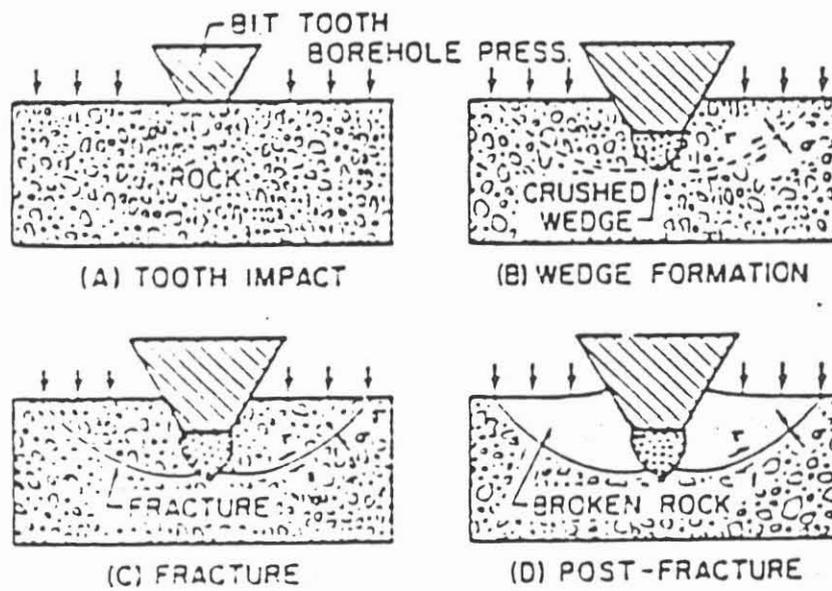
Erläuterung zu Abbildung 10.1 und Abbildung 10.2

1. Rohrprüfanlage 2
2. Unterer Autoklavdeckel
3. Oberer Autoklavdeckel
4. Drehstrommotor
5. Hydraulischer Bohrhämmer
6. Hebebolzen
7. Schwimmender Kolben
8. Magnetkupplung
9. Zwischenstück
10. Steuergehäuse Hammer
11. Kraftmeßdose
12. Abdichtstopfen
13. Hammerjustierung
14. Aufhängung für Hydraulikpumpe
15. Hydraulikpumpe
15. Zwischenstück
17. Motorflansch
18. Übergangsstück

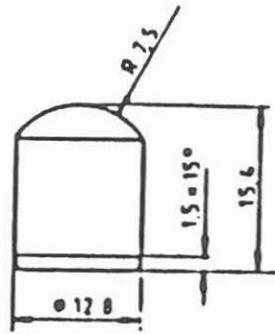
I T E
1986

Funktionsprüfung hydraulischer Bohr-
hammer in Rohrprüfanlage 2

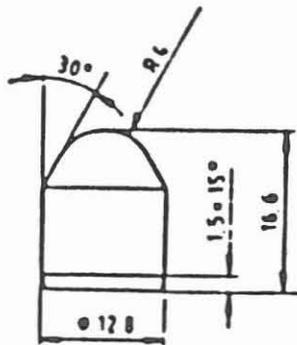
Abb.: 10.3



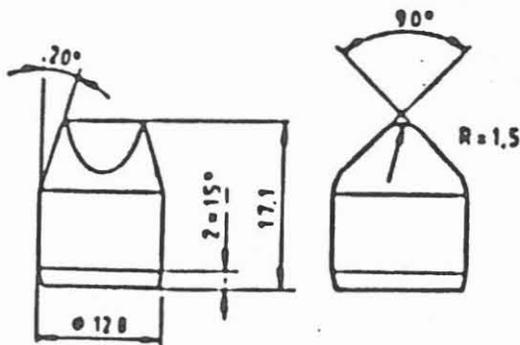
ITE	Phasen der Kraterbildung	KTB Abb. 11
-----	--------------------------	----------------



round



conical



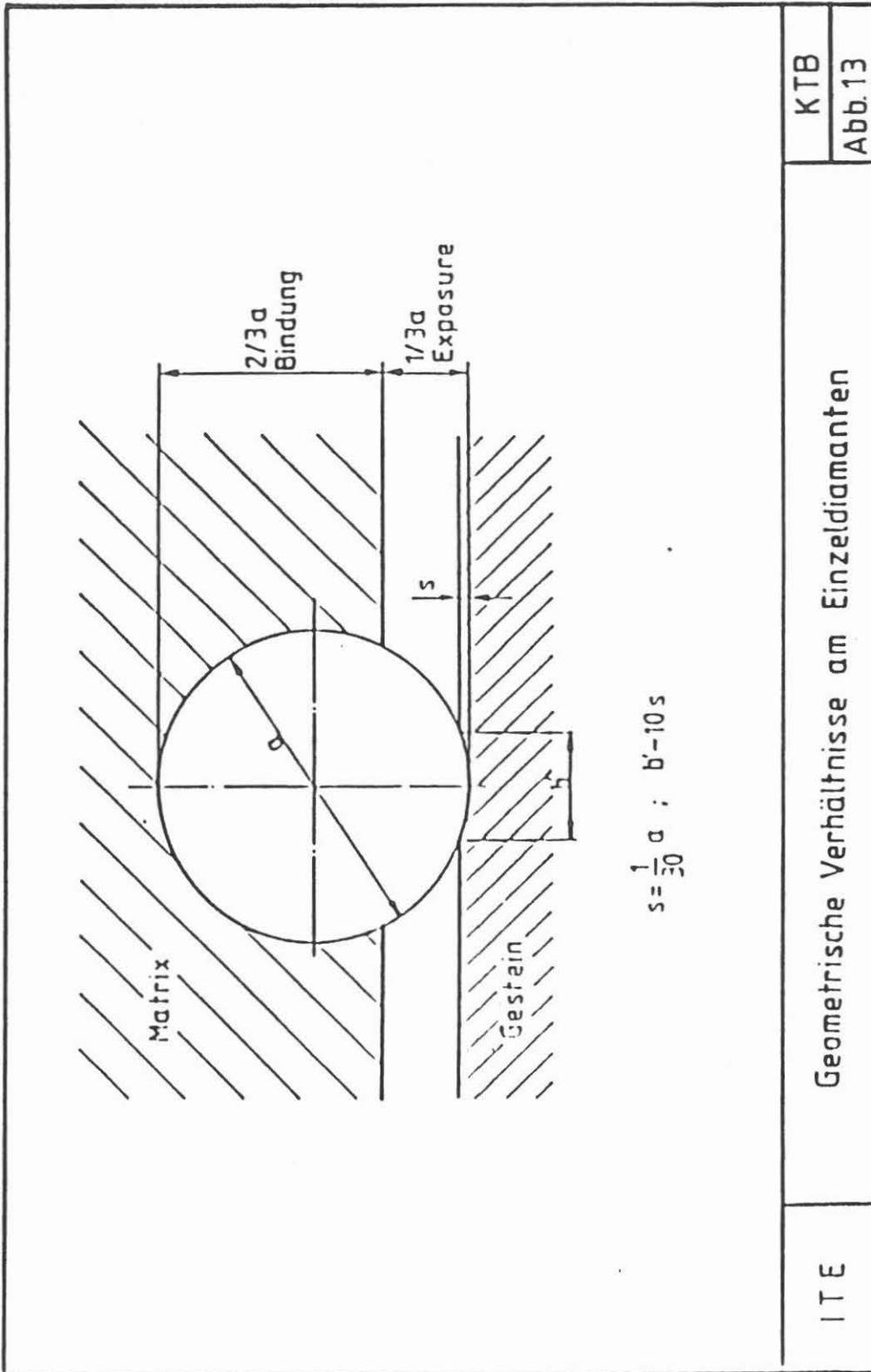
chisel

ITE

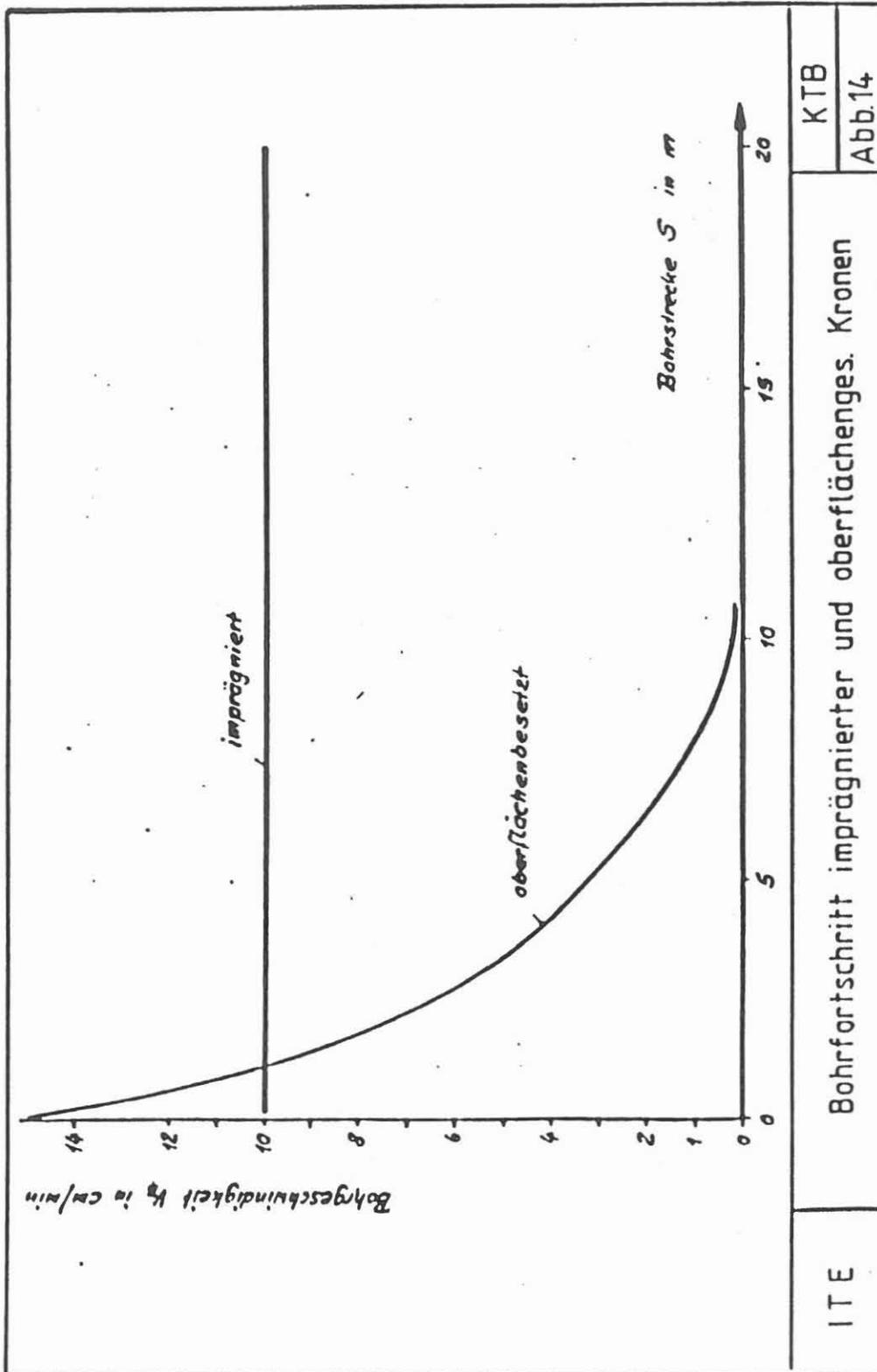
Hartmetall - Inserts

KTB

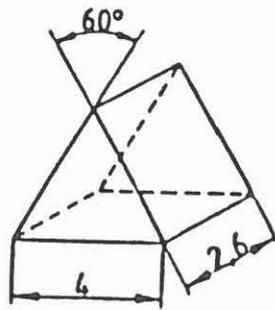
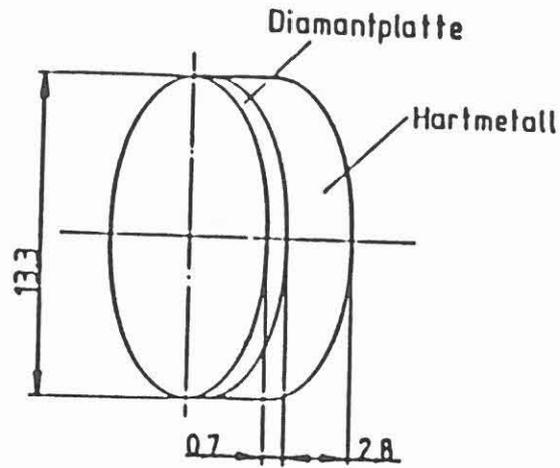
Abb. 12



ITE	Geometrische Verhältnisse am Einzeldiamanten	KTB
		Abb.13

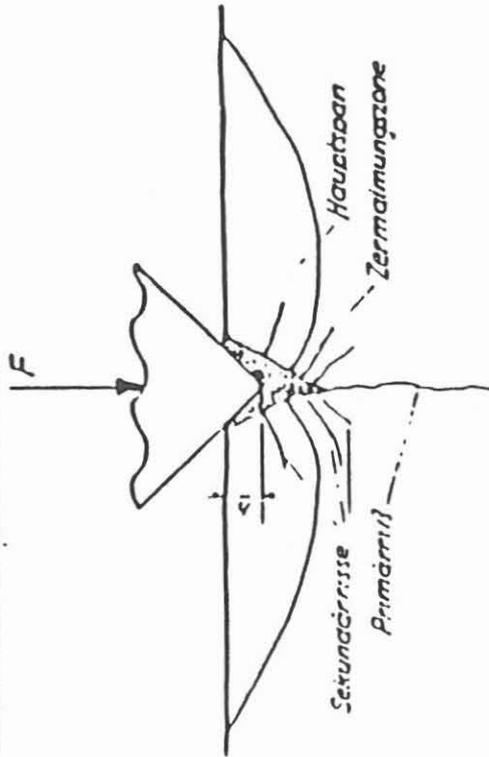


ITE	Bohrfortschritt imprägnierter und oberflächenges. Kronen	KTB
		Abb.14



ITE	Diamantschneiden - Form	KTB
		Abb. 15

Gesteinsbruchmechanismus:



$h = \text{Eindringtiefe}$

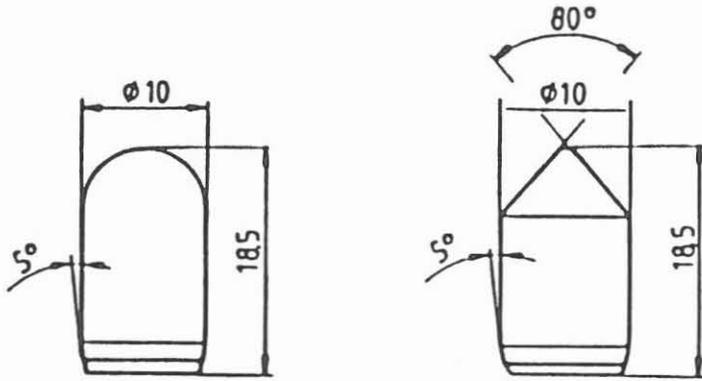
ITE

Schlagende Gesteinszerstörung

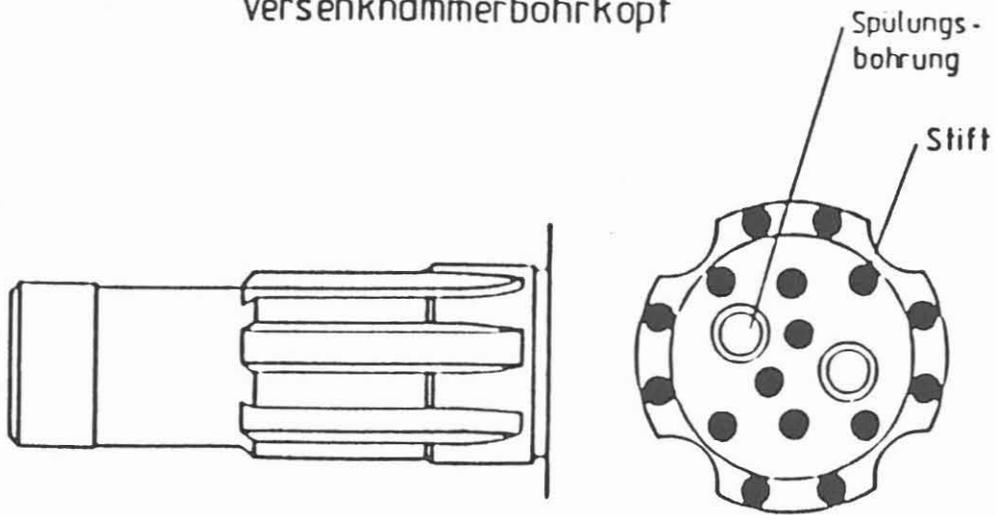
KTB

Abb. 16

Hartmetallstifte



Versenkhammerbohrkopf



ITE	Anordnung von Einzelstiften auf einem Versenkhammerbohrkopf	KTB
		Abb 17

Institut für Bergbaukunde III
Tagebautechnik, Tiefbohrwesen, Erdöl- und Erdgasgewinnung

Lochnerstraße 4–20
5100 Aachen

Auswertung von Erfahrungen beim Bohren in Hartgestein

Prof. Dr.-Ing. R. D. Stoll
Dipl.-Ing. H. Halm

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung.....	36
1. Schachtbohrverfahren.....	37
2. Schlagendes Bohren.....	40
2.1 Luftbetriebene Bohrhämmer.....	40
2.2 Bohrkronen.....	41
2.3 Spülung.....	42
2.4 Beispiele ausgeführter Bohrungen.....	42
3. Analyse der bohrtechnischen Leistungen im Kristallin in Süddeutschland.....	45
4. Bohrerfahrungen in Geothermalprojekten.....	49
5. Zusammenfassung.....	50
6. Literaturverzeichnis.....	51

Kurzfassung

Erfahrungen beim Bohren im Hartgestein

R.D. Stoll, H. Halm

II. EINLEITUNG

Ziel der Arbeit ist es, die auf den Gebieten Bohrbarkeit, Tunnelbohrmaschinen, Schachtbohrmaschinen, Schlagendes Bohren, Drehschlagendes Bohren zur Kerngewinnung, Sprenglochbohren unter Tage, Bohrungen in Geothermalprojekten, Rotarybohrungen in kristallinen Formationen sowie Schürfbohrtechnik weltweit vorhandenen Unterlagen im Hinblick auf Anwendung in der KTB auszuwerten. In Anbetracht des Umfangs des bearbeiteten Materials und der Relevanz zur KTB sollen in dieser Kurzfassung schwerpunktmäßig nur die folgenden Punkte näher betrachtet werden:

- Schachtbohrverfahren
- Schlagendes Bohren
- Analyse der bohrtechnischen Leistungen im Hartgestein in Süddeutschland
- Bohrerfahrungen in Geothermalprojekten.

Anschrift der Autoren: Institut für Bergbaukunde III (Tagebau-
technik, Tiefbohrwesen, Erdöl- und Erdgasgewinnung) der
RWTH Aachen, Lochnerstr. 4- 20, 5100 Aachen

1 SCHACHTBOHRVERFAHREN

Von besonderem Interesse ist das Raisebohrverfahren, da bei diesem Bohrverfahren zunächst ein Pilotbohrloch mit ähnlichen Durchmessern wie beim Rotarybohren von oben nach unten erstellt und anschließend von unten nach oben erweitert wird. Abb. 1 zeigt diesen Vorgang schematisch.

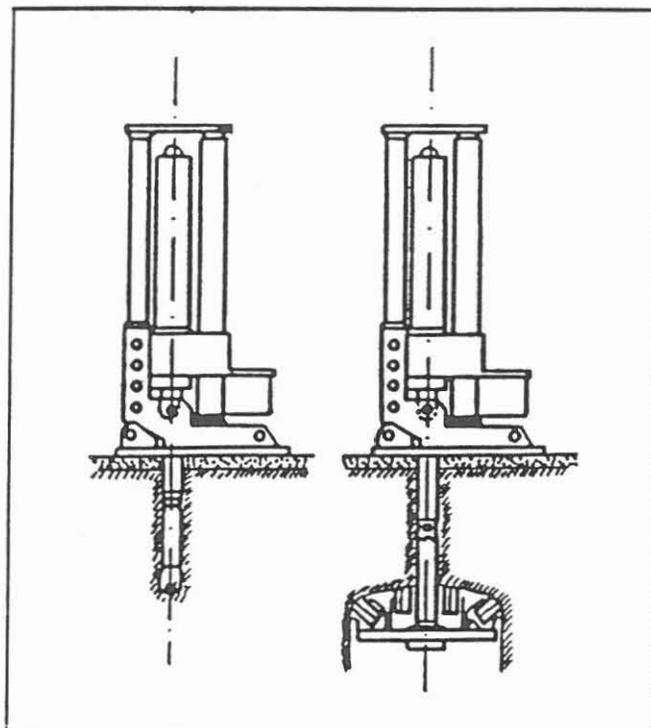


Abb. 1: Schematische Darstellung der Raisebohrtechnik

Bedeutsam für die KTB sind die beim Schachtbohren erreichten geringen Abweichungen von der Lotrechten und die dazu verwendeten Verfahren.

Bei Schachtvertiefungen auf den Kalibergwerken Siegfried Giesen, Bergmannsseggen Hugo und Friedrichshall war eine Abweichung von nur 0,3 m bei einer Bohrlochslänge von 300 m (0,001 m Abweichung / m Bohrlochlänge) zulässig.

In der Schachtbohrtechnik wird versucht, diesen Problemen mit Hilfe der passiven und der aktiven Zielbohrtechnik zu begegnen.

Zielbohrstangen bzw. Stabilisatoren sollen ein Durchbiegen des Gestängestranges und damit ein Schrägstellen des Meißels verhindern. Der unterste Stabilisator eines Bohrstranges sollte möglichst unmittelbar über dem Meißel plziert werden. Einge-

setzt werden sowohl mit gleicher Drehzahl wie der Bohrstrang rotierende als auch mit Differenzdrehzahl rotierende Stabilisatoren. Der Stangendurchmesser entspricht dabei in der Regel dem Meißeldurchmesser.

Erste Ansätze zur Entwicklung einer aktiven Zielbohrstange finden sich schon zu Beginn der 70-iger Jahre. Es handelt sich dabei um eine Doppelrohrkonstruktion, deren äußeres Rohr vier rippenartige Führungsleisten trägt. Dieses Rohr ist gegenüber dem Innenrohr drehbar gelagert, so daß es bei Rotation des Bohrstranges nicht mitdreht. Ein Pendelmechanismus sollte Auslenkungen aus der Vertikalen erkennen. Ein Gegensteuern wurde durch hydraulische Beaufschlagung jeweils einer Führungsleiste erreicht. Der erste untertägige Einsatz dieses Systems erfolgte 1974 in Ibbenbüren. Nach mehreren Fehlschlägen wurde diese Entwicklung aufgegeben.

Die Bergbauforschung hat als ein weiteres System zusammen mit der Fa. Schwing Hydraulik eine aktive Zielbohrstange entwickelt. Die Zielbohrstange (siehe Abb. 2) hat eine innere Welle, die den Bohrstrang mit dem Meißel verbindet. Auch bei dieser technischen Ausführung sind hydraulisch bewegliche Steuerleisten am Außenrohr angebracht. Die Neigungsmessung erfolgt hier jedoch durch Neigungsmesser an Stelle eines Pendelmechanismus.

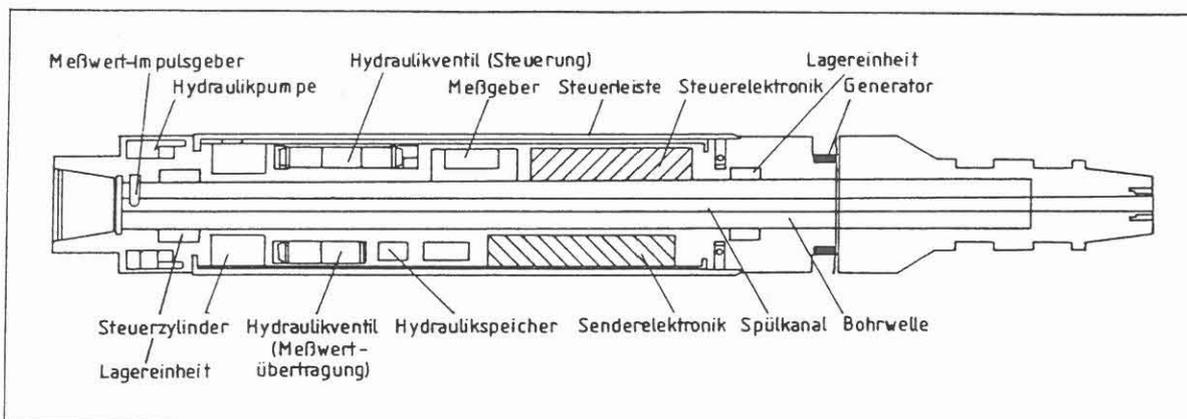


Abb. 2: Zielbohrstange der Fa. Schwing Hydraulik

Zur Messung der Bohrlochabweichung und zur Steuerung der Stange wird sowohl hydraulische als auch elektrische Energie benötigt. Die Rotation des Bohrstranges wird zur Erzeugung der Meß- und Steuerenergie genutzt.

Entsprechend den im Bergbau unter Tage gültigen Vorschriften ist die Zielbohrstange schlagwettersicher ausgeführt und zugelassen.

Bei aufwärts geführten Vorbohrungen mit der Zielbohrstange arbeitete diese stets störungsfrei. Bei abwärts gerichteten Zielbohrungen kam es dagegen wiederholt zu Dichtungsproblemen.

Die Auswertung der Bohrberichte von sieben Schachtbohrungen der Firmen Thyssen Schachtbau und Deilmann-Haniel führten zu folgenden Erkenntnissen im Hinblick auf die Einsetzbarkeit der Zielbohrstange in den oberen Bereichen der KTB- Hauptbohrung, in denen eine besonders hohe Vertikalität erforderlich ist:

- Die Schwingungsempfindlichkeit des Gerätes ist zu verringern. Dabei ist auch der Zusammenhang zwischen einer möglichen Exzentrizität der verwendeten Meißel und auftretenden Schwingungen zu beachten.
- Die bisher konstruierten Zielbohrstangen sind bedingt durch die hier verwendeten elektronischen Bauteile für Temperaturen von bis zu 70° C ausgelegt. Die Bauelemente müssen für höhere Temperaturbereiche ausgelegt werden.
- Es ist zu überprüfen, ob die Standzeit des Dichtungssystems bei größeren Teufen durch ein Druckausgleichssystem verbessert werden kann.

2 SCHLAGENDES BOHREN

Schlagendes Bohren kann in harten und sprödebrüchigen Formationen (z.B. Granit, Gneis, Buntsandstein) erfolgreich eingesetzt werden.

Wegen des Untersuchungszieles - Übertragbarkeit von Erfahrungen im Hinblick auf die KTB - wurden nur Imlochhammerbohrungen betrachtet. Imlochhämmer werden entweder hydraulisch oder mit Luftspülung betrieben.

Hydraulisch betriebene Imlochhämmer haben sich in der westlichen Welt bisher noch nicht durchsetzen können. Hauptgründe hierfür sind die hohe Störanfälligkeit und der durch die Spülung hervorgerufene große Verschleiß.

2.1 Luftbetriebene Bohrhämmer

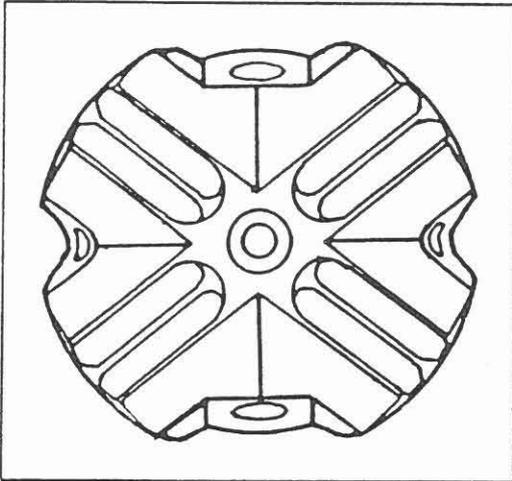
Der Bohrhämmer besteht aus einem langen, schlanken Zylinder. Die Bohrkronen sind am unteren Ende des Hammers in die Kronenhalterung eingeschraubt. Das Schlagwerk im Inneren des Bohrhammers bringt einen Schlagimpuls auf die Bohrkronen auf.

Hauptproblem der luftbetriebenen Bohrhämmer ist das Eindringen von mit Bohrklein beladenem Wasser. Die mitgeführten Gesteinspartikel können die Laufbahnen des Schlagkolbens stark beschädigen. Bohrhämmer müssen mit Rückschlagventilen ausgerüstet sein, damit im Bohrloch stehendes Wasser nicht in den Imlochhammer eindringen kann.

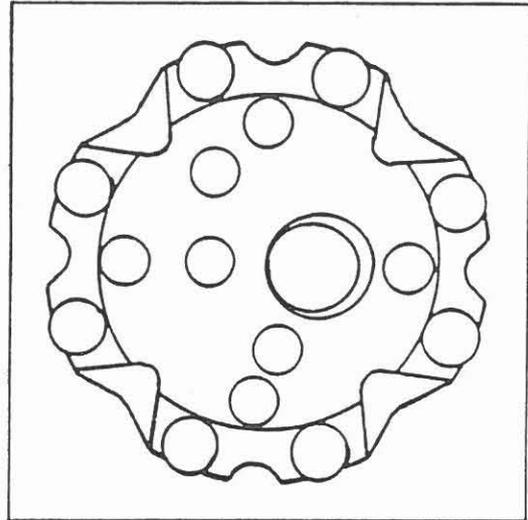
Eine Leerlaufabschaltung dient zur Verhinderung von Prallschlägen. Dadurch läßt sich die Bruchgefahr von Bohrkronen und Kolben erheblich vermindern. Zu Prallschlägen kann es z.B. durch zu geringen Andruck auf die Bohrlochsohle kommen.

2.2 Bohrkronen

Als Bohrkronen für schlagendes Bohren können sowohl Meißel mit kreuzförmig als auch mit X-förmig eingelassenen Schneiden verwendet werden (siehe Abb. 3).



Schneidenbohrkrone



Stiftbohrkrone

Abb. 3: Bohrkronen

Bei Explorationsbohrungen größerer Teufe stellt die Richtungsstabilität der Schlagbohrungen ein großes Problem dar. Diesem Problem versuchen die Meißelhersteller durch eine konkave Wölbung bzw. Aussparungen an der Meißelfront zu begegnen.

Die Standzeiten der Bohrwerkzeuge richten sich nach dem zu durchteufenden Gestein. Sie schwankt sehr stark und kann zwischen 1 und 3000 m Bohrlochlänge betragen. Die Lebensdauer der Bohrwerkzeuge kann dabei durch richtiges Nacharbeiten der Stifte und Meißelschneiden entscheidend verlängert werden.

2.3 Spülung

Beim Einsatz von Luftspülung wird die Luft über Tage in Kompressoren verdichtet, gelangt durch das Bohrgestänge zum Imlochhammer; von dort aus über den Ringraum mit Bohrklein beladen wieder zu Tage.

Der benötigte Kompressor muß mindestens den Druck entwickeln, der dem hydrostatischen Druck der Wassersäule im Bohrloch entspricht. Nur dann ist es möglich, das im Bohrloch stehende Wasser auszublase, damit der Bohrlochhammer mit Erfolg eingesetzt werden kann.

Schaumspülungen werden nur in Sonderfällen, z.B. bei unzureichendem Austragsverhalten der Spülung, eingesetzt. Das Schaumgemisch muß dem Luftstrom in Mengen von 2- 4 l / min zugesetzt werden. Auf Grund der schmierenden Wirkung des Schaumes lassen sich die Standzeiten von Bohrkronen, Bohrhämmern und Bohrgestänge verlängern.

Umweltschäden sind beim Einsatz von Schäumen nicht zu befürchten, da die Substanzen in kürzester Zeit biologisch abbaubar sind.

2.4 Beispiele ausgeführter Bohrungen

Repräsentativ für die in den Graniten der Oberpfalz durchgeführten Bohrungen ist die Bohrung PB 8 im Bereich des Falkenberger Granites. Diese Bohrung war bis zu einer Teufe von 400 m mit schlagendem Bohren geplant; starke Wasserzuflüsse zwangen zur Umstellung auf das Rotarybohrverfahren im Teufenbereich zwischen 200 und 300 m. Die Standzeiten für eine Bohrkronen lagen zwischen 70 und 80 m im Durchmesserbereich 6 Zoll und 30 m im Durchmesserbereich 4 Zoll mit der nicht mehr als optimal angesehenen Kombination von Mission-Imlochhammer und Krupp-Widia-Bohrkronen. Maximal wurden bis 7 m/h Bohrfortschritt erreicht. Bei der Rotarybohrung lag der maximale Bohrfortschritt der Rollenmeißel (Warzenmeißel) dagegen bei nur 2,04 m/h (Durchmesser: 5 1/8 Zoll).

Einen genaueren Überblick über die beim schlagenden Bohren erzielten Bohrleistungen gibt die Tab. 1.

Teufe m	Bohrstrecke m	Zeitdauer h	Bohrfortschritt m/h	Bohrwerkzeug
0 - 4	4	-	-	Rollenmeißel
4 - 20	16	-	-	Missionhammer
20 - 33,5	13,5	2,5	5,4	Missionhammer
Zementation mit $5\frac{1}{8}$ Zoll Rollenmeißel aufgebohrt				
32,5 - 36,5	4	-	-	Missionhammer
36,5 - 78,0	41,5	11,5	3,61	Missionhammer
Meißelwechsel bei 68 m ist in der Bohrzeit enthalten				
78,0 - 92,0	14	2	7,0	Missionhammer
92 - 127,5	33,5	8	4,19	Missionhammer
127,5 - 149	21,5	11,5	1,87	Missionhammer
Der Hammer mußte zweimal gezogen und gereinigt werden				
149 - 165,7	16,7	6,25	2,67	Missionhammer
Tabelle 1 - 6 : Bohrung PB 8 im Experimentalfeld Falkenberg (Schlagendes Bohren) /39/				
Meißelstrecke : 161,7 m				
Bohrlochdurchmesser : $6\frac{1}{2}$ Zoll von 4 - 33,5 m				
: $5\frac{1}{2}$ Zoll von 33,5 - 165,7 m				
Mittlerer Bohrfortschritt : 4,12 m/h				
Im Bereich von 0 - 4 m wurde mit einem Rollenmeißel mit Luftspülung ein 216 mm breites Vorbohrloch für die Standrohrtour erstellt.				

Tab. 1: Bohrung PB 8 im Experimentalfeld Falkenberg

Als zweites Beispiel kann ein Bohrprogramm zur Kohleexploration in Marokko dienen. Die Gesteine des Deckgebirges waren, von einzelnen Mergelpartien abgesehen, spröde und gut für das schlagende Bohren geeignet. Das anstehende Gestein (Kalke, Basalte, Mergel) war stark zerklüftet und teilweise wasserführend. Je nach Wasseranfall wurde ein Schaumkonzentrat zugesetzt.

In Kalken, Dolomiten und Basalten betrug die Bohrgeschwindigkeit ca. 10 m/h. In den Mergelschichten (weiche, plastische Formation) war eine deutliche Abnahme der Bohrgeschwindigkeit zu verzeichnen. Die hier verwendeten Warzenmeißel erreichten Standzeiten von bis zu 1000 m.

Der Bohrfortschritt betrug bei in der Nähe durchgeführten Seilkernbohrungen nur ca. 1 m/h. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die hier eingesetzten Bohranlagen technisch veraltet und das hier anstehende Gebirge, wie erwähnt, stark klüftig war.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die mit dem schlagenden Bohren erzielbaren Bohrgeschwindigkeiten durchaus das Drei- bis Vierfache der Geschwindigkeiten ausmachen, die beim Rotarybohren erreicht werden können, günstige Bohrbedingungen, wie geringe Wasserzuflüsse, hartes und sprödebrüchiges Gestein, vorausgesetzt.

Die Entwicklung eines hydraulisch angetriebenen Imlochhammers könnte das schlagende Bohren auch in großen Teufen als Leistungsbohren möglich machen und damit die Kosten des Bohrbetriebes durch die dann möglichen höheren Bohrfortschritte senken.

3 ANALYSE DER BOHRTECHNISCHEN LEISTUNGEN IM KRISTALLIN IN SÜD-DEUTSCHLAND

Die Analyse der bohrtechnischen Leistungen in kristallinen Formationen Süddeutschlands lieferte Erkenntnisse im Hinblick auf die Auswahl optimaler Kernbohrsysteme.

Die Kerngewinnungsverfahren mit Kernrohren werden unterteilt in Gewinnungsverfahren mit

- Einfachkernrohr
- Doppelkernrohr
- Seilkernrohr.

Um den erbohrten Gesteinskern zu Tage zu transportieren, muß bei Kerngewinnungsverfahren mit dem Einfach- bzw. dem Doppelkernrohr das gesamte Bohrgestänge ausgebaut werden.

Die Kerngewinnung mit dem Einfachkernrohr stellt die preiswerteste und einfachste technische Ausführung dar. Das Gewinnungsgerät (siehe Abb. 4) besteht aus Mantelrohr, Räumer, Kernfänger und Kernbohrkrone.

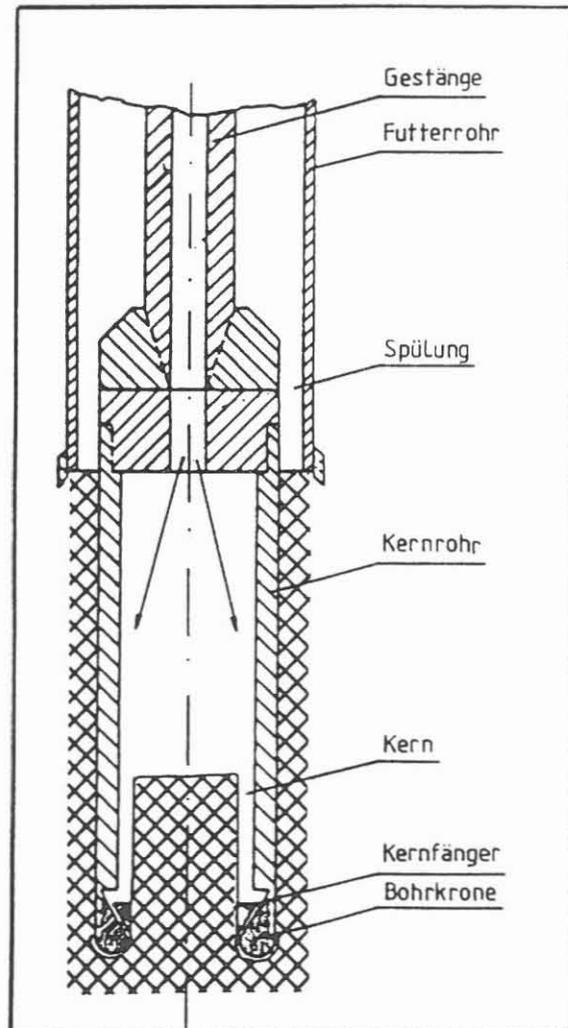


Abb. 4: Einfachkernrohr

Nachteile ergeben sich aus der Tatsache, daß

- das Spülungsmedium den gesamten Kern umspült. Dadurch kann es zu Auswaschungen und Kernverfälschungen kommen.
- der Spülstrom dem aufsteigenden Kern hemmend entgegenwirkt.

- das Mantelrohr eine Bewegung relativ zum Kern ausführt. Der Kern kann dadurch tordiert und abgeschliffen werden. Im ungünstigsten Fall wird der Kern abgeschert und zerstört.

Doppelkernrohre (siehe Abb. 5) werden dort eingesetzt, wo Gebirge oder weiche Formationen anstehen und wo Auswaschungen oder Erosion die Kernqualität zu vermindern drohen.

Das Kerngerät besteht im wesentlichen aus zwei ineinander liegenden Rohren, dem Mantelrohr und dem Innenrohr, die im oberen Teil miteinander verbunden sind. Während des Bohrvorganges wächst der Kern in das Innenrohr hinein. Die Spülung wird durch den Ringraum zwischen den beiden Rohren zur Bohrkrone geleitet. Diese räumliche Trennung vermeidet größtenteils die Schädigung des Kerns.

Nach Art der Innenrohrlagerung kann bei den Doppelkernrohren folgende Unterscheidung getroffen werden:

- Kernrohre mit starr befestigtem Innenrohr
- Kernrohre mit gelagertem Innenrohr.

Bei der zweiten Version ist das Innenrohr im oberen Bereich mit einem Drucklager gegen das Mantelrohr gelagert. Aufgrund der Reibung zwischen Innenrohr und Kern wird die Rotation des Innenrohres vermieden, die mögliche Schädigung also noch weiter verringert.

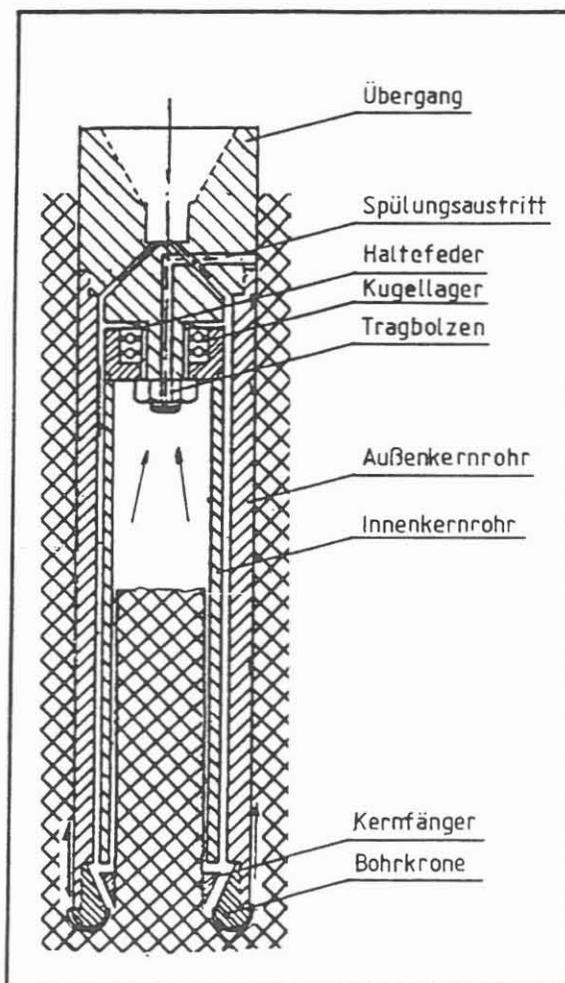


Abb. 5: Doppelkernrohr

Um die immensen Roundtrip-Zeiten der o.g. Systeme zu vermeiden, wurde das Seilkernverfahren entwickelt, dessen Aufbau dem Doppelkernrohr ähnlich ist.

Zu Beginn eines jeden Kernmarsches wird ein leeres Innenrohr in den Bohrstrang eingeworfen. Dieses Rohr verriegelt sich beim Auftreffen im untersten Teil des Bohrstranges.

Am Ende eines jeden Kernmarsches wird das Innenrohr mit dem Kernfänger und dem Kern von der Bohrlochsohle mittels einer Fangvorrichtung durch das Gestänge zu Tage transportiert. Die Fangvorrichtung (Overshot) verriegelt sich selbsttätig im oberen Teil des Innenrohres, nachdem es mit einem Seil durch das Gestänge hinabgelassen wurde. Über Tage muß eine entsprechende Windeneinrichtung vorhanden sein. Auf diese Weise muß der Bohrstrang nur noch zum Kronenwechsel gezogen werden.

Ein Ventilsystem sorgt für eine abrupte Verringerung des Spülungsstromes, sobald der Kern das Innenrohr ausfüllt. An den übertägigen Manometern ist dann der Zeitpunkt ersichtlich, an dem die Fangeinrichtung eingesetzt werden muß.

Den wesentlichen Vorteilen, Erhöhung der Nettobohrzeit und hohes Kernausholen, stehen beim Wireline-Verfahren folgende Nachteile gegenüber:

- hohe Anschaffungskosten
- komplizierter technischer Aufbau
- geringer Kerndurchmesser, da das Innenrohr das Bohrgestänge durchfahren muß
- die gewinnbare Kernlänge ist auf etwa 9,1 m je Kernmarsch beschränkt.

Des Weiteren ist darauf zu achten, daß der Einsatz dieses Gerätes nur dann sinnvoll ist, wenn die Kronenstandlänge größer als die Nutzlänge des Kernrohres ist.

Vorherrschendes Verfahren bei den betrachteten Bohrungen war das Seilkernbohrverfahren. Tab. 2 gibt einen kurzen Überblick über die bei der beispielhaft ausgewählten Bohrung Höhensteinweg eingesetzten Kernbohrsysteme.

- 4,30 m	Ø 210 mm	Einfachkernrohr	1,5 m lang
- 17,00 m	Ø 172 mm	Doppelkernrohr	3,0 m lang
- 40,00 m	Ø 142 mm	Doppelkernrohr	3,0 m lang
- 419,00 m	Ø 92 mm	Wireline	3,0 m lang
- 925,00 m	Ø 73 mm	Wireline	3,0 m lang

Tab. 2: Bohrleistungen bei der Bohrung Höhensteinweg

Diese Bohrung zeigte in etwa die gleichen Bohrerergebnisse wie andere Bohrungen, die in der Oberpfalz hauptsächlich zu Uranexplorationszwecken abgeteuft worden sind. Die im Rahmen von Explorationsbohrprogrammen abgeteuften Bohrungen hatten im allgemeinen eine Teufe von nicht mehr als 1.000 m.

Bei den hier durchteuften Gneisen kamen ab einer Teufe von ca. 40 m Seilkernbohrsysteme zum Einsatz. Bei mittleren Standlängen von 18,95 m im Durchmesserbereich HQ (Kronendurchmesser: 95,6 mm) bzw. 29,76 m im NQ (Kronendurchmesser: 75,3 mm) wurden Bohrgeschwindigkeiten von 1,22 m/h (HQ) und 0,99 m/h (NQ) erzielt. Die Drehzahlen lagen je nach Durchmesser zwischen 400 U/min und 500 U/min.

Der Vergleich mit anderen Bohrungen zeigte, daß das Seilkernbohrverfahren bei größeren Teufen und teilweise stark zerklüftetem Gestein gegenüber dem Kernbohren mit Einfach- bzw. Doppelkernrohren das günstigere Bohrverfahren ist. Dies gilt auch für den bei Forschungsbohrungen besonders relevanten Kerngewinn. Ein Kerngewinn von 90 - 95 % war in kristallinen Formationen durchaus erreichbar.

Die Auswertung der Bohrleistungen im Hinblick auf die Auswahl optimaler Diamantkernbohrkronen ergab, daß eine Aussage, ob imprägnierte oder oberflächengesetzte Bohrwerkzeuge vorteilhafter sind, auf Grundlage der erzielten Bohrgeschwindigkeiten und Standzeiten allein nicht möglich ist. Hierzu sind weitergehende Untersuchungen, die auch die Einhaltung optimaler Bohrparameter (z.B. Andruck, Drehzahl, Spülrate) berücksichtigen, sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen erforderlich.

4 BOHRERFAHRUNGEN IN GEOTHERMALPROJEKTEN

Beim Bohren nach geothermalen Lagerstätten sind die wichtigsten Unterschiede gegenüber Erdöl- und Erdgasbohrungen:

- bei fast allen geothermischen Bohrungen ist der angetroffene Gebirgs- bzw. Lagerstättendruck niedrig (ausgenommen Druckwassersysteme)
- im Bohrloch treten oft mineralhaltige, aggressive Dämpfe oder Flüssigkeiten auf
- die zu bohrenden Gesteine sind häufig eruptiven oder metamorphen Ursprungs
- die Bohrlochtemperaturen sind schon in geringer Teufe höher, als es der normalen geothermischen Tiefenstufe entspricht.

Es wurden sowohl Geothermalbohrungen in kristallinen Formationen im Rahmen von Hot-Dry-Rock-Projekten (Cornwall, Los Alamos, Französisches Zentralmassiv) als auch Bohrungen in sedimentären Formationen (Italien) ausgewertet.

Das in dem Geothermalfeld Lardarello (Italien) anstehende Gestein war zum Teil so stark zerklüftet, daß während des Bohrens eine Abdichtung der Bohrlochwand in Verlustzonen wirtschaftlich nicht möglich war. Aus Kostengründen wurde daher eine Wasserspülung eingesetzt, die nicht zur Tagesoberfläche zurückkehrte (verlorene Spülung). Hohe Temperaturen (400° C) und starke Korrosion im Bohrloch führten zu Brüchen des Bohrgestänges.

Die besten Bohrleistungen erzielten im Feld Lardarello die Warzenmeißel F 3 und F 4 der Fa. Smith Tool. Die Lebensdauer dieser Meißel lag bei ca. 20 h bei mittleren Bohrfortschritten von 3 - 4 m/h. Alle ausgebauten Meißel wiesen starken Kaliberverschleiß auf.

Die Bohrungen im Rahmen von Hot-Dry-Rock-Projekten bestätigten die Feststellung, daß Warzenmeißel für harte und abrasive Formationen gut als Bohrwerkzeuge geeignet sind. Probleme traten bei der Temperaturbeständigkeit der Lagerdichtungen und beim Kaliberschutzz auf.

Die vielfach für den Einsatz in Verbindung mit Bohrlochsohlenantrieben ausgelegten Diamantmeißel erbrachten beim reinen Leistungsbohren keine guten Ergebnisse.

Die Untersuchungen zeigten ferner, daß sich der Bohrfortschritt durch den Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren in Verbindung mit Rollenmeißeln erhöhen läßt. Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz von Bohrlochsohlenantrieben sind eine geeignete Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik sowie eine ausreichende Temperaturbeständigkeit der in den Bohrlochsohlenmotoren verwendeten Elastomere. Hier könnten Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf die KTB ansetzen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung der Bohrerfahrungen im Hartgestein zeigte, daß mit Hilfe der Seilkernbohrtechnik bei kleinen Bohrlochdurchmessern sowie mit Hilfe der Rotarybohrtechnik bei großen Bohrlochdurchmessern kristalline Formationen durchteuft werden können.

Als alternatives Verfahren zum Rotarybohren bietet sich gerade für harte und spröde Formationen das Schlagende Bohren an. Die Einsatzfähigkeit dieses Bohrsystems ist derzeit aber bei großen Bohrlochdurchmessern noch nicht gegeben.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- ADAMS, P. (1985): Persönliche Mitteilung von Herrn P. Adams, Fa. Deilmann-Haniel, Dortmund
- BATCHELOR, A.S. (1984): Geothermal Energy Project, Well Drilling and Casing, Volume 2, General Report
- BERTINI, G. (1980): Deep exploration in Larderello field: Sasso 22 Drilling venture, Proceedings of the Second International Seminar on the Results of EC Energy Research, Strasbourg
- BGR (1985): Unterlagen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- CHRISTENSEN (1985): Unterlagen der Fa. Christensen, Celle
- GROSSEKEMPER, H.J. (1985): Konstruktionsmerkmale und erste Erfahrung beim Einsatz von Richtbohrmeißeln, Interne Mitteilung der Fa. Thyssen-Schachtbau, Mülheim, Ruhr
- HOMRIGHAUSEN (1985): Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Homrighausen, Fa. Prakla-Seismos, Uetze
- MERTENS, V.; WALUSSEK, H. (1984): Selbsttätig steuerndes Zielbohrsystem, Glückauf 120, Nr. 13, S. 819-822
- N.N. (1985): Blindhole boring at Vaal Reefs South, J.S.Afr. Min. Metall., Vol. 85, No. 11, S. 406
- N.N.: Sandvik-Coromant, Handbuch Gesteinsbohren, Bohrstahlanwendung, Kap. 12180:11
- N.N.: Down-the-hole drilling with COP-Drills, mining and construction methods, Druckschrift der Fa. Atlas Copco, Druck Nr. 15313 a, S. 30-34
- N.N.: Operating instructions with description for foaming concentrate DFA 51, Foam Stabilizer C, Atlas Copco, Druck Nr. 20200 a
- SCHÄDLE (1985): Persönliche Mitteilung von Herrn Schädle, Fa. Prakla-Seismos, Woringen
- SMITH TOOL (1985): Unterlagen der Fa. Smith Tool, Celle
- TENGELMANN, F. (1986): Auswertung von Bohrerfahrungen aus Bohrungen im Festgestein im Hinblick auf die KTB, Diplomarbeit am Institut für Bergbaukunde III

VINCENT, R.P.; WILDER, L.B. (1969): Penetration rate boosted by mud-powered percussion tool, World Oil, S.75-78

WEBER, S.(1977): Neuzeitliche Imloch-Hämmer und ihre Verwendungsmöglichkeiten beim Abteufen von Wasserbohrungen, Bergbau, S. 178-180

WIEBE (1985): Persönliche Mitteilung von Herrn Wiebe, Fa. Schwing Hydraulik, Herne

Eastman Christensen GmbH

Christensenstraße 1
3100 Celle

Vergleichende Untersuchung bohrtechnischer
und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher
Kernbohrverfahren

Dr.-Ing. J. Oppelt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	57
0. Einführung.....	59
1. Bohrleistungen im Kristallinen aufgrund vorliegender Erfahrungen.....	60
1.1 Ölfeld-Rotary-Kernen.....	60
1.2 Seilkernen (Bergbautechnik).....	64
2. Wirtschaftlichkeit von Rotary- und Seil- kernbohrtechniken bei ausgewählten Bohr- leistungen.....	66
2.1 Rotary-Bohrtechnik bis 3 000 m ET (ITAG V1) - Var 1.....	67
2.1.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag.....	67
2.1.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	68
2.2 Rotary-Bohrtechnik bis 5 000 m ET - Var 2.....	69
2.2.1 Bohrleistungen mit ITAG-Parametern.....	69
2.2.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	70
2.3 Kombination Rotary-Seilkern-Bohrtechnik - Var 3	70
2.3.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag.....	70
2.3.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	70
2.4 Seilkerntechnik - Var 4.....	71
2.4.1 Bohrleistungen nach GW-Vorschlag.....	71
2.4.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	73
3. Technische Bewertung von Bohrverfahren und Bohrgerät.....	73
4. Derzeitige und zukünftig erreichbare Bohr- leistungen imprägnierter Kronen im Kristallin-Gestein.....	78
5. Vergleichsberechnungen auf der Basis eines realistischen Konzeptes für die KTB-Vor- bohrung.....	79
6. Zusammenfassung.....	82

VORWORT

Die Studie wurde durch den Entwicklungsbereich der Eastman Christensen GmbH mit Unterstützung der Verkaufsabteilung für Bergbau-Werkzeuge erstellt. Während der Bearbeitungszeit erfolgte ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch mit der Projektleitung für die Kontinentale Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland (KTB) am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLFb).

Bereits während der Vorbereitung der Studie, vor dem eigentlichen Bearbeitungszeitraum, erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit den Firmen Microdrill AB, Grabo (Schweden), Gewerkschaft Walter AG, Essen, und Internationale Tiefbohr GmbH & Co KG (ITAG), Celle. Viele der dabei entstandenen detaillierten Informationen sind in die anschließend durchgeführte Studie eingegangen. Sie bilden insofern eine wichtige Grundlage für den Vergleich technischer und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher Kernbohrverfahren.

Viele Anregungen, Erfahrungen und Hinweise zahlreicher Mitarbeiter der Eastman Christensen GmbH haben den sachlichen Gehalt der Studie deutlich vermehrt. Informationen zu möglichen Bohrlochmessungen, insbesondere in engen Bohrlöchern, wurden mit Unterstützung entsprechender Service-Firmen zusammengestellt.

Der Gesamtbericht über die Studie gliedert sich in zwei Teile. Im Hauptteil wird das Thema zusammenfassend dargestellt. In einem separaten, umfassenden Anhang finden sich die im Vorfeld der eigentlichen Studie erstellten Beiträge der genannten Bohrfirmen, ausführliche Literaturrecherchen zu zentralen Problemstellungen der Arbeit und weitergehende Informationsunterlagen.

Die vorliegende Zusammenfassung enthält schwerpunktmäßig eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der bis dahin bekannten kernbohrtechnischen Systeme unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Gegen Ende der Bearbeitungsdauer der Studie konnten bereits Ansätze für ein optimiertes System zum kontinuierlichen Kernbohren in der Vorbohrung des KTB-Projekts herausgearbeitet werden.

Celle, im März 1988

0. EINFÜHRUNG

Ziel der Studie ist eine vergleichende Betrachtung technischer und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher Bohrverfahren zum Abteufen der geplanten KTB-Vorbohrung im Kristallin. Bis zum Erreichen der vorgesehenen Endteufe von 3000 m soll vollständig gekernt werden. In der Studie werden dazu der konventionellen Ölfeld-Rotary-Technik die im Bergbau häufiger eingesetzten Seilkern- und Slimhole-Verfahren gegenübergestellt. Die Studie wurde von Eastman Christensen GmbH (EC) im Auftrag der Projektleitung für die Kontinentale Tiefbohrung (KTB) erstellt. Während der Vorbereitungsphase für die Studie bestand ein enger Informationsaustausch zwischen EC und drei Bohrfirmen, die jeweils für eine Hauptvariante als sachkundig und erfahren gelten. Dies sind:

- (a) ITAG, Celle, für Rotary- und kombinierte Rotary/Seilkern-Verfahren
- (b) Gewerkschaft Walter, Essen, für Bergbau-Seilkernverfahren
- (c) Microdrill, Gräbo (Schweden) für Slimhole/Seilkern-Verfahren.

Aufgrund der inzwischen als unzulänglich angesehenen Maximalwerte von 2350 m ET und 76 mm Bohrlochdurchmesser werden die Vorschläge von Microdrill für Slimhole-Bohrtechnik in diesem Zusammenhang nicht weiter berücksichtigt.

Der vorliegende Bericht umfaßt folgende Punkte:

- (1) Bohrleistungen im Kristallin-Gestein aufgrund vorliegender Erfahrungen
- (2) Wirtschaftlichkeit von Rotary- und Seilkern-Bohrtechniken bei ausgewählten Bohrleistungen
- (3) Einschätzung der derzeit möglichen Bohrleistungen imprägnierter Bohrkronen und realistische Entwicklungsfähigkeit bis zum voraussichtlichen Beginn der Bohrarbeiten.
- (4) Wirtschaftlichkeits-Vergleichsrechnungen auf der Basis eines realistischen Konzepts für die KTB-Vorbohrung

Selbstverständlich bilden die tatsächlich erreichte Bohrgeschwindigkeit und die Standlänge der Bohrkronen wesentliche Kostenfaktoren für die KTB-Vorbohrung.

1. BOHRLEISTUNGEN IM KRISTALLIN AUFGRUND VORLIEGENDER ERFABRUNGEN

In der Studie werden Bohrleistungen imprägnierter Diamantkronen aufgeführt, die im wesentlichen in Bohrungen der NAGRA (Schweiz), bei der Lokationsvorerkundung für die KTB im Schwarzwald und in der Oberpfalz sowie in der Bohrung Urach eingesetzt worden waren. Bohrfortschritt und Standlänge werden für Ölfeld-Rotary-Kernen und Seilkern-Techniken dargestellt.

Bei der Bewertung dieser Leistungsdaten muß grundsätzlich beachtet werden, daß Bohrparameter wie Beschaffenheit des Kristallin-Gesteins, optimale Einstellung der Bohranlage, optimale Anpassung der Bohrwerkzeuge, u.ä. hier nicht berücksichtigt oder nicht zugeordnet wurden.

1.1 Ölfeld-Rotary-Kernen

Kronen 6 7/32" x 3 1/2"

In den Bohrungen Böttstein und Weiach wurden imprägnierte Diamantkronen der Abmessung 6 7/32" x 3 1/2" mit Doppelkernrohren eingesetzt. Die Zusammensetzung der Meißelmatrix bzw. der Diamantsplitter wurden während der Bohrarbeiten verändert. Unterschiedliche Ergebnisse mit verschiedenen Typen sind im vollständigen Bericht der Studie separat dargestellt. Ohne Unterscheidung der Kronentypen erhält man folgende Verteilung des Bohrfortschritts und der Standlänge (insgesamt 73 Bohrkronen):

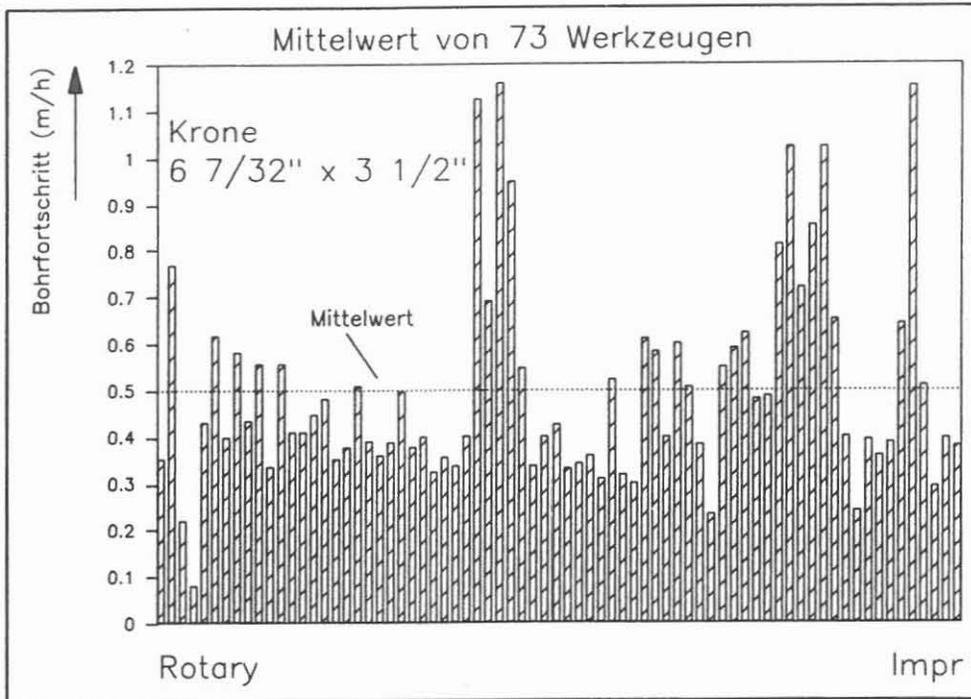


Abb. 1: Bohrfortschritt von 73 imprägnierten Kronen der Größe 6 7/32" x 3 1/2"

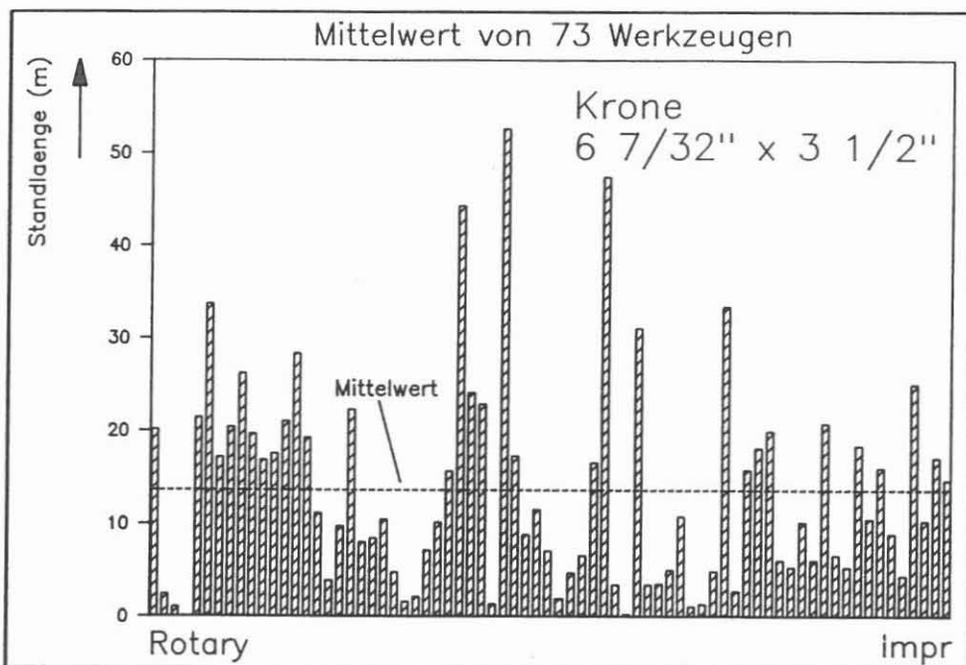


Abb. 2: Standlängen von 73 imprägnierten Kronen der Größe 6 7/32" x 3 1/2"

Der Mittelwert von 0,5 m/h charakterisiert nach Abb. 1 den Bohrfortschritt recht typisch, eine besondere Häufung ist bei 0,4 m/h festzustellen. Die Standlängen streuen nach Abb. 2 sehr stark, so daß der Mittelwert von 13,6 m statistisch zu interpretieren ist.

Kronen 8 1/2" x 4"

Imprägnierte Bohrkronen der Größe 8 1/2" x 4" bohrten in den Bohrungen Schafisheim und Urach mit Mittelwerten von 0,58 m/h (Abb. 3) und 10,9 m (Abb. 4), wobei wieder die Standlänge besonders stark streut. Bei Einsatz eines Untertagedirektantriebs NAVI-DRILL wurden in 3 Einsätzen in Urach Mittelwerte von 1,65 m/h und 21,8 m erreicht. Der Drehzahl des Drehtisches von 45 1/min wurde die Drehzahl des Untertageantriebs von ca. 250 1/min. überlagert, so daß die Bohrkronen mit 295 1/min gedreht wurde.

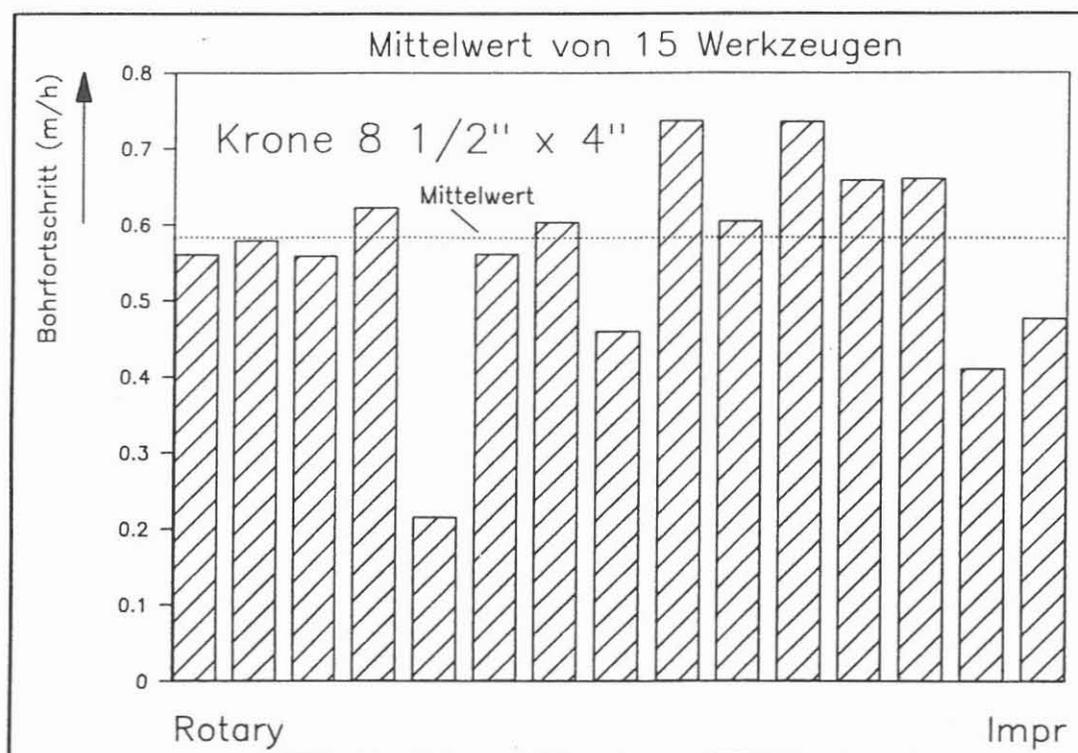


Abb. 3: Bohrfortschritte von 15 imprägnierten Kronen der Größe 8 1/2" x 4"

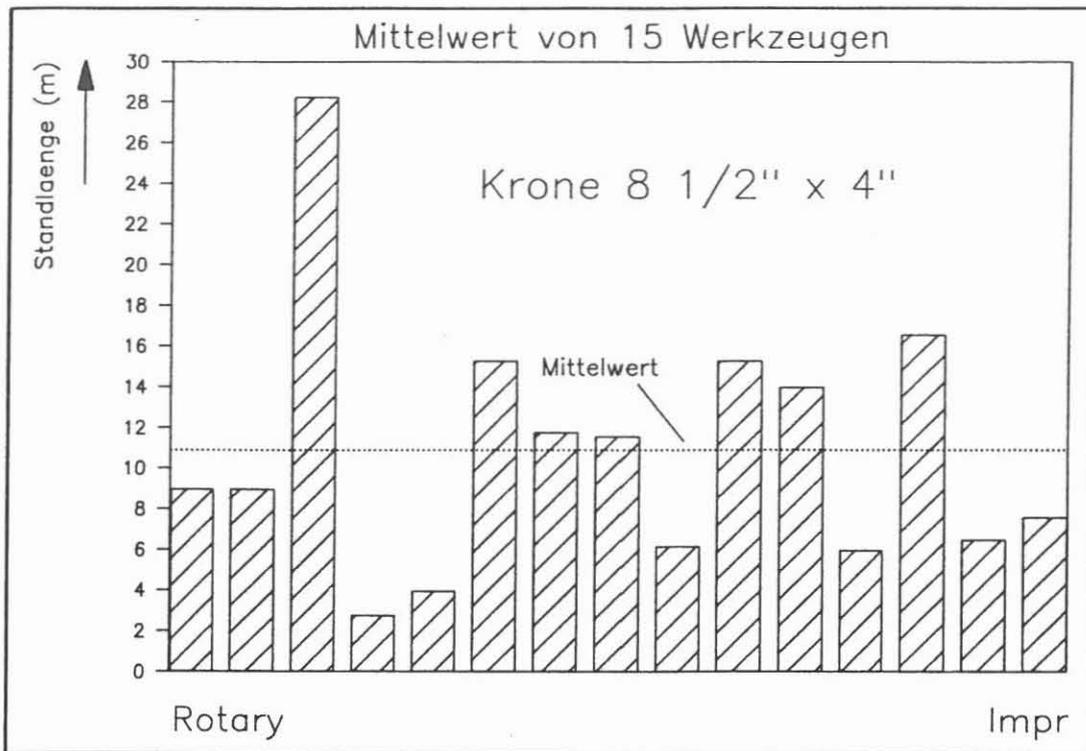


Abb. 4: Standlängen von 15 imprägnierten Kronen der Größe 8 1/2" x 4"

8 1/2" x 4" BallaSet-Werkzeuge

In bestimmten Sektionen der Bohrung Schafisheim wurden Kronen erfolgreich eingesetzt, die mit synthetischen "Geoset" Schneidelementen besetzt waren. Für 6 Werkzeuge konnten durchschnittliche Bohrleistungen von 1,7 m/h und 23,5 m erzielt werden. Diese Leistungen liegen um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei imprägnierten Kronen. Der effektive Einsatz der oberflächengesetzten Werkzeuge war hier möglich, weil der Granit/Gneis eine verwitterte, weniger kompakte, Konsistenz aufwies.

Krone 135 x 101 mm

Aus den 5 abgeteufte Flachbohrungen zur Vorerkundung der Lokation Oberpfalz erhält man als Mittelwert der Einsätze mit Diamantwerkzeugen Werte von 1,0 m/h und 25,7 m. Typische Standlängen liegen nach Abb. 5 bei 30 m.

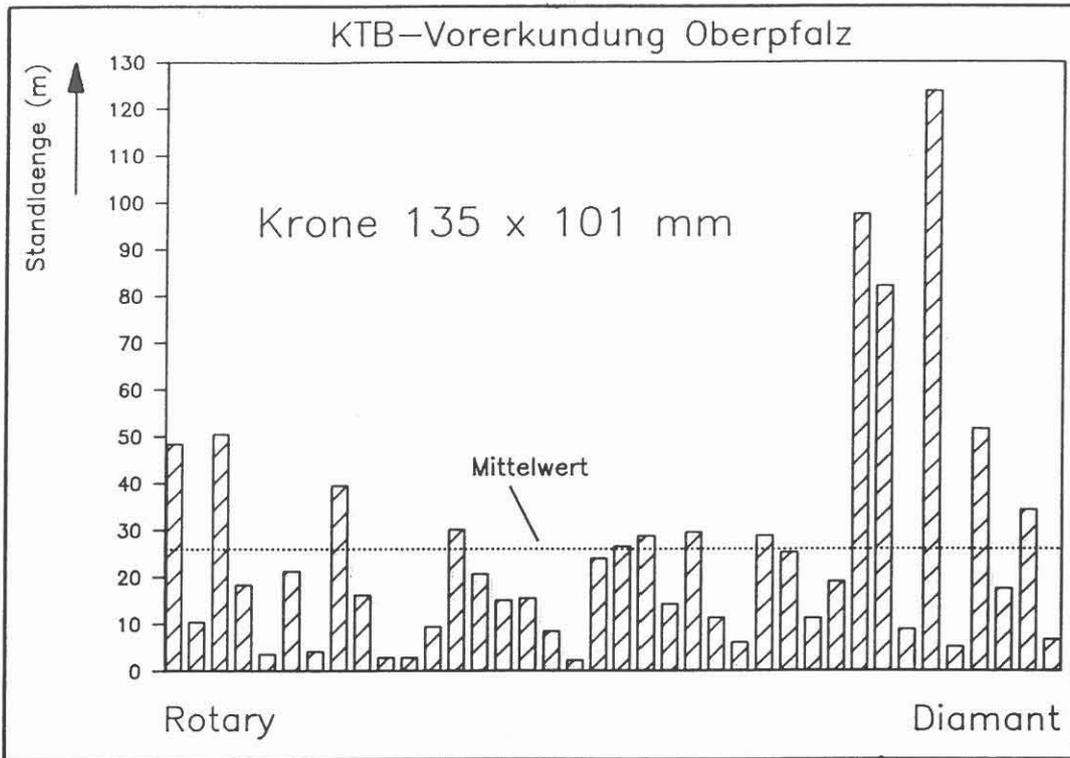


Abb. 5: Standlängen mit Kronen der Größe 135 x 101 mm

1.2 Seilkernen (Bergbautechnik)

System 134 x 85

In den Bohrungen der NAGRA wurde das 134er System mit unterschiedlichen Kronen-Außendurchmessern bis 140 mm erprobt, um die Geometrie von Lippenbreite und Ringraum zu optimieren. Generell muß einer Bewertung der Ergebnisse vorangestellt werden, daß die verwendete Erdöl-Bohranlage nicht die Einstellung optimaler Betriebsparameter zuließ, obwohl bereits bestimmte Modifikationen vorgenommen worden waren. Zusätzliche Probleme ergaben sich aus der Notwendigkeit, orientiert zu kernen. Aus der zusammenfassenden Auswertung der Einsätze von 49 imprägnierten Bohrkronen auf der Bohrung Leuggern erhält man einen mittleren Bohrfortschritt von 1,3 m/h, der nach Abb. 6 allerdings in vielen Fällen auch übertroffen wird. Als Mittelwert der erzielten Standlänge errechnet man 12,7 m, wobei entsprechend Abb. 7 wieder eine besonders starke Streuung der Einzelwerte auftritt.

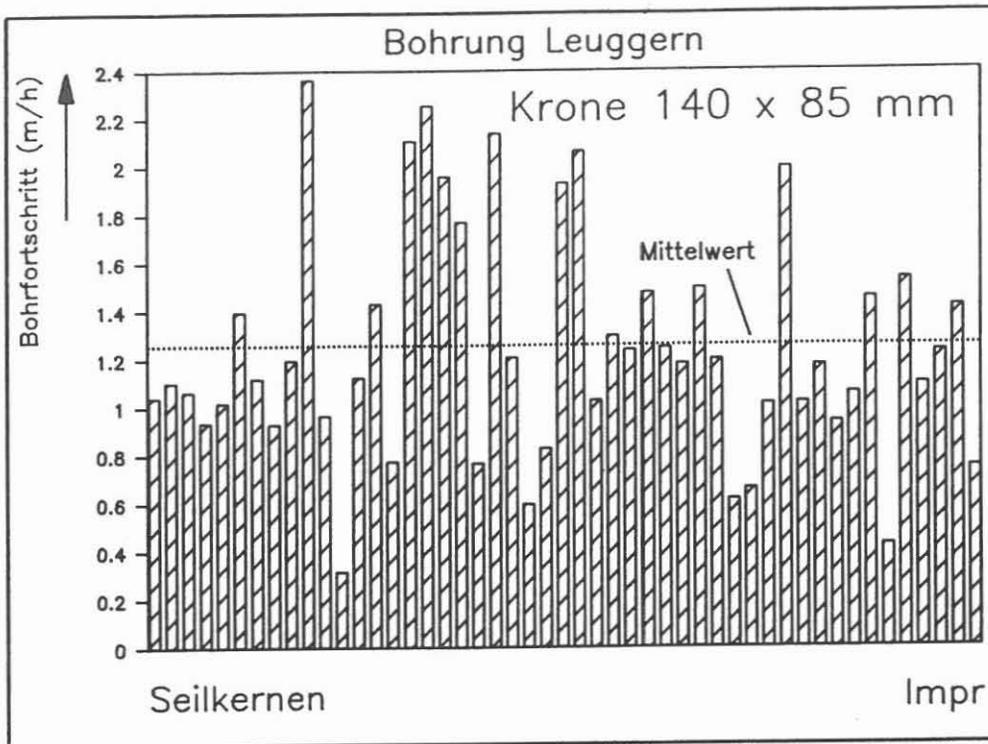


Abb. 6: Bohrfortschritte von 49 imprägnierten Kronen der Nenngröße 134 x 85 mm (OD 134 - 140 mm)

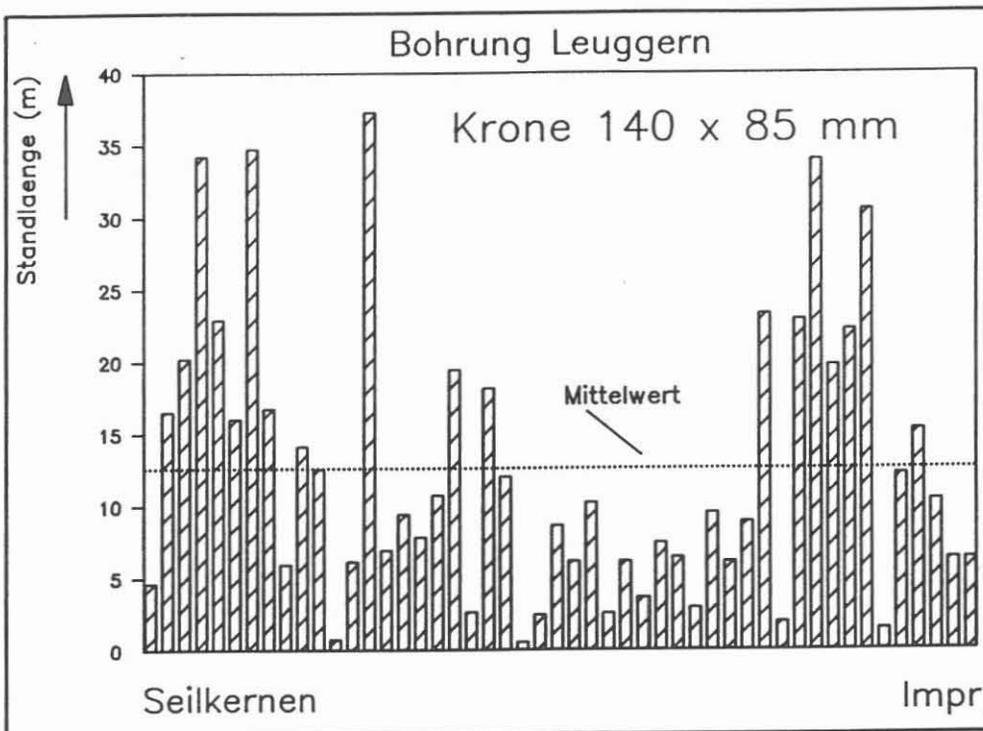


Abb. 7: Standlängen von 49 imprägnierten Kronen der Nenngröße 134 x 85 mm (OD 134 - 140 mm)

Mittelt man die Ergebnisse der drei Bohrungen Leuggern, Schafisheim und Kaisten, so erhält man Werte von ca. 1,2 m/h bzw. 14,2 m.

Kernrohr 122 x 79 mm

Durchschnittliche Bohrleistungen bei Flachbohrungen im Granit/ Gneis zur KTB-Vorerkundung der Lokation Oberpfalz betragen 1,0 m/h und 31 m. Es wurden imprägnierte und gesetzte Diamantwerkzeuge eingesetzt.

2. WIRTSCHAFTLICHKEIT VON ROTARY- UND SEILKERN-BOHRTECHNIKEN BEI AUSGEWÄHLTEN BOHRLEISTUNGEN

Die Berechnung der Kosten wurde für die jeweilige technische Variante zunächst bei der entsprechenden Bohrfirma durchgeführt, mit der im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten zur Studie eine Zusammenarbeit bestand. Der Verfasser der Studie hat das verwendete Rechenschema so umgesetzt, daß eine Nachrechnung mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms auf einem Personal Computer möglich ist. Auf diese Weise können die Kalkulationen relativ einfach mit veränderten Ausgangsparametern, z.B. Bohrfortschritt, Anlagenkosten, u.a. nachvollzogen werden.

In der vorliegenden Zusammenfassung wurden vier Varianten miteinander verglichen. Dabei bleibt der eventuell erforderlich werdende Einbau einer Zwischenrohrtour unberücksichtigt. Bis 250 m Teufe wird eine Ankerrohrtour eingebaut, als ET ist 3000 m (zusätzlich 5000 m für Rotary-Technik) vorgesehen.

- | | |
|---------------------------------|--|
| Var 1 (ITAG V1): | 8 1/2" x 4" bis 250 m,
6 3/4" x 3 1/2" bis 3000 m
(Ölfeld Rotary-Technik) |
| Var 2 (ITAG V1): | wie Var 1, jedoch 5000 m ET |
| Var 3 (ITAG V3): | 6 3/4" x 3 1/2" bis 250 m,
134 x 85 mm bis 3000 m
(Kombination Rotary/
Seilkern-Technik) |
| Var 4 (Gewerkschaft Walter V2): | 159 x 101 mm bis 250 m,
Erweitern auf 8 1/2" bis
250 m, 159 x 101 mm bis
3000 m
(Seilkern-Technik) |

2.1 Rotary-Bohrtechnik bis 3000 m ET (ITAG V1)

2.1.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag

Für die Variante Var1 erhält man unter Verwendung der von ITAG gewählten Ausgangsbedingungen die Ergebnisse nach Tabelle 1 unter "Variante 1".

Es werden Werte $V_b = 0,8$ m/h für 8 1/2" und $V_b = 1$ m/h für 6 3/4" zugrunde gelegt.

KTB-Vorbohrung:Vorschlaege ITAG		(Ohne Zusatzrohrtour bis 1000 m!)	
Endteufe (3000 m):	3000	vb 8 1/2" (m/h):	0.8
ROP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	1
Standl (Rota 18m):	18	vb 4 3/4" (m/h):	1.4
(WL 24m):	24	vb 134 (m/h):	1.2
(RO 30m):	30	vb 101 (m/h):	1.5
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DM):	29000
AnlKst Seilk/d(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DM):	19000
Bau Platz (DM 60/m2):	60	Krone 4 3/4" (DM):	10000
Rekultivieren (DM20/m2):	20	Krone 134 mm (DM):	8000
Kraftstoff (DM 1/l):	1	Krone 101 mm (DM):	5000
Kostenabschaetzung (TDM)			Zeitplanung
	Variante 1	Variante 3	Var 1 Var 3
Bohrloch	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Bohrzeit Rotary 129 11
Gesamtkosten	7423	4955	Bohrzeit Seilkernen 95
			Roundtrip-Zeit 73 68
Bohrplatz	200	200	Nebenarbeiten (*) 8 8
Transport	65	65	
Aufbau	65	65	Gesamtdauer 210 182
Abbau	43	43	
Anlagenkosten	3023	2226	(*): Ohne 1000 m-Zusatzrohrtour
Kraftstoff	302	196	
Kronen, Kernrohre	3348	1939	
Spuelung	9	7	
Abfuhr, Deponie	16	12	Bohrplatzkosten
Verrohrung	32	22	
Rohreinbau	3	3	Platzgroesse (m2): 2500
Zementation	6	5	Baukosten (DM/m2): 60
Verflanschung	10	5	Rekultiv (DM/m2): 20
Mieten	100	17	
Messungen, Teste			Gesamtkosten 200
Unvorhergesehenes	200	150	
Gesamtkosten	7423	4955	

Tabelle 1

2.1.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Es werden Modellrechnungen für $V_b = 0,5$ und 1 m/h sowie Standlängen s_k von 15 und 20 m vorgelegt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für $V_b = 0,5$ m/h und $s_k = 15$ m.

KTB-Vorbohrung:Vorschlaege ITAG		(Ohne Zusatzrohrtour bis 1000 m!)	
Endteufe (3000 m):	3000	vb 8 1/2" (m/h):	0.5
ROP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	0.5
Standl (Rota 18m):	15	vb 4 3/4" (m/h):	0.5
(VL 24m):	24	vb 134 (m/h):	0.5
(BO 30m):	30	vb 101 (m/h):	0.5
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DM):	29000
AnlKst Seilk/d(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DM):	19000
Bau Platz (DM 60/m2):	60	Krone 4 3/4" (DM):	10000
Rekultivieren (DM20/m2):	20	Krone 134 mm (DM):	8000
Kraftstoff (DM 1/l):	1	Krone 101 mm (DM):	5000
Kostenabschaetzung (TDM)		Zeitplanung	
	Variante 1	Variante 3	Var 1 Var 3
Bohrloch	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Bohrzeit Rotary 253 21
Gesamtkosten	10401	6933	Bohrzeit Seilkernen 229
			Roundtrip-Zeit 88 68
Bohrplatz	200	200	Nebenarbeiten (*) 8 8
Transport	65	65	
Aufbau	65	65	Gesamtdauer 348 326
Abbau	43	43	
Anlagenkosten	5013	3985	(*): Ohne 1000 m-Zusatzrohrtour
Kraftstoff	501	352	
Kronen, Kernrohre	4049	1995	
Spelung	9	7	
Abfuhr, Deponie	16	12	Bohrplatzkosten
Verrohrung	32	22	
Rohreinbau	3	3	Platzgroesse (m2): 2500
Zementation	6	5	Baukosten (DM/m2): 60
Verflanschung	10	5	Rekultiv (DM/m2): 20
Mieten	187	24	
Messungen,Teste			Gesamtkosten 200
Unvorhergesehenes	200	150	
Gesamtkosten	10401	6933	

Tabelle 2

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Kosten für unterschiedliche Parameter.

vb (m/h) \ sk (m)	10	15	18	20
0,5	13078	10401	9508	9062
0,8/1,0 (ITAG-Vorschlag)	-	-	7423	-
1,0	10947	8269	7377	6930

Tabelle 3: Kosten (TDM) für Var 1

2.2 Rotary-Bohrtechnik bis 5000 m ET

2.2.1 Bohrleistungen mit ITAG-Parametern

Unter Verwendung der von ITAG vorgeschlagenen Leistungsparameter erhält man als Var 2 für ET = 5000 m die in Tabelle 4 dargestellte Kostenabschätzung unter der Spalte "Variante 1". Die Bohrgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/h für 8 1/2" und 1 m/h für 6 3/4", als Standlänge werden 18 m angenommen.

EYS-Vorbohrungsvorschläge ITAG (Ohne Einsatzrohrtour bis 1000 m)				
Endtiefe (3000 m):	5000	vb 8 1/2" (m/h):	0,8	
ROP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	1	
Standl (Rota 18m):	18	vb 4 3/4" (m/h):	1,4	
(WL 26m):	24	vb 134 (m/h):	1,2	
(BO 30m):	30	vb 101 (m/h):	1,5	
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DK):	29000	
AnlKst Seilk/4(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DK):	19000	
Bau Platz (DK 60/m ²):	60	Krone 4 3/4" (DK):	10000	
Rekultivieren (DK20/m ²):	20	Krone 134 m (DK):	8000	
Kraftstoff (DK 1/1):	1	Krone 101 m (DK):	5000	
Kostenabschätzung (TDM)				
	Variante 1	Variante 3	Zeitplanung	
	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Var 1	Var 3
Bohrloch			Bohrzeit Rotary	213
Gesamtkosten	12801	8241	Bohrzeit Seilkernen	165
Bohrplatz	200	200	Roudtrip-Zeit	141
Transport	65	65	Rebenarbeiten (*)	8
Aufbau	65	65	Gesamtdeuer	410
Abbau	43	43		359
Anlagenkosten	5910	4347	(*) : Ohne 1000 m-Einsatzrohrtour	
Kraftstoff	591	387		
Kronen, Kernrohre	5486	2906		
Spülung	12	10		
Abfuhr, Deponie	21	17	Bohrplatzkosten	
Verrohrung	32	22		
Bohreinbau	3	3	Platzgroesse (m ²):	2500
Sementation	6	5	Baukosten (DK/m ²):	60
Verflanschung	10	5	Rekultiv (DK/m ²):	20
Mieten	156	17	Gesamtkosten	200
Messungen, Tests				
Unvorhergesehenes	200	150		
Gesamtkosten	12801	8241		

Tabelle 4

2.2.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Bei Einführung alternativer Leistungsparameter, wie in Abschnitt 2.1.2, erhält man für die 5000 m-Variante Kosten nach Tabelle 5.

vb (m/h) \ sk (m)	10	15	18	20
0,5	23036	17986	16303	15461
0,8/1,0 (ITAG-Vorschlag)	-	-	12801	-
1,0	19489	14439	12755	11914

Tabelle 5 Kosten (TDM) für Var 2

2.3 Kombination Rotary-Seilkern-Bohrtechnik - Var 3

Bis zur Ankerrohrteufe von 250 m wird mit Ölfeld-Doppelkernrohr 6 3/4" x 3 1/2" gebohrt, anschließend soll bis 3000 m mit Seilkern-System 134 weitergearbeitet werden.

2.3.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag

Ausgangsbedingungen und Kostenabschätzung sind unter "Variante 3" in Tabelle 1 abzulesen. Als Bohrfortschritte werden 1 m/h für die 6 3/4"-Krone mit Rotary-Doppelkernrohr und 1,2 m/h für das Seilkernsystem angesetzt.

2.3.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Bei Einführung alternativer Werte für V_b und sk erhält man entsprechend abweichende Kostenschätzungen (Tabelle 6).

vb (m/h) Rk \ Sk		sk (m) Rk	10			15			18			20		
			Sk	20	24	30	20	24	30	20	24	30	20	24
0,5	1,0		5893	5603	5313	5724	5434	5144	5668	5378	5088	5640	5350	5060
	1,2		5643	5353	5063	5474	5185	4895	5418	5128	4838	5390	5100	4810
	1,5		5393	5103	4813	5225	4935	4645	5168	4878	4589	5140	4850	4560
1,0	1,0		5720	5430	5140	5551	5261	4971	5495	5205	4915	5467	5177	4887
	1,2		5470	5180	4890	5301	5011	4721	5245	4955	4665	5217	4927	4637
	1,5		5220	4930	4640	5051	4761	4471	4995	4705	4415	4967	4677	4387

Tabelle 6: Kosten (TDM) für Var 3

2.4 Seilkerntechnik - Var 4

2.4.1 Bohrleistungen nach GW-Vorschlag

Gewerkschaft Walter rechnet für das 6 1/4"-Bohrloch mit einem Bohrfortschritt von $V_b = 0,8$ m/h und bei imprägnierten Kronen mit einer Standlänge $S_k = 30$ m. Tabelle 7 zeigt die Kosten der einzelnen Bohrphasen; es fallen für die Abschätzung ohne Einbau einer eventuell erforderlichen Zwischenrohrtour TDM 4270 an.

2.4.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Es werden die Ergebnisse von Modellrechnungen mit $V_p = 1$ bzw. $1,5$ m/h sowie $s_k = 20$ bzw. 30 m als Alternativen zur Kostenabschätzung vorgelegt (Tabelle 8).

sk (m) \ vb (m/h)	0,8	1	1,2
20	4832	4459	4211
24	4551	4178	3930
30	4270	3897	3649

Tabelle 8: Kosten (TDM) für Var 4

3. TECHNISCHE BEWERTUNG VON BOHRVERFAHREN UND BOHRGERÄT

Wirtschaftliche und bohrtechnische Fragestellungen stehen bei der Suche nach einem für die Zwecke der KTB-Vorbohrung optimalen System in engem Zusammenhang. So ist beispielweise prinzipiell davon auszugehen, daß eine minimierte Kronenlippenfläche nur die Zerstörung eines relativ kleinen Gesteinsvolumens erfordert und aufgrund der günstigen Kühlmöglichkeiten für die Diamant-Schneideelemente einen höheren Bohrfortschritt ermöglicht. Beide Einflüsse verbessern die Wirtschaftlichkeit der Diamantkronen. Ein zusätzlicher Kostensenkungseffekt sollte sich dadurch ergeben, daß auf einer schmalen Lippe nur wenig Diamantenmaterial benötigt wird.

Die Lippenbreite der Bohrkronen wird nach außen durch den Bohrlochdurchmesser festgelegt. Der Innendurchmesser der Krone bestimmt den Durchmesser des erbohrten Gesteinskerns. Eine gute Möglichkeit zur Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit des Kernbohrprozesses ergibt sich insbesondere im schwer zu erbohrenden Gebirge durch Einsatz des Seilkernverfahrens. Hier muß aber der Innendurchmesser der Krone derart gestaltet sein, daß der damit erbohrte Gesteinskern zusammen mit dem unverzichtbaren Innenkernrohr durch die Gestängeverbinder hindurch gezogen werden kann.

Letztlich bilden die konstruktive Gestaltung und Werkstoffparameter der Verbinder wichtige Bestimmungsgrößen für die Belastbarkeit, d. h. Teufenkapazität sowohl eines Seilkern- als auch eines Drehbohrgestänges. Die im Rahmen der verschiedenen Vorschläge der Bohrfirmen vorgesehenen Gestängetypen wurden auf die zu erwartende Festigkeit bei der Ziel-Bohrlochteufe von 300 m überprüft. Außerdem wurde auch untersucht, bis zu welcher maximalen Endteufe ein Einsatz möglich wäre.

Die vergleichenden Untersuchungen der Bohrstrangfestigkeit wurden zunächst für den einfachen Belastungsfall eines verkanterten Gewindes sowie zusätzlicher Beaufschlagung mit einer Axiallast durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten für den Fall einer freien Aufhängung in Luft anstelle der Wasser-Bohrspülung, was zu einem konservativen Ergebnis im Sinne einer höheren Sicherheit führt.

Auf Basis der bekannten mathematischen Beschreibungsmodelle zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen aufgebrachtem Kontermoment und zulässiger Axialkraft wurde ein Rechenprogramm aufgestellt. Nach Eingabe der jeweiligen Geometrie- und Werkstoffparameter erhält man Darstellungen nach Abb. 8. Hieraus läßt sich ein empfohlener sicherer Arbeitsbereich ablesen, in dem weder eine Trennung der Schultern noch eine Belastung des Materials über das zugelassene Vielfache der Streckgrenze, z. B. 0,55, erfolgen.

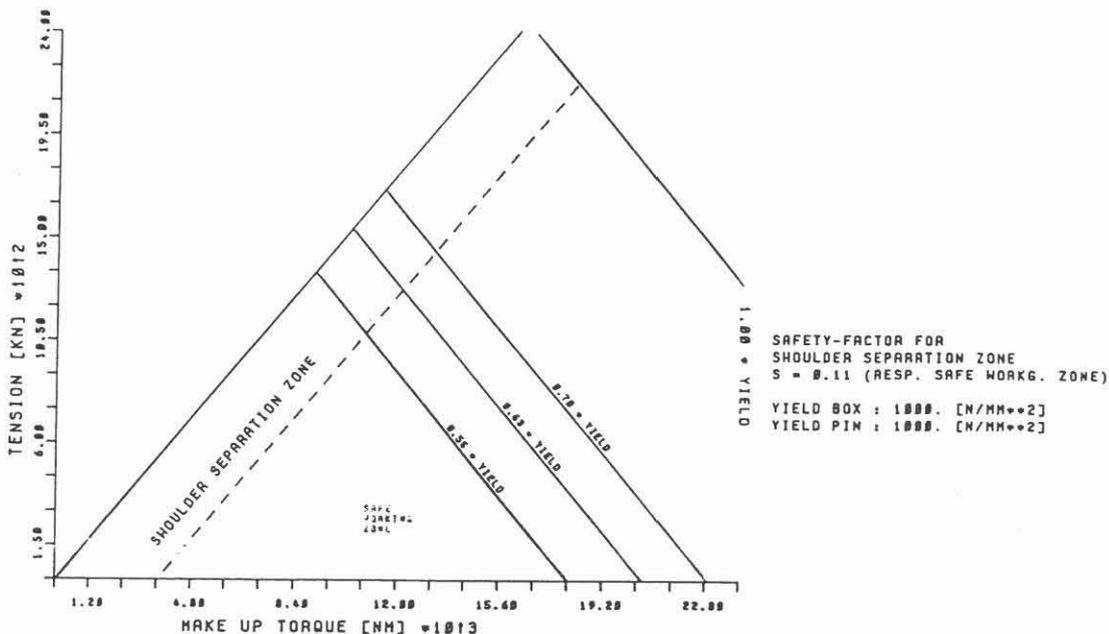


Abb. 8: Zugbelastbarkeit über dem Kontermoment für ein Seilkerngestänge

Dieses analytische Auslegungsprogramm berücksichtigt jedoch nur die globale Beanspruchung der gefährdeten Querschnitte der Bauteile Muffe und Zapfen, insbesondere die Entlastungsfreidrehung des Zapfens, nicht aber die Einflüsse der Belastungseinleitungen und besonders der Bauteilformgebung im Bereich der Verzahnung, Entlastungsnut usw.

Hier bietet die Anwendung von Finite Elemente Methoden (FEM) wirksame Unterstützung zur Auffindung von Schwachstellen und Ansätzen zur Verbesserung der Geometrie.

Die FEM-Berechnung wird bei Eastman Christensen mit dem Programmpaket ANSYS durchgeführt. Zur Modellierung verwendet man ebene, axialsymmetrische Elemente. Die Verbindung zwischen Muffe und Zapfen wird durch Gap-Elemente auf den Gewindeflanken erreicht. Diese Gap-Elemente werden auch für die Verbindung der Schultern von Muffe und Zapfen eingesetzt, wobei durch die Vorgabe einer Interferenz die Wirkung eines Verschraubmoments simuliert wird. An dieser Stelle fließen die Aussagen des analytischen Gewindeauslegungsprogramms in die FEM-Rechnung ein, da die berechnete Schulterspannung durch die Gap-Elemente der Gewindegewinde aufgebracht werden muß.

Die Vernetzung der Bauteile zeigt Abb. 9. Die Gewindegänge sind dabei mit beidseitig anliegenden Flanken modelliert, was dem Zustand einer verschraubten Verbindung entspricht.

Zur Darstellung der Spannungsverteilung wurden am Bildschirm oder auf dem Hardcopy-Gerät die Elemente in unterschiedlicher Färbung dargestellt. Mit Hilfe von FEM kann so deutlich aufgezeigt werden, welche Bereiche der Verzahnung im Detail geändert werden müssen um dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung näherzukommen.

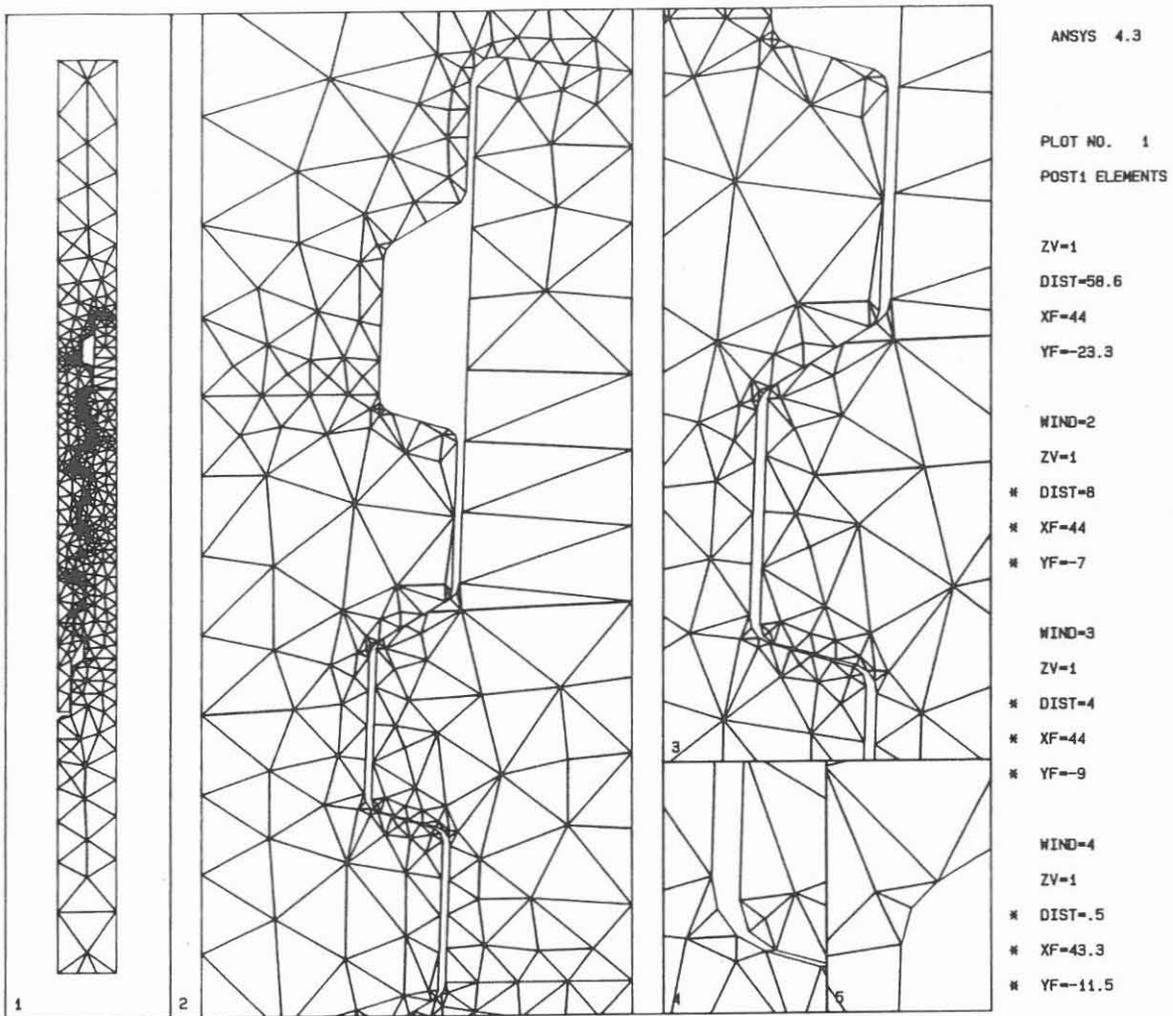


Abb. 9: Elementverteilung für FEM-Gewindeuntersuchung

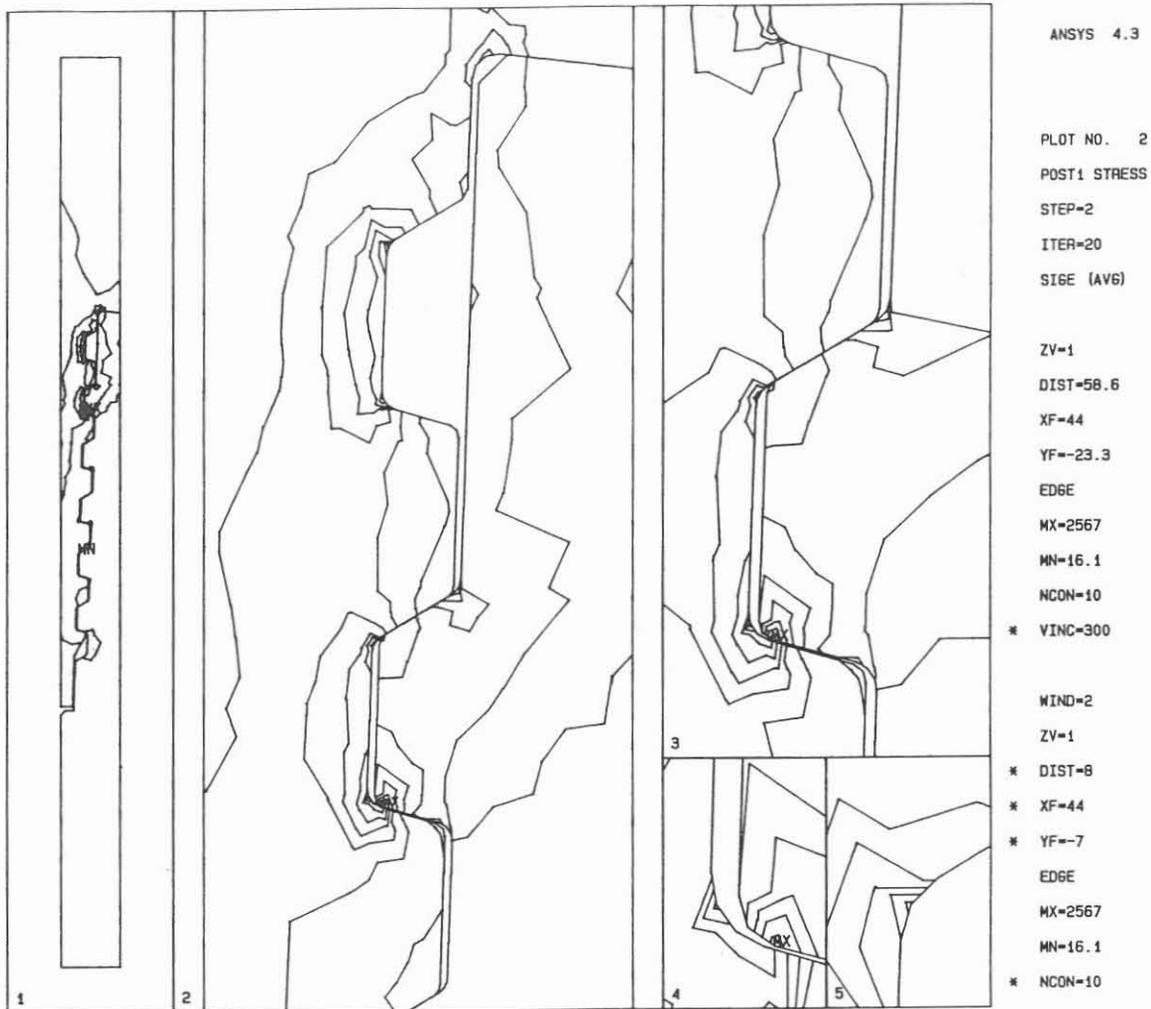


Abb. 10: Beispiel eines FEM-Plots von Spannungskonzentrationen im Gewinde

Die besondere Bedeutung der Finite Elemente Methode wird bei ihrer Anwendung im Rahmen der Neuauslegung von Gewindeverbindern deutlich, wenn aufgrund der äußeren Leistungsanforderungen eine optimale Ausnutzung von Baupraum und Werkstoffeigenschaften notwendig ist.

Bei einigen der von den Bohrfirmen zum Abteufen der KTB-Vorbohrung vorgeschlagenen Gestängen, insbesondere der von diesen zum Teil selbst entwickelten Seilkernbohrgestänge, wurde bereits ein Trend zur Optimierung der Teufenkapazität deutlich. Durch Reduzierung des Stranggewichts und Wahl eines Werkstoffes erhöhter Festigkeit konnten Fortschritte gegenüber früheren Ausführungen

erzielt werden. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten sind erkennbar im Bereich einer weiter gesteigerten Materialfestigkeit und einer optimierten Gewindeauslegung an den Verbinderteilen.

Gegenüber dem Bohrgestänge und den Bohrkronen ist die Bewertung der vorgeschlagenen Bohranlagen mit geringerer Priorität behandelt worden. In diesem Bereich können noch zu einem späteren Zeitpunkt Modifikationen vorgenommen werden, ohne daß damit die Entscheidung für ein Bohrsystem getroffen ist. Eine Ausnahme bilden allerdings die Vorschläge der schwedischen Firma Microdrill. Sie basieren grundsätzlich auf der Verwendung sehr spezieller kleiner Bohranlagen, die aufgrund ihrer beschränkten Teufenkapazität für den Einsatz in der KTB-Vorbohrung nicht in Betracht kommen.

4. DERZEITIGE UND ZUKÜNFTIGE ERREICHBARE BOHRLEISTUNGEN IMPRÄGNIERTER KRONEN IM KRISTALLINGESTEIN

Nach bisher vorliegenden Erfahrungen können beim gegenwärtigen Entwicklungsstand folgende Bohrleistungen im Kristallin erreicht werden:

	Vb (m/h)	sk (m)
Rotary (RK)	0,5	12
Seilkernen (SK)	1,1	20

Diese Angaben sind möglicherweise eher konservativ, weil sie im wesentlichen auf der Auswertung der Einsätze bei der NAGRA beruhen, bei denen nicht die optimalen Betriebsbedingungen vorlagen (Orientiertes Kernen, Drehzahl, Spülung).

Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich des Bohrfortschritts bestehen hauptsächlich in der Wahl optimaler Betriebsparameter, insbesondere durch Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bzw. Drehzahl. Versuchs-Einsätze mit Bohrmaschinen und Rotary-Doppelkernrohren erbrachten Verbesserungen des Bohrfortschritts um mehr als 100 %. Dabei wurden gleichzeitig auch Erhöhungen der Standlänge beob-

achtet, die auf die reduzierte Andruckkraft und ein verändertes Verhalten der Matrix zurückgeführt werden. Auch beim Seilkernen sollten höhere Drehzahlen zu höheren Bohrleistungen führen.

Verbesserungen der Standlänge imprägnierter Kronen sind auch durch konstruktive und werkstoff-technische Änderungen an der Diamantkrone zu erwarten. In einem überschaubaren Entwicklungszeitraum werden folgende Werte für möglich gehalten:

	sk (gegenwärtig)	sk (zukünftig)
Rotary (RK)	12 m	30 m
Seilkernen (SK)	20 m	40 - 50 m

5. VERGLEICHSCHEUNUNGEN AUF DER BASIS EINES REALISTISCHEN KONZEPTS FÜR DIE KTB-VORBOHRUNG

Die Erstellung der vorliegenden Studie erfolgte verabredungsgemäß im ständigen Kontakt zwischen der KTB-Projektleitung als Auftraggeber und der Eastman Christensen GmbH als Auftragnehmer. So konnten die Vorstellungen der Projektleitung bezüglich des für die Vorbohrung vorzusehenden Bohrablaufs während der Bearbeitungszeit der Studie zunehmend konkreter werden und in die Studie einfließen.

Aus diesem Grunde ist es auch möglich, auf der Basis der von den genannten Bohrunternehmen aufgezeigten Wege zur Abschätzung der Bohrkosten und mit Hilfe der daraus erstellten Rechenprogramme zusätzliche Vergleichsrechnungen durchzuführen, die den fortgeschrittenen Planungsstand der Projektleitung KTB berücksichtigen. So wird für diese neuen Kalkulationen grundsätzlich davon ausgegangen, daß keine zusätzliche Rohrtour aufgrund von Bohrlochproblemen eingebaut werden muß. Außerdem geraten sowohl die Slimhole-Bohrtechnik als auch die reine Rotary-Bohrtechnik gegenüber einer Kombination aus Rotary- und Seilkern-Bohrtechnik in den Hintergrund. Abschließende Optimierungsrechnungen legen daher bereits die letztgenannte Kombinationsmethode zugrunde. Schließlich wird, entsprechend einer fortgeschrittenen Meinungsbildung bei der verantwortlichen Projektleitung,

eine Ankerrohrteufe von 400 m anstelle der bisher angenommenen 250 m als realistisch angesehen.

In die Vergleichsbetrachtung wird der alternative Einsatz von Diamantbohrkronen mit oberflächengesetzten (SS) oder imprägnierten Diamanten und Rollenbohrkronen miteinander verglichen. Die Ausgangsbedingungen und die ermittelten Kosten sind für die Ankerrohrteufe bis 400 m in Tab. 9 und für den Bereich des unverrohrten Bohrlochs bis 3000 m bzw. 5000 m in Tab. 10 dargestellt. Für die Bohrgeschwindigkeit V_b , Standlänge der Krone s_k , gewinnbare Kernlänge l_k und Kosten eines einzelnen Bohrwerkzeugs KW sind jeweils ausgewählte Werte angegeben.

Fall	Bohrverfahren	Bohrwerkzeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohrloch	V_b (m/h)	s_k (m)	l_k (m)		
1	Rotary	Diam. impr.	8 1/2"	1,5	20	12	30	1.291
2	Rotary	Diam. SS	8 1/2"	1,5	20	12	20	1.091
3	Rotary	Diam. impr.	10 5/8"	1,5	20	12	52	1.731
4	Rotary	Diam. SS	10 5/8"	1,5	20	12	35	1.391
5	Seilkern	Diam. impr.	6"	1,5	20	4	7,4	1.249 (1.279)
6	Seilkern	Diam. SS	6"	1,5	20	4	5	1.203 (1.233)
5/6	Rotary	Hole Opener	8 1/2"/ 10 5/8"	1,5	25	-	9,5 (11,5)	s. o.
7	Rotary	Rollenbohrkronen	8 1/2"	1,5	10	10	17,4	1.396
8	Rotary	Rollenbohrkronen	10 5/8"	1,5	12,5	10 (12,5)	22,5	1.421 (1.409)

Tab. 9: Bohrparameter und Kosten bis zur Ankerrohrteufe 400 m

Die Kostenermittlung wird auf der Basis des Tabellenkalkulationsprogramms vorgenommen.

Bei den ermittelten Kosten nach Tab. 9 sind die Beträge für den Transport und den Aufbau der Bohranlage mit enthalten.

Fall	Endteufe (m)	Bohrwerk- zeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohr- loch	Vb (m/h)	sk (m)	lK (m)		
9	3000	Diam., impr.	6"	1,5	20	4	7,4	3.260
10	3000	Diam., SS	6"	1,5	20	4	5	2.948
11	5000	Diam., impr.	6"	1,5	20	4	7,4	6.957
12	5000	Diam., SS	6"	1,5	20	4	5	6.405

Tabelle 10: Bohrparameter und Kosten beim Seilkernen für Sektion 400 m bis 3000 m und 400 m bis 5000 m

In den Kosten nach Tabelle 10 sind die bereits in Tabelle 9 dargestellten Beträge für den Bereich des Bohrlochs bis zur Ankerrohrteufe nicht enthalten. Um die geschätzten Gesamtkosten der Bohrung zu ermitteln, wären daher jeweils ein Betrag aus Tabelle 9 und Tabelle 10 zu addieren. Verknüpft man beispielsweise die Fälle 1 und 9 miteinander, so kommt man zu einer Abschätzung der Gesamtkosten für die 3000 m-Bohrung von TDM 4.551. Falls bis auf 5000 m abgeteuft würde, beliefen sich die Kosten der Bohrung auf TDM 8.248 (Fälle 1 und 11). Auf der Basis der vorgegebenen Bohrparameter sollte der Bereich bis zur Ankerrohrteufe mit oberflächengesetzten Diamantbohrkronen der Abmessung 8 1/2" x 4" und der untere Bereich des Bohrlochs mit oberflächengesetzten Kronen im Außendurchmesser 6" abgeteuft werden.

Der Einsatz der imprägnierten Kronen kann rechnerisch nur sinnvoll sein, wenn hierfür größere Standlängen als bei oberflächengesetzten Werkzeugen angenommen werden.

Für den Abschnitt unterhalb der Ankerrohrteufe erfolgt daher eine alternative Berechnung mit veränderten Standlängen der Kronen sk entsprechend Tabelle 11.

Fall	Endteufe (m)	Bohrwerk- zeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohr- loch	Vb (m/h)	sk (m)	1K (m)		
9	3000	Diam., impr.	6"	1,5	30	4	7,4	2.767
10	3000	Diam., SS	6"	1,5	15	4	5	3.338
11	5000	Diam., impr.	6"	1,5	30	4	7,4	5.915
12	5000	Diam., SS	6"	1,5	15	4	5	7.263

Tabelle 11: Bohrparameter und Kosten beim Seilkernen für Sektion 400 m bis 3000 m und 400 m bis 5000 m

Für Fall 9 zeigt die Nachrechnung den kostensenkenden Einfluß der Standlängenerhöhung. Bezüglich des Falles 10 wird die noch in Tabelle 10 wegen der günstigen Meißelkosten auftretende Kostenreduzierung von der in Tabelle 11 gerechneten, realistischen, Reduzierung der Standlänge mehr als ausgeglichen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der umfassenden Studie wurden bohrtechnische Verfahren und Kosten zum Abteufen der KTB-Vorbohrung im Kristallin verglichen. Aufgabe dieser Studie war es auch, der KTB-Projektleitung als Planungshilfe zu dienen. Auf der Basis des ständigen Informationsaustausches zwischen Projektleitung KTB und Auftragnehmer wurden die Basisdaten für die Kostenvergleiche jeweils dem Stand der Planung angepaßt.

Während der anfänglich durchgeführten Berechnungen wurde eine Ankerrohrteufe von 250 m zugrundegelegt. Es wurden die Kernbohrverfahren Rotary-Kernen, Seilkernen und Slimhole-Kernen einschließlich von Kombinationen miteinander verglichen. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung der von den Bohrfirmen ITAG, Gewerkschaft Walter und Microdrill ausgearbeiteten Bohrpläne führte zunächst zum Ausscheiden der Microdrill-Lösung. Die dort beschriebenen Varianten ermöglichten nicht das Erreichen der geforderten Endteufe von 3000 m.

Als wesentlicher Vorteil des Rotary-Kernverfahrens ist festzuhalten, daß relativ große Bohrlochdurchmesser sicher erreicht werden können. Aufgrund der Anforderung der wissenschaftlichen Bohrung, von der Ackersohle bis zur Endteufe

Kerngewinn erzielen zu müssen, sind allerdings hohe Kosten zu erwarten.

Das Seilkernverfahren wurde bisher fast ausschließlich für Bergbauanwendungen in relativ flachen Bohrungen mit engen Durchmessern eingesetzt. Die Kosten betragen in grober Abschätzung etwa 50 % der Kosten einer Rotary-Kernbohrung, wenn bis 3000 m oder, als Option, bis 5000 m abgeteuft wird. Neben den Vorteilen einer niedrigeren Gesteinszerstörungsarbeit und reduzierten Kronenkosten führt insbesondere die Möglichkeit des Innenrohrwechsels ohne Strangausbau zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit. Darüber hinaus besteht beim Seilkernen natürlich die Möglichkeit, beim Auftreten von Kernverklemmern mit relativ geringem Aufwand das Innenrohr wechseln zu können. Auftretende Zeitverluste lassen sich gegenüber dem Rotary-Kernen in Grenzen halten. Bei Anwendung der Seilkerntechnik ist eine Optimierung der Kronenstandlänge von besonderer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Bohrprozesses.

Wenn die Sektion bis zur Ankerrohrteufe mit relativ großem Durchmesser erbohrt werden soll, erweist sich die Rotary-Kernbohrtechnik als technisch-wirtschaftlich angebrachte Lösung. Seilkern-Bohrungen müßten hier in relativ aufwendiger Weise zunächst noch erweitert werden, um die Verrohrung einbauen zu können.

Bereits während der abschließenden Arbeiten an der Studie hat sich ein realistisches Konzept für das Abteufen der Vorbohrung entwickelt. Es sieht ein Erbohren der nun vorgesehenen Ankerrohrteufe von 400 m mit 8 1/2" x 4" Krone am Rotary-Doppelkernrohr vor. Die Endteufe von 3000 m soll im Seilkernverfahren bei einem Bohrlachdurchmesser von 6" erbohrt werden.

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.

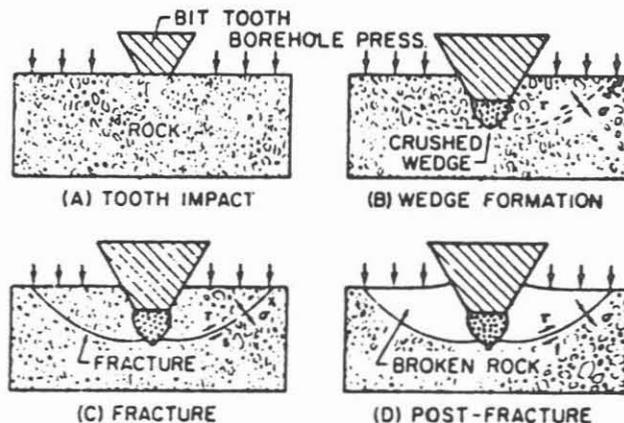


Abb. 1.1 : Phasen der Kraterbildung nach MAURER /1/

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.

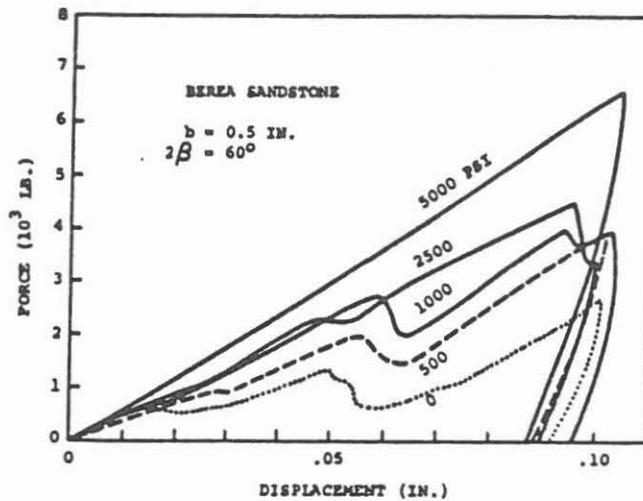


Abb. 1.2 : Darstellung von Eindringkraft über Eindringtiefe für verschiedene Druckstufen /2/

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.

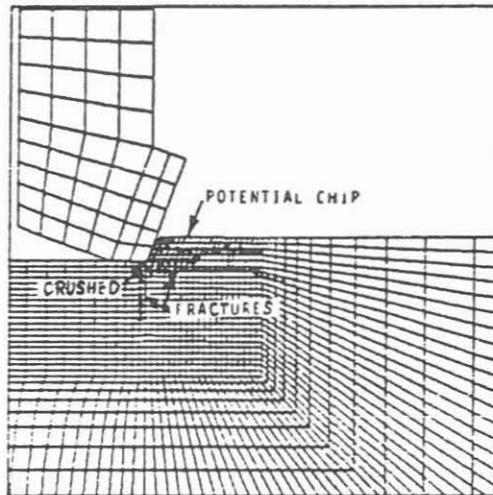


Abb. 1.3 : Rißbildung unter einer PDC Schneide mittels Rechnersimulation /5/

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.

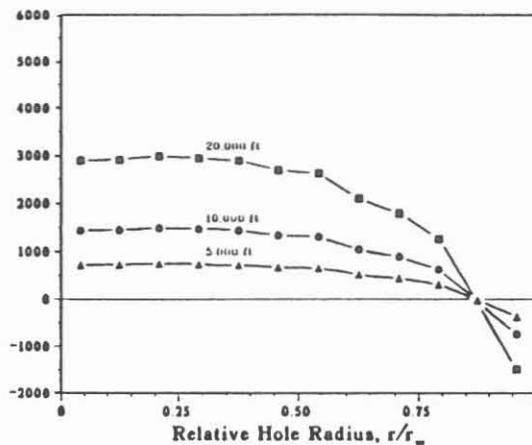


Abb. 1.4 : Variation des induzierten Differenzdruckes über der Bohrlochsohle für verschiedene Teufen /6/

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:

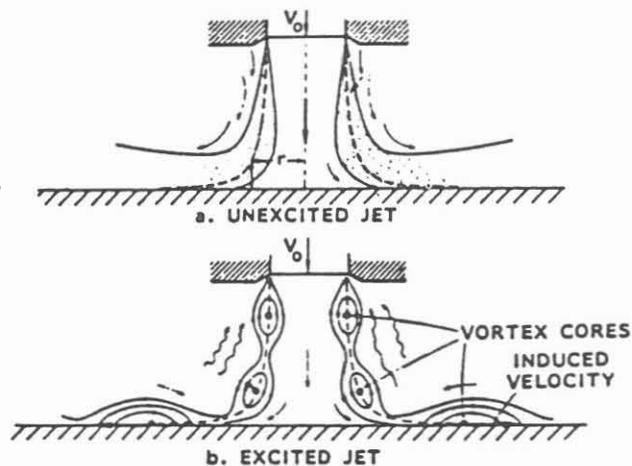


Abb. 1.5 : Fließvergleich eines normalen und eines angeregten Düsenstrahls /7/

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).

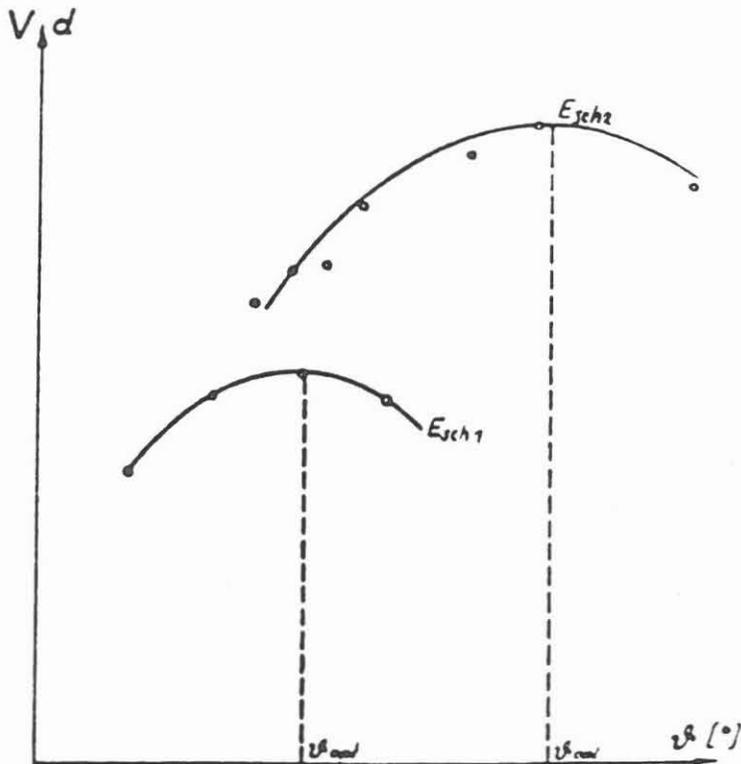


Abb. 1.6 : Kratertiefe d und Spanvolumen V in Abhängigkeit vom Umsetzwinkel und der Schlagenergie E_{sch}

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.

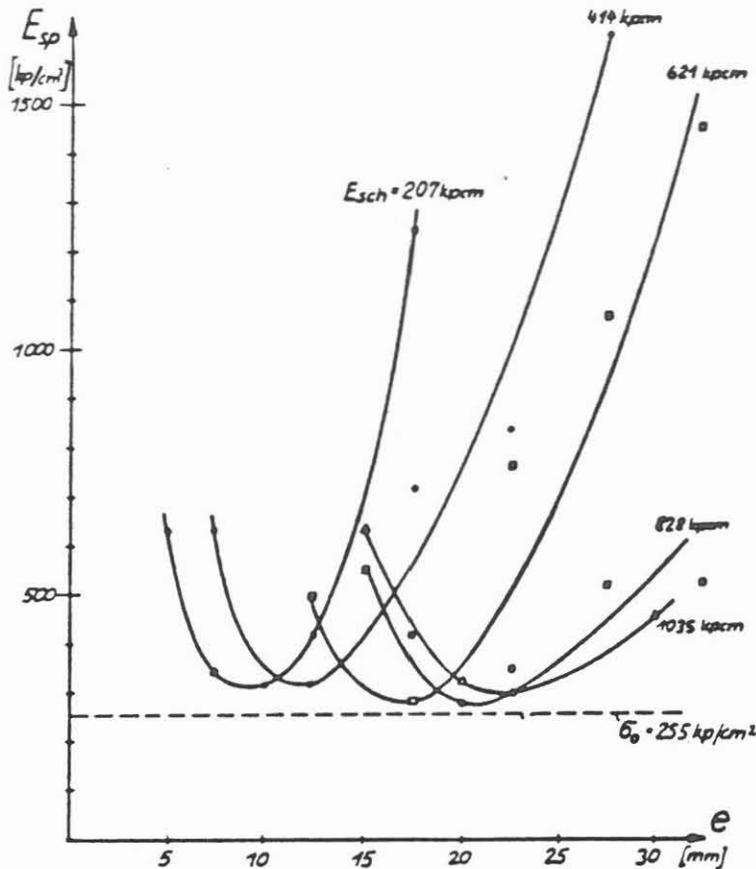


Abb. 1.7 : Spezifische Energie E_{sp} in Abhängigkeit von der Umsetzdistanz e beim parallelen Umsetzen in Kalk

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:

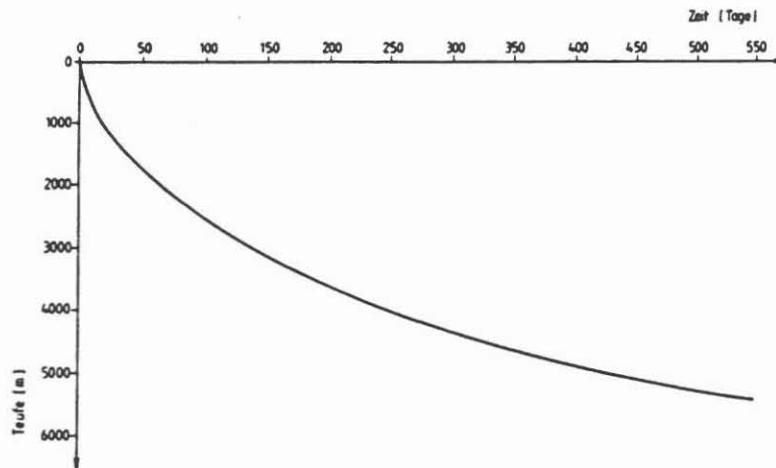


Abb. 3.1: Schematisches Zeit-Teufe Diagramm einer Tiefbohrung /24/

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/.

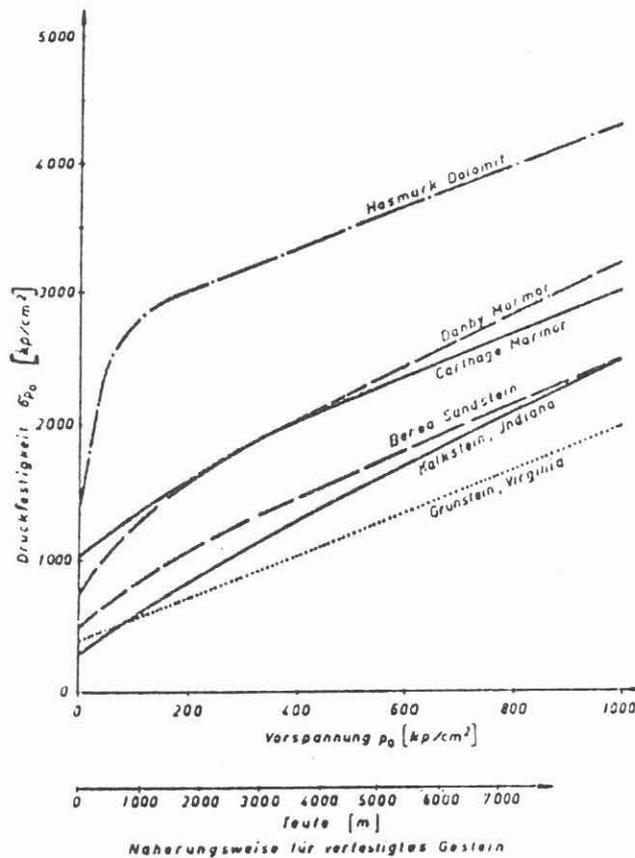


Abb. 3.2 : Zunahme der Druckfestigkeit bei allseitiger Vorspannung p_0

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.

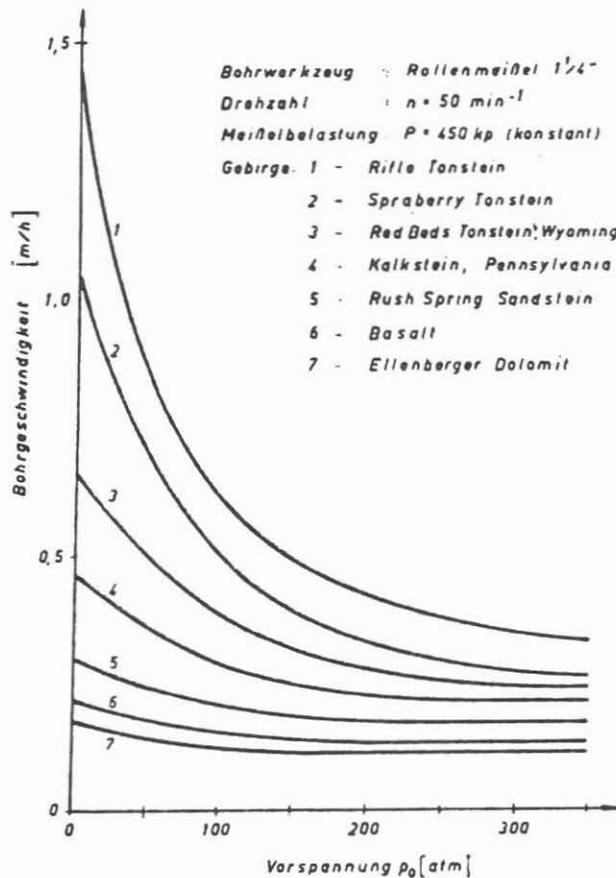


Abb. 3.3 : Einfluß der allseitigen Vorspannung p_0 auf die Bohrgeschwindigkeit nach /26/

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 Ribbildung 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 neu entwickelte 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.

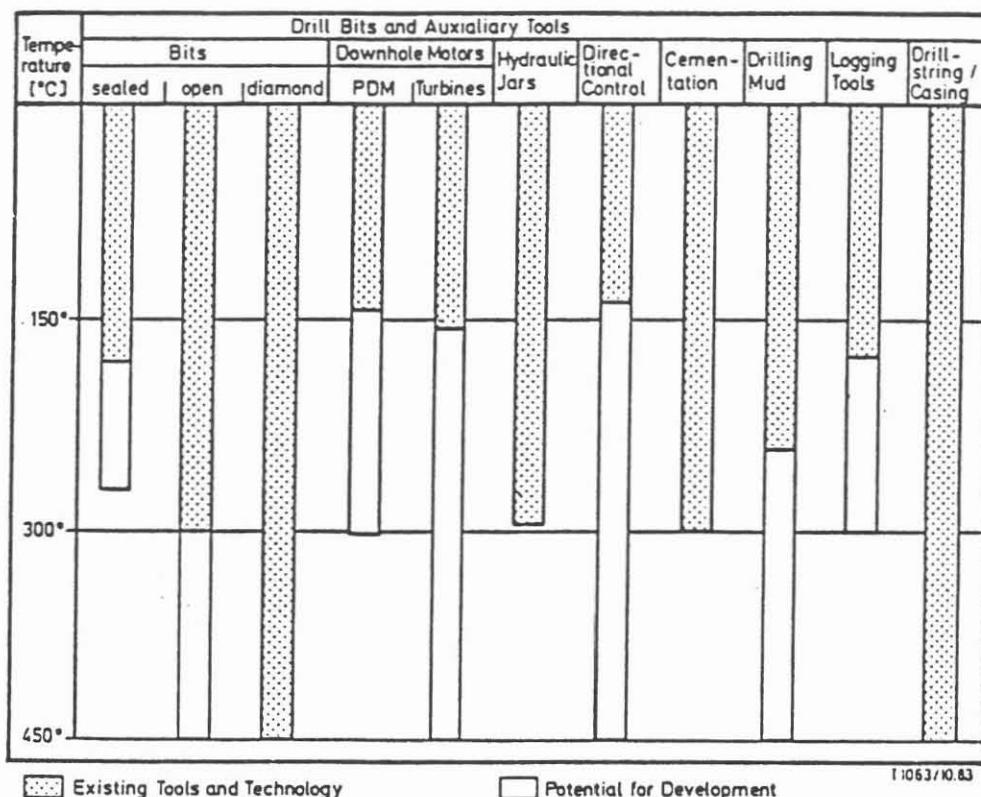


Abb. 3.4 : Einsatzgrenzen und Entwicklungspotential von Bohrwerkzeugen und Hilfsmitteln /27/

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

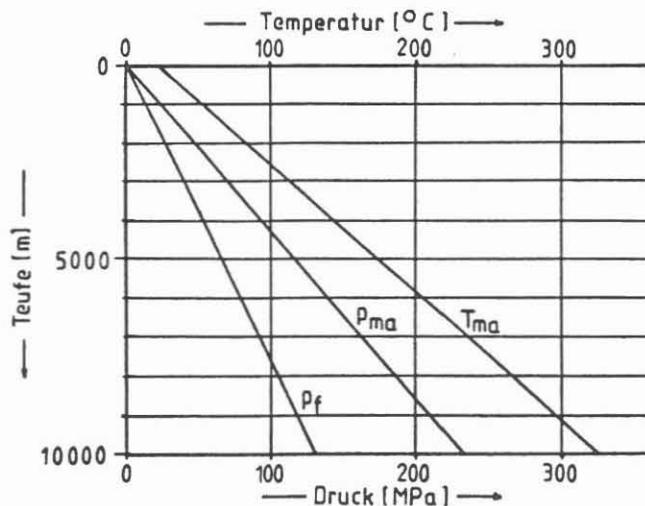


Abb. 3.5 : Zunahme von Temperatur, Gebirgsdruck und Porenraumdruck mit der Tiefe (für die Mittelwerte $\rho_{MA} = 2300 \text{ kg/m}^3$, $p_F = 0,115 \text{ MPa/100m}$ und $T = 3^\circ/100 \text{ m}$)

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.

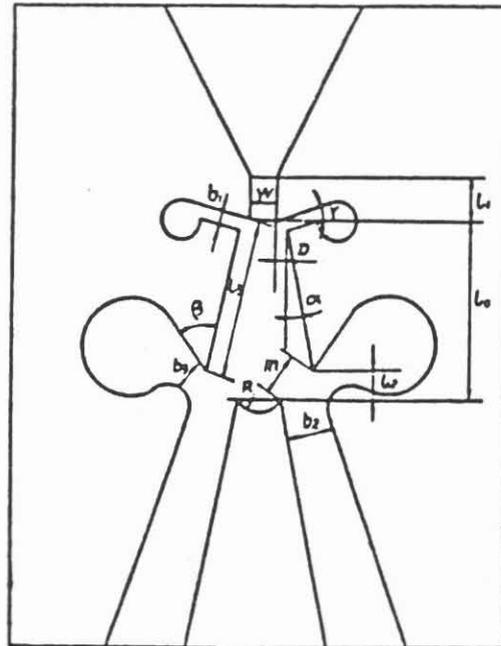
Es wurde Kontakt zu dem Institut aufgenommen, welches diese Entwicklung geleistet hat, und gegenseitige Besuche vorgenommen. Für die Bedingungen des Kontinentalen Tiefbohrprojektes sind vor allen Dingen solche Schlagsysteme von Interesse, die ohne verschleißanfällige Ventil- und Feder-elemente arbeiten. 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.

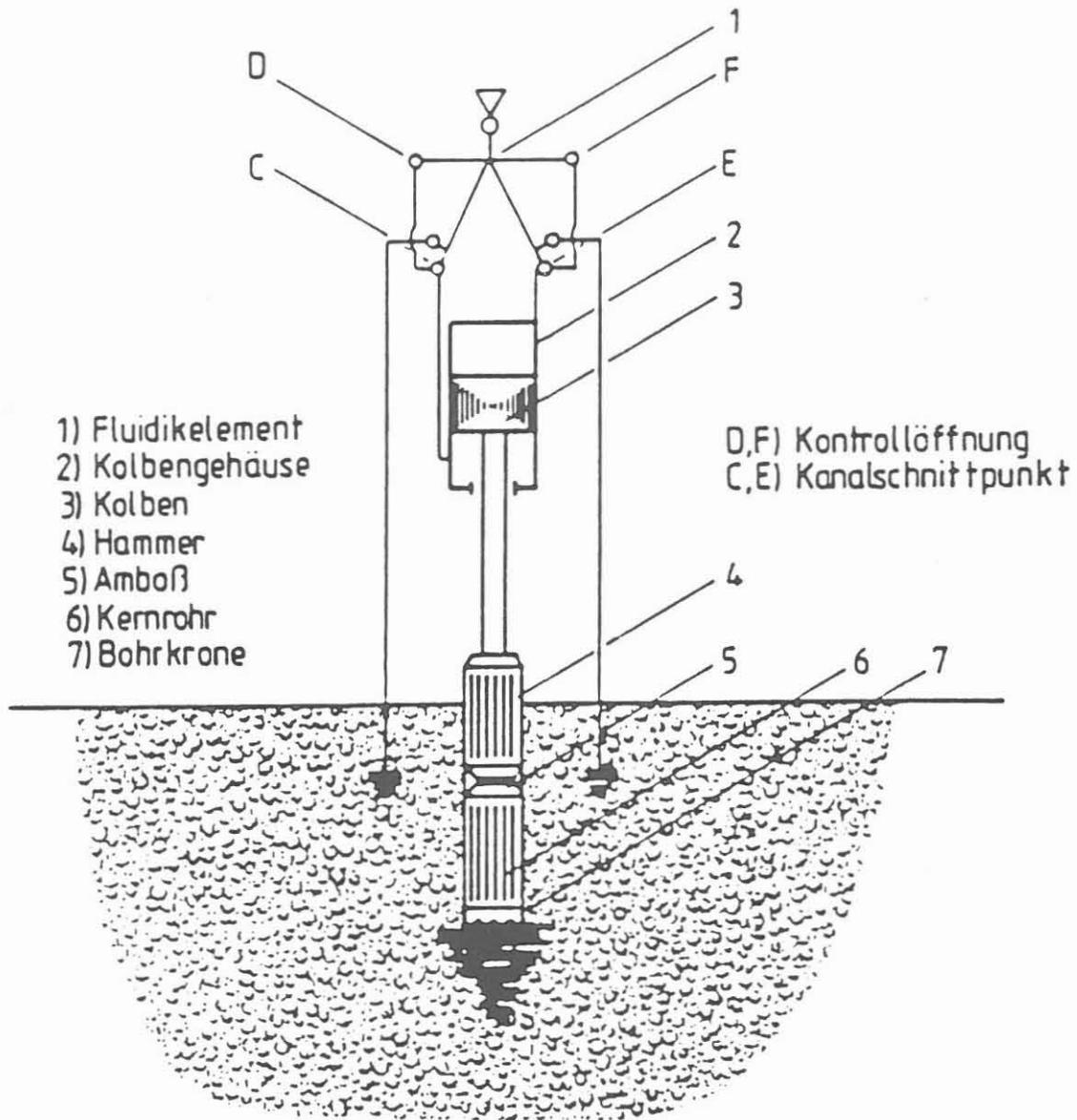


Abb. 4.2 : Funktionsprinzip des Fluidik Elementes nach /12/

Die mit dem Fluidik-Element ausgestatteten Bohrhämmer sind bisher in Größen von 54mm OD bis 150mm OD gebaut worden. Damit lassen sich Bohrkrone 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/.

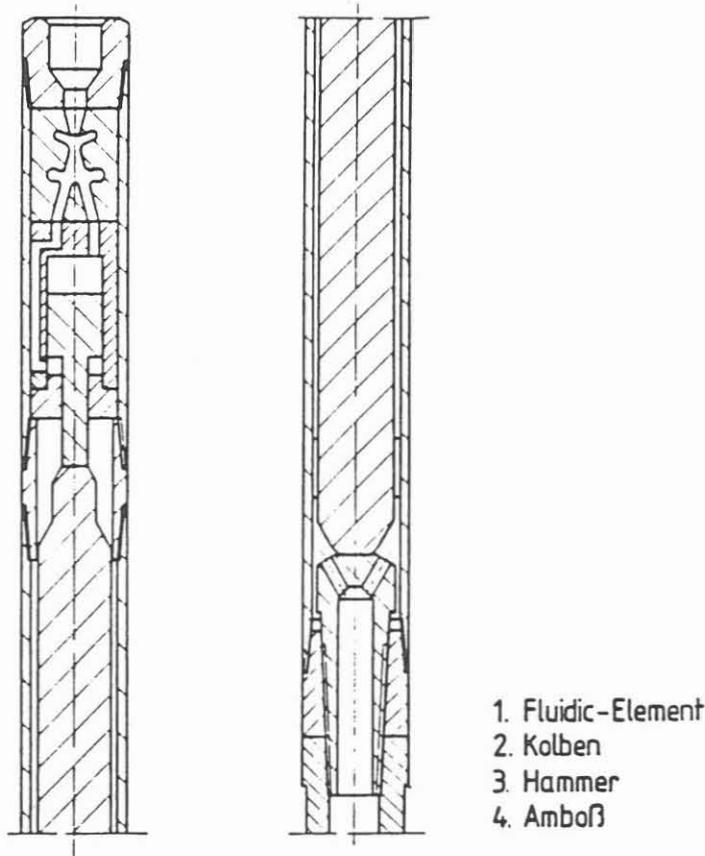


Abb. 4.3 : Schlagmechanismus mit Fluidik-Element /15/

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.

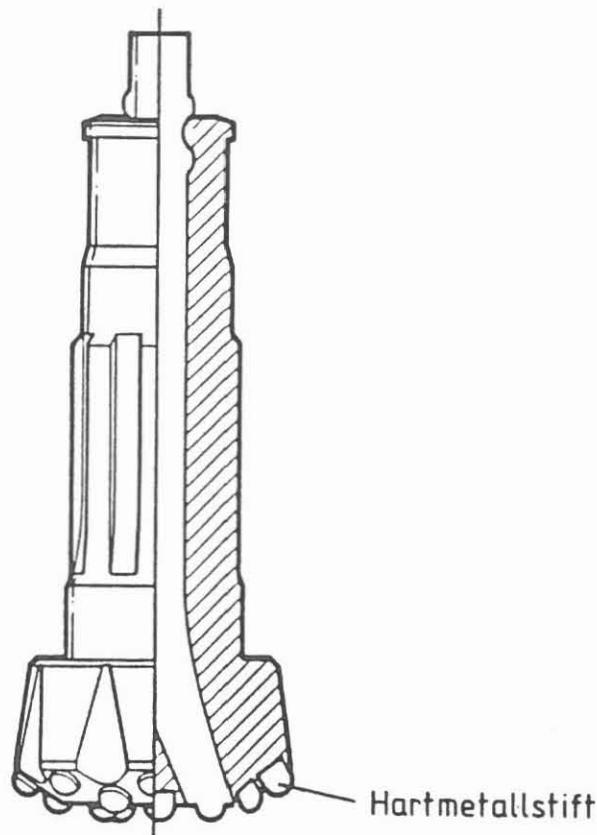


Abb. 4.5 : Festkopf-Meißel

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)

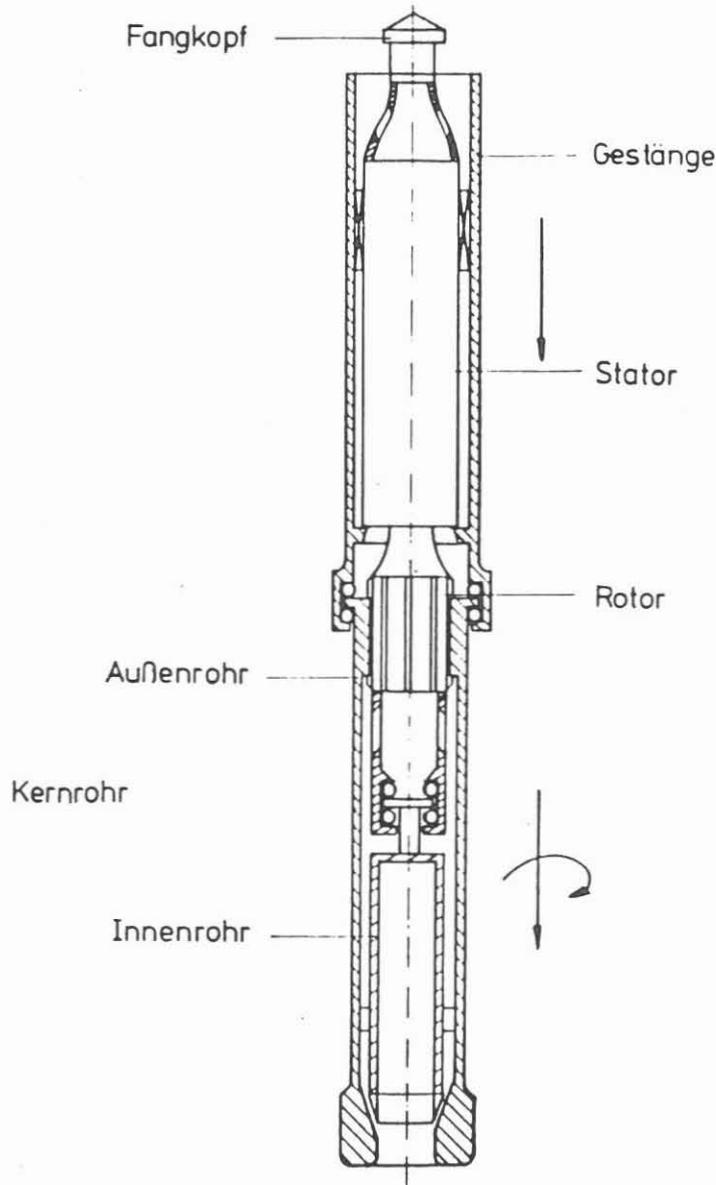


Abb. 4.6 : Seilkernsystem mit Vorortdrehantrieb (schematisch)

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 Bohrhammer 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 Bohrhammer 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.

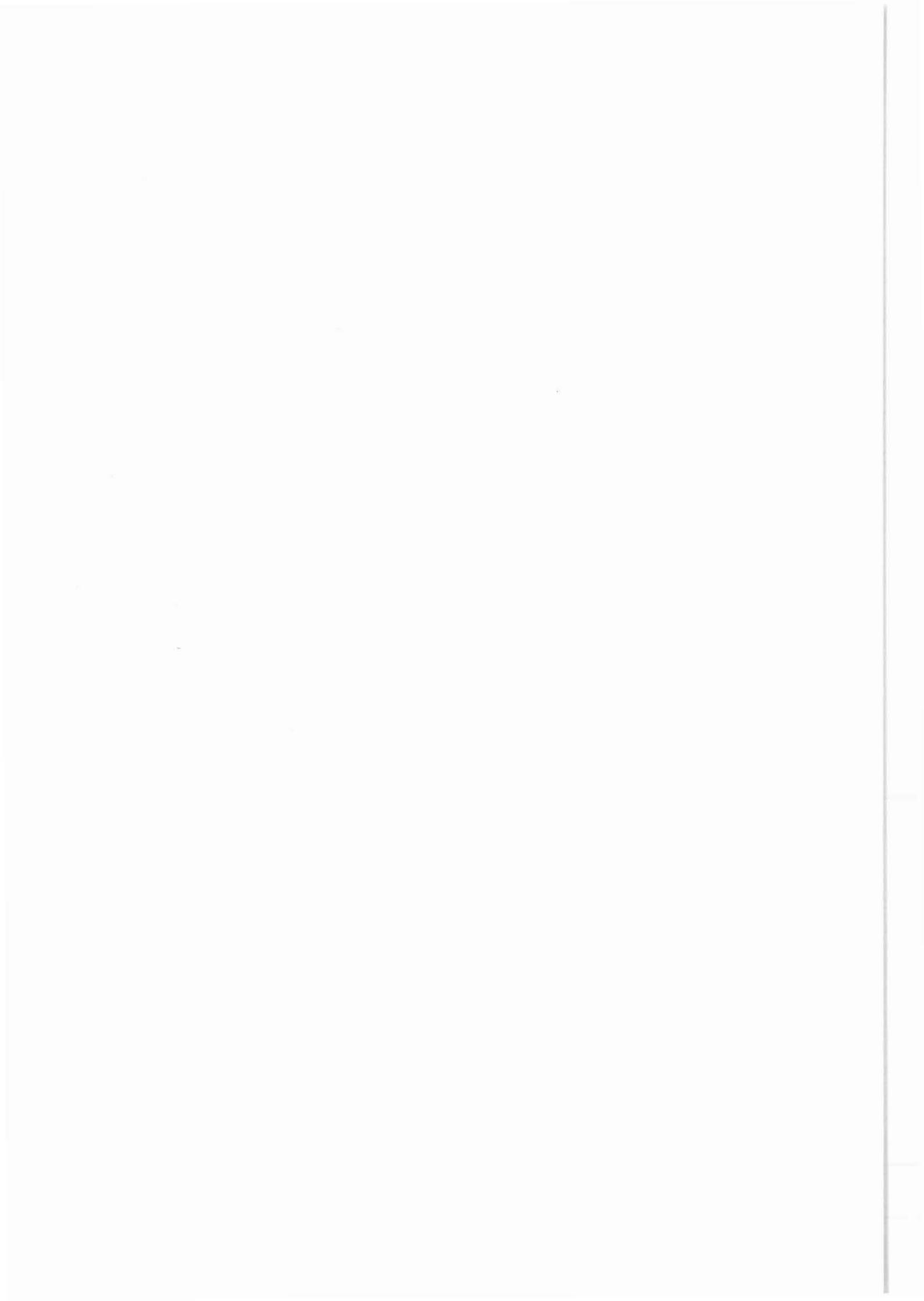
Im vierten Abschnitt wurde dann auf die Hammerwirksamkeit unter Bohrlochsbedingungen eingegangen und verschiedene Hammertypen wurden vorgestellt. Die Grundlagen der Hammerauslegung wurden angesprochen und ein möglicher Einsatz des Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung wird diskutiert. Dabei werden 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.; WESEBERG, 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

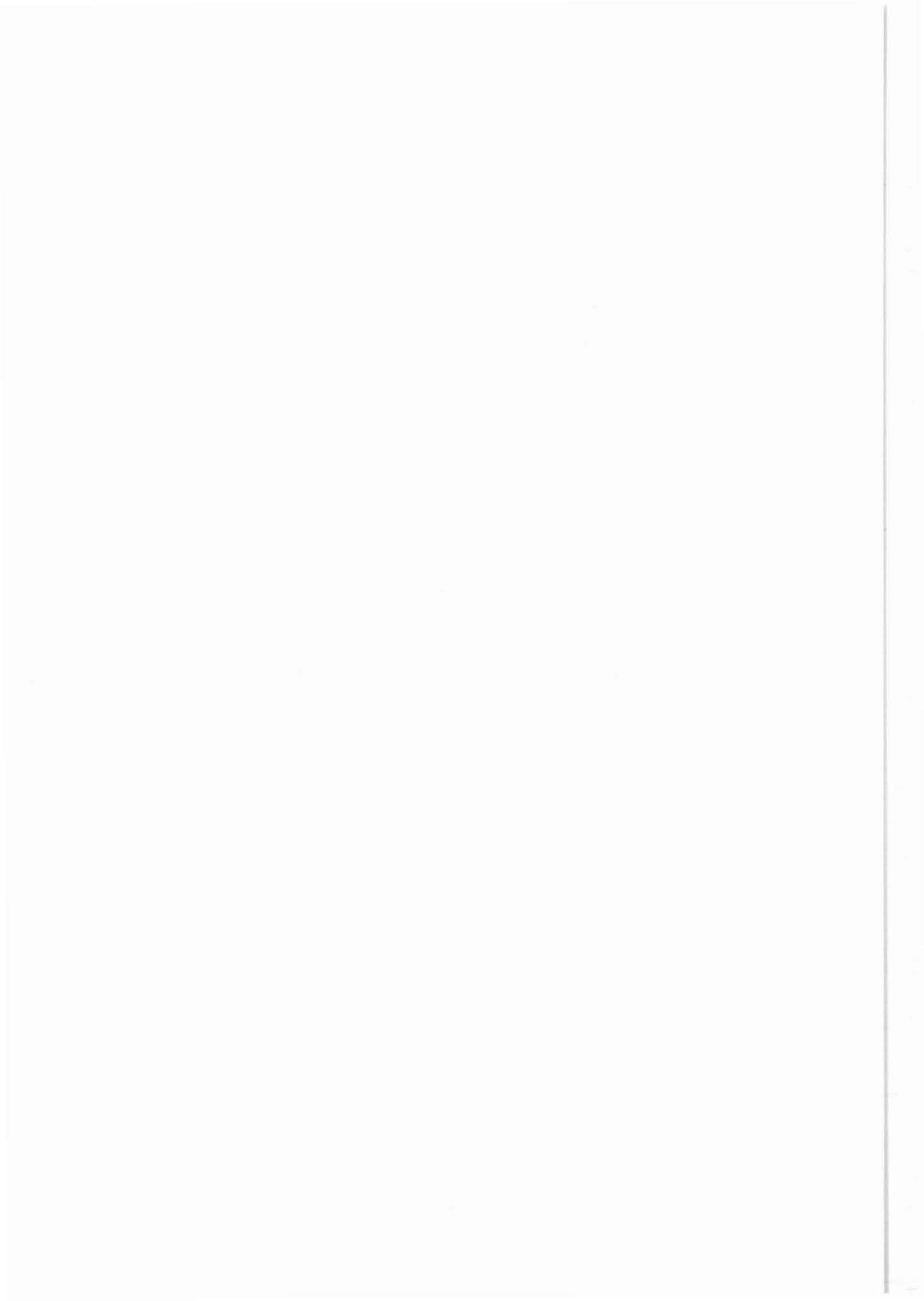


SMAG-Salzgitter Maschinenbau GmbH

Postfach 51 16 40
3320 Salzgitter 51

Untersuchung zur Entwicklung eines
hydraulischen Bohrhammers mit Antrieb
und Steuerung durch die Spülflüssigkeit
für Tiefbohrungen im Hartgestein in
Teufen bis 14 000 m

Dr. R. Mayer



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	122
1. Einleitung.....	123
2. Grundlagen für den Einsatz eines Bohrham- mers in der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB)....	125
3. Hydraulischer Bohrhammer für übertiefe Bohrungen.....	126
3.1 Entwicklungsziel des hydraulischen Bohr- hammers.....	126
3.2 Widerprinzip des Bohrhammers.....	127
4. Modell und Berechnungsverfahren des hydrau- lischen Bohrhammers nach dem Widerprinzip.....	128
5. Funktionsnachweis des Hammerprinzips.....	131
6. Planung der Realisierungsphase eines Proto- typs für die KTB-Bohrung.....	131
7. Zusammenfassung.....	132
8. Literaturverzeichnis.....	133

VORWORT

Die Salzgitter Maschinenbau GmbH (SMAG) übernimmt im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) u.a. die Aufgaben der Entwicklung eines neuartigen Bohrwerkzeuges für Bohrungen im Hartgestein und großen Teufen.

Steht zunächst die technische Realisierung einer wissenschaftlichen Bohrung in bisher nicht erreichten Teufen im Vordergrund, so ist schon für die Bohrung die Entwicklung wirtschaftlicher, d.h. leistungsfähiger, Bohrprinzipien erforderlich. Der wirtschaftliche Gesichtspunkt läßt eine direkte Umsetzung der Bohrverfahren auf die Bohrungen zur Rohstoffgewinnung erwarten.

Zusätzliche Anforderungen an das Bohrverfahren stellen die kontinuierlichen, den Bohrvorgang begleitenden, geowissenschaftlichen Untersuchungen der Spülflüssigkeiten und der auf Teilstrecken geforderten Bohrkerne.

Aus den Erkenntnissen der Tiefbohrtechnik im Hartgestein läßt sich ein vorteilhafter Einsatz eines Bohrhammers im Hartgestein insbesondere unter den Randbedingungen des KTB-Projektes erwarten.

1. Einleitung

Die Salzgitter Maschinenbau GmbH (SMAG) hat die Aufgabe übernommen, ein zum drehenden Bohren alternatives Bohrwerkzeug für die übertiefe Bohrung des KTB-Projektes im Hartgestein zu realisieren. Die Arbeiten bei der SMAG werden begleitet durch eine Studie zum Stand der Technik des Tiefbohrens im allgemeinen und dem schlagenden Bohren im besonderen.

Im Rahmen des Vorhabens der SMAG sollen mit den Methoden digitaler Simulation die Eigenschaften hydraulischer Bohrhämmer unter spezifizierten Einsatzbedingungen ermittelt werden. Voraussetzung der Berechnungen ist die möglichst sichere Beschreibung der Randbedingungen in Teufen des Bohrloches von bis zu 14.000 m durch die Parameter Druck, Temperatur, die Eigenschaften der Spülung und des Gestänges sowie Daten des Bohrhämmerkonzepes.

In Wechselwirkung mit den Ergebnissen des Simulationsprogrammes ist das Hammerkonzept mit der Variation der Daten des Bohrwerkzeuges iterativ zu entwickeln. Das Ergebnis der Untersuchung kann, sofern es die positiven Erwartungen des Bohrverfahrens bestätigt, die Vorbereitung einer sich an das beantragte Vorhaben anschließenden Konstruktions- und Realisierungsphase des Bohrwerkzeugs sein und weist auf die Ansatzpunkte technologischer Aufgabenstellungen für seine sichere Realisierung hin.

Nach heutigen Erkenntnissen ist davon auszugehen, daß bei Tiefbohrungen von mehr als 8.000 m im Hartgestein der Einsatz von konventionellen, drehenden Bohrwerkzeugen technisch problematisch wird und an die Grenze der Wirtschaftlichkeit stößt. Das neu zu entwickelnde Bohrgerät "hydraulischer Bohrhämmer auf der Bohrlochsohle mit einem Antrieb über die Spülflüssigkeit" soll die Nachteile der konventionellen Bohrtechnik weitgehend beseitigen. Die folgende Aufzählung beinhaltet die erwarteten Verbesserungen gegenüber der rein drehenden Bohrtechnik.

- Hartgestein läßt sich besser und mechanisch sinnvoller schlagend zertrümmern als schneidend, bohrend, fräsend oder schmigelnd,
- Das Werkzeug wird dabei weniger zerschlagen.
- Das Werkzeug ist einfacher und daher preiswerter.

- Die Zertrümmerungsarbeit wird dort geleistet, wo sie gebraucht wird, auf der Bohrlochsohle.
- Daraus ergeben sich zwangsläufig höhere Wirkungsgrade und geringere Kosten.

Der Nachteil des bekannten Imlochbohrhammers besteht in der vor allem für ein vierteiliges Gestänge aufwendigen und mit Dichtigkeitsproblemen behafteten, getrennten Führung von Spülung und hydraulischer oder pneumatischer Versorgung des Bohrhammers.

Die Untersuchung soll die genannten, erwarteten Vorteile unter den Randbedingungen des übertiefen Bohrloches bestätigen. Dabei sollen den folgenden Gesichtspunkten des Bohrhammers in zwei Teufenbereichen, 0 bis 5.000 m und über 5.000 m, besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden:

- Beeinflussung der Maßhaltigkeit des Bohrloches,
- Neigungs- bzw. Richtungsstabilität des Bohrhammers und
- Kernmöglichkeit bei mindestens 30 % der Bohrstrecke ab 5.000 m.

Hydraulische Bohrhämmer werden eingesetzt zum Bohren von Sprenglöchern im Bergbau, Tunnelbau und in Steinbrüchen. Diese Bohrhämmer befinden sich jedoch außerhalb des Bohrloches, werden mit einer Hydraulikflüssigkeit (Mineralöl oder Emulsion) angetrieben und auf einer Lafette geführt. Sie sind nur für kurze Bohrlochtiefen, bis ca. 30 m, einsetzbar.

Für tiefere Bohrungen, z.B. in Steinbrüchen und beim Erbohren von Brunnen, werden im Hartgestein Bohrhämmer benutzt, die in das Bohrloch hineinwandern und auf der Bohrlochsohle ihre Schlagarbeit direkt an den Bohrmeißel abgeben. Diese Hämmer werden in der Regel mit Druckluft betrieben. Die SMAG hat auch für diese Anwendungen hydraulische Hämmer mit getrenntem Hydraulikkreislauf und Mehrleitergestängen entwickelt.

In dieser Kurzfassung wird das Ergebnis der Vorstudie zur Entwicklung des hydraulischen Bohrhammers der SMAG mit dem Antrieb über die Spülflüssigkeit vorgestellt. Die ausführlichen Ergebnisse /2/ liegen der KTB Projektgruppe am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Kurzfassung vor.

2. Grundlagen für den Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB)

Eine Studie zur Ermittlung der Grundlagen des Einsatzes eines Bohrhammers im Hartgestein für übertiefe Bohrungen wurde von der SMAG an das Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung der Technischen Universität Clausthal, ITE, Herrn Prof.Dr.-Ing. C. Marx, vergeben. Die Studie liegt der KTB Projektgruppe im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Hannover vor /1/.

Die Studie beinhaltet eine Aussage zur Tiefbohrtechnik. Zu diesem Punkt kann aus der Studie zitiert werden, daß "die Grundlagen der Tiefbohrtechnik (als Rotary-Technik) bereits vorliegen. Daher bringen gerade in jüngerer Zeit nur wenige Arbeiten neue Erkenntnisse über den Gesteinszerstörungsprozeß. Diese Arbeiten werden kurz vorgestellt." Die Grenzen der Rotary-Technik werden deutlich und machen die Suche nach einem alternativen Bohrverfahren erforderlich für den Einsatz in übertiefen Bohrungen im Hartgestein. "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 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 können." down-hole-Motore unterliegen zusätzlich den kaum erfüllbaren Anforderungen der hohen Belastungen der großen Teufen (hoher statischer Druck, hohe Temperaturen).

Eine Darstellung zum Stand der Technik des schlagenden Bohrens mit einer Gegenüberstellung der konkurrierenden Hammerprinzipien schließt sich an. "Hier zeigt sich, daß die funktionale 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."

Insbesondere für die Entwicklung neuer Hammerprinzipien, die wie im Fall des Prinzips der SMAG bisher nicht erreichte Schlagenergien erzeugen, liegen bis heute keine gesicherten Erkenntnisse vor. Dennoch darf vermutet werden, daß das Produkt der Parameter Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz von herausragender Bedeutung ist.

Für die Dimensionierung eines Imlochhammers liegen in der Studie des ITE Angaben über die Randbedingungen in übertiefen Bohrungen vor. Auch wenn keine abschließenden Aussagen ohne weitere mineralogische Untersuchungen gemacht werden können, werden die zunächst wesentlichen Daten genannt.

Das ITE empfiehlt abschließend eine "verstärkte weitere Entwicklung dieses Bohrverfahrens ohne Einschränkungen".

3. Hydraulischer Bohrhammer für übertiefe Bohrungen

Nach den Empfehlungen des ITE und nach den Erfahrungen der SMAG mit hydraulischen Bohrhämmern für den Einsatz in Sprenglochbohrungen für den Steinbruchbetrieb erscheint der Einsatz eines spülwassergetriebenen Bohrhammers unter den hohen Anforderungen eines übertiefen Bohrloches als das wirtschaftliche Bohrverfahren. Hinter dieser Aussage verbergen sich die Vorteile des Verfahrens hinsichtlich seiner Standfestigkeit und der erreichbaren Bohrleistung.

3.1 Entwicklungsziel des hydraulischen Bohrhammers

Die Entwicklung des Spülwasserhammers wird durch die Forderung bestimmt, aus Gründen der Betriebssicherheit und der Lebensdauer über ein Schlagsystem zu verfügen, das

- keine gleitenden Passungen aufweist, die durch Suspensionen im Spülmedium zu Abrieb und Verklemmung führen,
- keine gleitenden Dichtungen benötigt, die wegen der Reibung und des Verschleißes mit Spülschlamm keine ausreichende Einsatzdauer aufweisen,
- nur gering belastete, bzw. deutlich überdimensionierte Federelemente für die axiale Führung vorsieht, wodurch Dauerbrüche weitgehend eliminiert sind,
- für die Steuerung nur ein einziges Sitzventil verwendet,
- für Kernbohrungen ohne round trip geeignet ist,
- durch die Variation des Speisestroms des Spülwassers oberhalb einer Mindestspeisemenge in der Schlagleistung nicht beeinflusst wird und nicht überlastet werden kann,
- einen möglichst geringen Druckabfall und nur geringe Pulsationen und damit kleine Rückwirkungen auf das Gestänge erzeugt,
- hohe Einzelschlagenergien bis 500 J über ein breites Frequenzspektrum von 2 - 25 Hz erzeugt und
- die Schlagenergie für eine lange Verweildauer des Schlagbolzens auf dem Amboß speichert.

Die Summe der Forderungen kann bei konventionellen Hammerprinzipien bis heute nicht erfüllt werden. Dies führt z.B. zu getrennten hydraulischen Kreisläufen für Spülung und Hammerantrieb (auch bei konventionellen Hämmern der SMAG) oder zu nicht vermeidbaren Passungen z.B. bei einem in der Studie des ITE /1/ vorgestellten Koanderprinzip.

Es zeigt sich allerdings, daß diese Forderungen zu erfüllen sind, wenn die technologisch unüberwindbare Schwachstelle der üblichen Systeme -die Krafterzeugung durch Kolbenwirkung- durch rein dynamische Krafterzeugung mittels Widderstöße einer Wassersäule, die kurzzeitig ein Vielfaches der dem Speisedruck entsprechenden Kraft zur Verfügung stellt, ersetzt wird.

3.2. Widderprinzip des Bohrhammers

Der Spülwasserhammer auf Widderbasis in Bild 1 besteht aus

- einem beweglichen Teil -das Impulsrohr 1, dessen unteres Ende als Hammerstück 3 ausgebildet ist und vom Stoßventil 5 zeitweilig verschlossen wird- und
- einem feststehenden, an das Bohrgestänge zu befestigendes, Hüllrohr 2, das an seinem unteren Ende den Stiftschlagbohrer 4 führt.

Das Impulsrohr wird durch die Führungselemente 8 koaxial zum Hüllrohr 2 geführt und stützt sich über die Feder 6 auf dem Hüllrohr 2 ab. Das obere Ende des Impulsrohres 1 bildet stirnseitig mit dem Hüllrohranschluß am Bohrgestänge die mit der Stellung des Impulsrohres 1 veränderliche by-pass-Drossel 7.

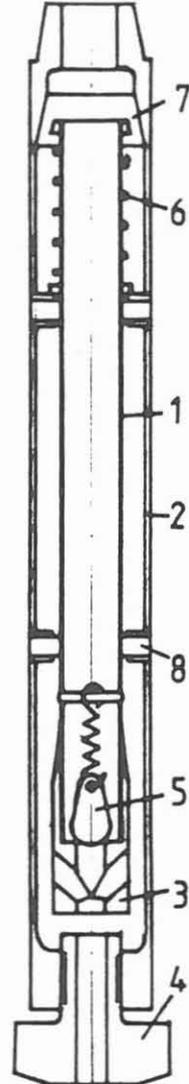


Bild 1:

- Impulsrohr 1
- Hüllrohr 2
- Hammer 3
- Amboß 4
- Stoßventil 5
- Rückholfeder 6
- by-pass-Drossel 7
- Führungsklotz 8

Ausgehend von der Ruhestellung -Impulsrohr 1 verschließt unter der Federwirkung 6 die by-pass-Drossel 7, das Stoßventil 5 ist offen- lassen sich fünf Phasen im Arbeitszyklus beschreiben:

1 Startphase

Der Speisestrom fließt vom Gestänge direkt in das Impulsrohr 1 bis die Schließgeschwindigkeit erreicht wird, bei der die Kraft aus dem Druckabfall am Stoßventil 5 die Schwellenkraft der öffnenden Feder übersteigt und das Stoßventil schlagartig schließt.

2 Beschleunigung des Impulsrohres

Nach dem Impulserhaltungssatz tritt nun eine Wechselwirkung zwischen der Wassersäule im Impulsrohr 1 und der Masse des Impulsrohres 1 auf. Das Impulsrohr 1 wird in der endlichen Dauer des Widerstoßes nach Zukovsky bis zur Endgeschwindigkeit, die aus dem Impulsgesetz ableitbar ist, beschleunigt.

3 Ballistische Phase

Nach Abschluß der Beschleunigungsphase setzt eine durch die Rückholfeder und die Flüssigkeitsreibung gebremste, gleichförmige Bewegung des Impulsrohres 1 in Richtung Amboß 4 ein.

4 Schlag

Analog zum Widerstoß läßt sich auch hier in erster Näherung annehmen, daß das Impulsrohr 1 einen Kraftimpuls mit endlicher Verweildauer in den Amboß 4 einleitet. Die genaue Form des Kraftstoßes ist von den Masseverhältnissen des Hammers und der Eigenschaft der Bohrlochsohle abhängig.

5 Rückzug mit Beschleunigung der Wassersäule im Impulsrohr

In der abschließenden Phase zieht die Feder 6 das Impulsrohr 1 zurück. Der Strömungswiderstand an der by-pass-Drossel 7 wächst bei nunmehr geöffnetem Stoßventil 5. Die Wassersäule im Impulsrohr 1 wird auf die Strömungsgeschwindigkeit bis zur Schließgeschwindigkeit der Phase 1 beschleunigt.

Mit den Parametern

- Massenverhältnis Impulsrohr 1 zu Wassersäule im Impulsrohr,
- Federkräfte,
- freie Weglänge in der ballistischen Phase 3 und
- Strömungsquerschnitte an der by-pass-Drossel 7 und am Stoßventil 5

wird Einfluß genommen auf die Schlagenergie und die Schlagfrequenz des Hammers. Beide Größen sind von der Strömungsgeschwindigkeit der Spülflüssigkeit ab einer Mindestspülrate nahezu unabhängig. Eine Überlastung des Hammers kann nicht eintreten. Bei höheren Spülraten schließt alleine die by-pass-Drossel 7 nicht mehr vollständig; die zusätzlichen Spülflüssigkeitsmengen fließen am Impulsrohr 1 vorbei.

4. Modell und Berechnungsverfahren des hydraulischen Bohrhammers nach dem Widerprinzip

Ungeachtet seiner verblüffenden Einfachheit ist der Widerhammer trotz relativ unproblematischer, analytischer Erfassung der einzelnen Phasen im Zusammenspiel und deren gegenseitiger Beeinflussung relativ komplex. Die transienten Vorgänge sind geschlossen nur mit dafür geeigneten Methoden erfaßbar und simulierbar.

Das numerische Modell unserer Wahl ist die Bond-Graphen-Methode /3/. Vergleichbar mit der Netzwerktheorie elektrischer Schaltkreise wird das Problem in eine Vielzahl der Grundelemente Feder, Widerstand oder Drossel und Masse diskretisiert. Zur Berechnung der physikalischen Größen Weg, Geschwindigkeit

und Beschleunigung der interessierenden mechanischen Elemente des Problems werden, ausgehend von einer definierten Anfangsbedingung, Druckpotentiale und Durchflußgrößen des Fluids ermittelt.

Das Bond-Graphen-Modell formuliert ein Differentialgleichungssystem, das mit einem unterlagerten, numerischen Berechnungsverfahren gelöst wird.

Das Modell des Widderprinzips ist in Bild 2 skizziert. Der schematische Querschnitt weist auf die wesentlichen, diskreten Elemente des Hammers hin. Die folgende Referenzliste stellt den Zusammenhang zu Bild 1 dar:

Position C34	-	Rückholfeder 6
Position R13	-	by-pass-Drossel 7
Position C14	-	Kompressibles Fluid
Position C24	-	Kompressibles Fluid
Position R33	-	Reibung
Position R25	-	Stoßventil 5
Position C44	-	Eindringverhalten des Hammers.

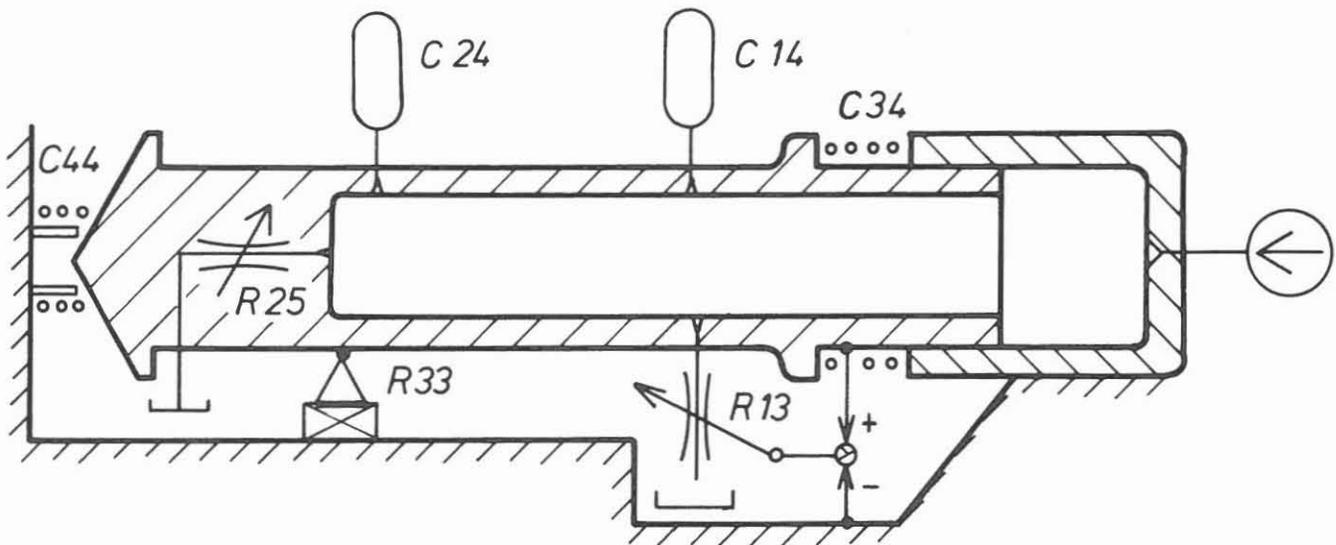


Bild 2: Schematischer Querschnitt des Widderhammers für die Modellierung mit der Bond-Graphen-Methode

Die Ergebnisse der Simulation des Hammers dienen sowohl der Optimierung des Vorganges selbst hinsichtlich der Schlagenergie und der Schlagfrequenz durch die Variation der genannten Parameter des Bohrwerkzeuges als auch der Dimensionierung seiner einzelnen Komponenten.

Bild 3 stellt den zeitlichen Verlauf von vier Zustandsgrößen in der Simulation des kontinuierlichen Betriebs dar. Mit Q25 ist die Durchflußrate im Stoßventil gekennzeichnet, mit X44 der Weg des Hammerkopfes, mit P24 der Druck am Stoßventil und mit P14 der Druck an der oberen Mündung des Impulsrohres.

Die Daten des Berechnungsbeispiels stehen für eine Hammergeometrie in Anlehnung an das im folgenden Abschnitt beschriebene Modell des Funktionsnachweises.

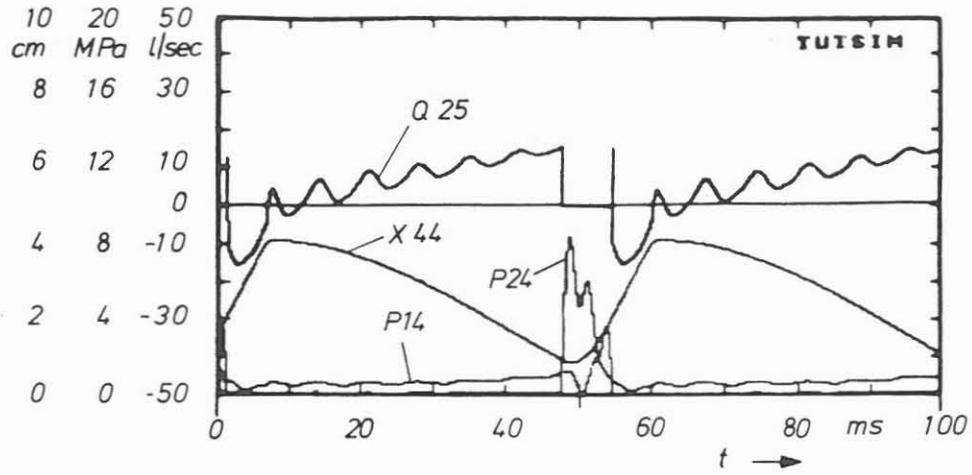


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen des Hammers

5. Funktionsnachweis des Hammerprinzips

Mit einem Testaufbau nach Bild 4 wurde in einer zunächst horizontalen Anordnung der Funktionsnachweis für den Hammer im Rahmen der Vorstudie geführt. Der Testaufbau lehnt sich ungefähr im Maßstab 1 : 1 an die Geometrie eines realen Bohrwerkzeuges an. Mit der Versuchsanordnung wurden die folgenden, meßtechnisch erfaßten Leistungsdaten gefahren:

Länge Impulsrohr	:	9	m
Masse Impulsrohr	:	50	kg
Masse Wassersäule	:	28	kg
max. Spülrate	:	2000	l/min
max. Spüldruck	:	6	bar
max. Einzelschlagenergie	:	463-163	J
max. Schlagfrequenz	:	3-8	Hz
Widderstoß-Druckspitze	:	120-84	bar

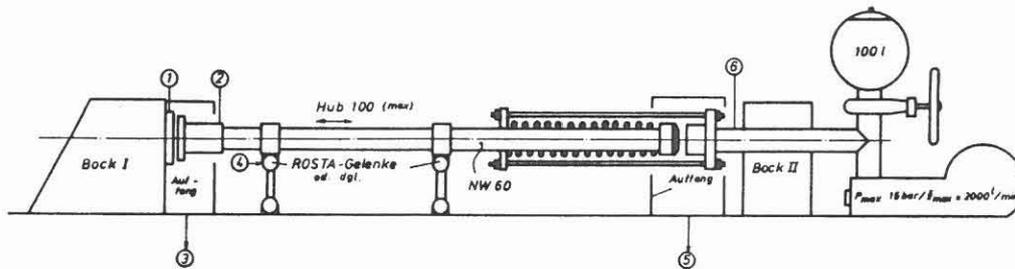


Bild 4: Testaufbau des Widderhammers

Damit sind die für die Versuchsanordnung mit der oben erläuterten Simulation prognostizierten Daten in vollem Umfang erreicht und der Funktionsnachweis für das Hammerprinzip erbracht. Darüberhinaus wird die Leistungsfähigkeit der Simulation auch in ihrer Beschreibung des dynamischen Verhaltens nachgewiesen und der Einsatz des Berechnungsverfahrens für weitere Optimierungen gerechtfertigt.

6. Planung der Realisierungsphase eines Prototyps für die KTB-Bohrung

Z.Zt. wird von der SMAG ein Prototyp für eine Probebohrung realisiert. In diesen Prototypen fließen die Erkenntnisse, die aus dem Testaufbau des vorangegangenen Abschnitts gewonnen wurden, ein. Die Optimierung des Prototyps wird durch die Simulation gestützt. Der Prototyp wird mit einem konventionellen Hammerbohrkopf ausgestattet. Die Probebohrung wird im III. Quartal 1988 durchgeführt.

Daran werden sich die Konstruktionsänderungen anschließen, die für die Adaptierung des Hammers an die Einsatzbedingungen in der übertiefen Bohrung des KTB-Projektes erforderlich werden. Versuche zur Standfestigkeit und zur Leistungsfähigkeit unter Bohrlochbedingungen in den Autoklaven des ITE sollen die er-

forderliche Sicherheit für den Hersteller SMAG und den Anwender des Hammers, zunächst das KTB-Projekt, erbringen.

Weitere konstruktive Arbeiten sind für die Realisierung der Kernbohrungen ohne round-trip durchzuführen. Hier sind die bestehenden, prinzipiellen Lösungen zu detaillieren und auszuführen.

Untersuchungen am ITE zur Theorie des schlagenden Bohrens sollen die konstruktiven Arbeiten der SMAG weiter begleiten.

Das Ergebnis der Realisierungsphase wird für das KTB-Projekt einsetzbare Bohrwerkzeuge nach dem Widderprinzip der SMAG sein, die ab 1989 zur Verfügung stehen sollen.

7. Zusammenfassung

Teil der Vorstudie zur Realisierung eines mit der Spülflüssigkeit angetriebenen, hydraulischen Bohrhammers auf der Bohrlochsohle ist eine Studie zum technischen Umfeld der Werkzeuge der Tiefbohrtechnik. Das mit dieser Studie beauftragte Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Technische Universität Clausthal (ITE) wird in seiner Kernaussage zum schlagenden Bohren zitiert: Das ITE kommt zu dem Schluß, daß das schlagende Bohren im allgemeinen unter den spezifischen Bedingungen übertiefer Bohrungen ein überlegenes Bohrverfahren ist. Detaillierte, z.Zt. laufende Untersuchungen werden am ITE quantitative Ergänzungen zu dieser Feststellung erbringen.

Eine Entwicklung der Salzgitter Maschinenbau GmbH (SMAG) ist der vorgeschlagene Hammer nach dem Widderprinzip. Der Hammer ist gekennzeichnet durch die Vermeidung von gleitenden Passungen, gleitenden Dichtungen und feinmechanischen Teilen. Er weist eine hohe Einzelschlagenergie bei einer mittleren Frequenz auf. Sowohl die Dauerstandfestigkeit, auch unter erschwerenden Bedingungen, als auch die Leistungsfähigkeit sollte daher im Sinne einer wirtschaftlichen Bohrung überdurchschnittlich sein.

Für Optimierungsaufgaben am Hammer steht ein Simulations- und Berechnungsprogramm zur Verfügung, daß bereits für die Nachrechnung eines praktischen Funktionsnachweises eingesetzt wurde und für die Konstruktion eines ersten bohrenden Prototyps Verwendung findet.

Im absolvierten, praktischen Funktionsnachweis der Vorstudie wurde ein horizontales Modell realisiert. Mit diesem Modell wurden bis 463 J Einzelschlagenergie und bis 8 Hz Schlagfrequenz erreicht.

Die Realisierung der Bohrwerkzeuge nach dem von der SMAG vorgeschlagenen Prinzip werden durch die Konstruktion, den Bau und den Einsatz eines ersten, o.a. Prototyps z.Zt. vorbereitet.

8. Literaturverzeichnis

- /1/ PROF.DR. MARX u.a. (1988): Grundlagen für den Einsatz eines Bohrhammers in der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB), Studie des Institutes für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Technische Universität Clausthal im Auftrag der Salzgitter Maschinenbau GmbH
- /2/ SMAG (1988): Untersuchung zur Entwicklung eines hydraulischen Bohrhammers mit Antrieb und Steuerung durch die Spülflüssigkeit für Tiefbohrungen im Hartgestein in Teufen bis 14.000 m, Vorstudie im Auftrag der KTB Projektgruppe am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung
- /3/ DR.SC. JEAN U. THOMA (1975): Introduction to Bond Graphs and their Applications, Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies, Braunschweig

Impressum

Redaktion: Dipl.-Ing. H. Kettling, Dipl.-Ing. I. Cyphelly,
Dr.-Ing. R. Mayer

Titelbild: Hydraulischer Bohrerhammer nach dem Widderprinzip im Funktionsnachweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie aus dem Landeshaushalt des Landes Niedersachsen (Förderungskennzeichen AZK/25-RG 86040) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Anschrift der Autoren: Salzgitter Maschinenbau GmbH,
Postfach 51 16 40, D-3320 Salzgitter 51,
Telefon (05341)302-609

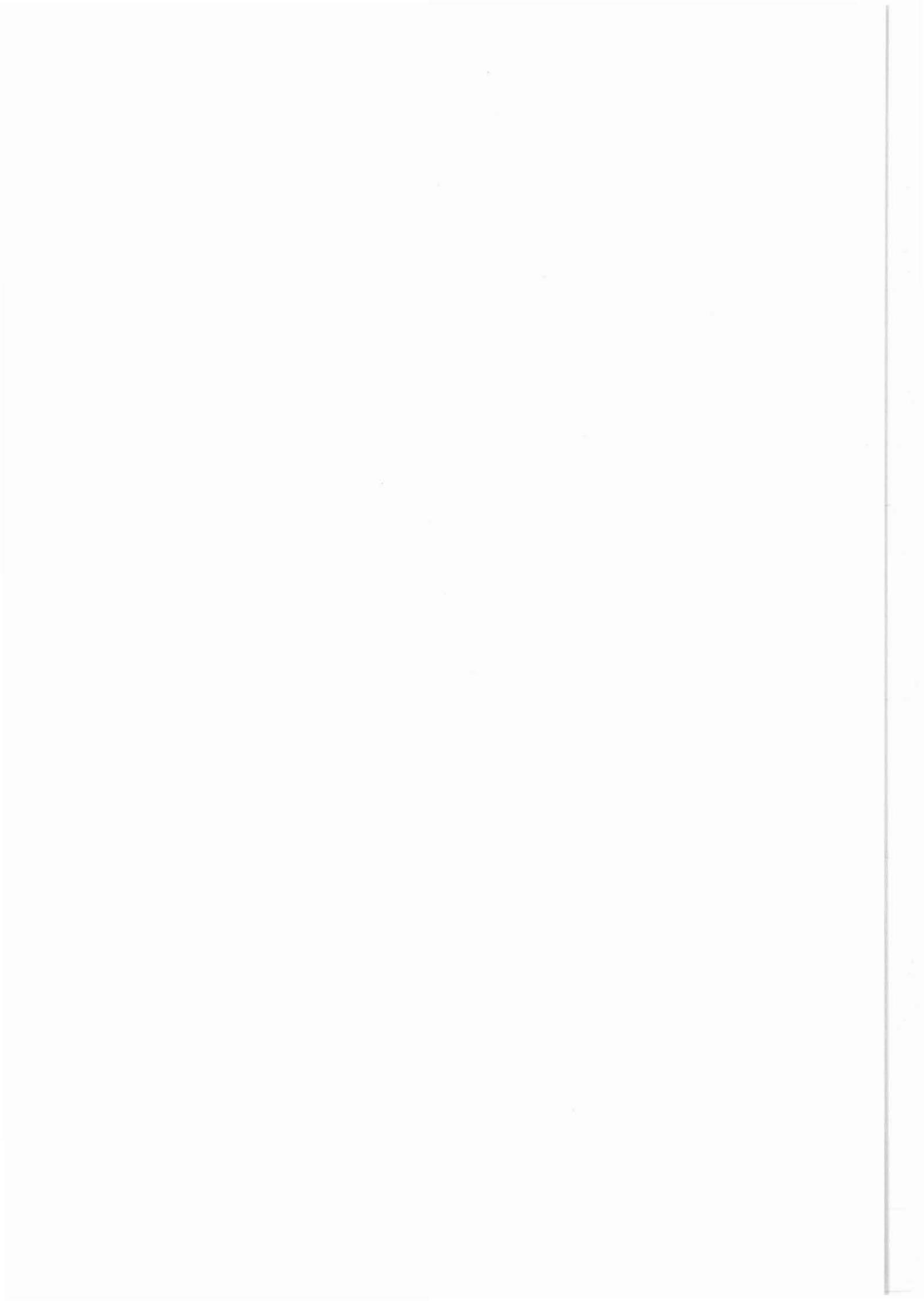
Anschrift des Herausgebers:
Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung,
Postfach 51 01 53, D-3000 Hannover 51,
Telefon (0511)643-2670.

Eastman Christensen GmbH

Christensenstraße 1
3100 Celle

Erarbeitung eines Konzepts für die weitere Entwicklung
von Systemen zum kontinuierlichen Vorwärtskernen
und zum Seitenkernen in der Kontinentalen
Tiefbohrung (KTB)

Dr.-Ing. J. Oppelt



Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Einführung.....	138
1. Anforderungen an Kernbohrsysteme in der KTB-Hauptbohrung.....	139
1.1 Bohrplanung für KTB-Hauptbohrung.....	140
1.2 Erwartete geologische Verhältnisse.....	141
1.3 Temperatur, Druck und Spannungen im Bohrloch.....	142
1.3.1 Einfluß auf Bohrwerkzeuge und Kernprozeß.....	143
1.3.2 Rahmenbedingungen zur Entwicklung von Kernbohrsystemen.....	144
2. Stand der Technik kontinuierlich betriebener Systeme zum Vorwärtskernen und von Systemen zum Seitenkernen.....	145
2.1 Kernbohrerfahrungen im Kristallin.....	146
2.2 Verfügbare Kernbohrsysteme.....	149
2.2.1 Kontinuierliche Systeme zum Vorwärtskernen.....	149
2.2.2 Systeme zum Seitenkernen.....	151
3. Entwicklungsmöglichkeiten für KTB-Kernbohrsysteme.....	152
3.1 Systeme zum kontinuierlichem Vorwärtskernen....	152
3.1.1 Antrieb über Bohrstrang.....	153
3.1.2 Antrieb über Bohrstrang und Bohrlochsohlenmotor.....	156
3.1.3 Antrieb über Bohrlochsohlenmotor.....	157
3.1.4 Antrieb über zwei Bohrlochsohlenmotore.....	160
3.2 Systeme zum Seitenkernen.....	160
4. Realistisches Konzept zur Entwicklung von Kernbohrsystemen.....	162
4.1 Systeme zum kontinuierlichen Vorwärtskernen....	164
4.1.1 Grundannahmen für Entwicklungssysteme.....	165
4.1.2 Vorgeschlagene Entwicklungsarbeit.....	166
4.1.2.1 Kernbohrwerkzeuge für 10 5/8" Bohrlochdurchmesser.....	167
4.1.2.2 Kernbohrwerkzeuge für 8 1/2" Bohrlochdurchmesser.....	170
4.2 Systeme zum Seitenkernen.....	171
5. Projektplanung Kernbohrsysteme KTB.....	172
5.1 Technische Teilziele.....	172
5.2 Kostenplanung.....	176
6. Zusammenfassung.....	177
7. Literatur.....	179

0. EINFÜHRUNG

Die Kernnahme ist beim Abteufen der kontinentalen Tiefbohrung (KTB) in das Kristallin-Gestein von besonderer Bedeutung für den geologisch-wissenschaftlichen Erfolg des Bohrvorhabens. Es wird erforderlich sein, über längere Strecken kontinuierlich zu kernen oder diskontinuierlich Kerne seitlich aus der Bohrlochwand zu entnehmen. Durch das Kernnehmen soll einerseits der Bohrfortschritt möglichst wenig beeinträchtigt werden, andererseits ist eine ausreichende Funktionssicherheit unter den Bedingungen des Kristallins, besonders auch in großen Teufen, unverzichtbar. Die bestehenden Systeme sind hierzu nicht umfassend geeignet. Das Ziel der Studie besteht darin, bestehende Systeme und solche Werkzeuge, die z. Z. bereits in der Entwicklung sind, zu bewerten. Daraus abgeleitet sollen klare Ziele zur Neu- oder Weiterentwicklung solcher Kernbohrsysteme gesetzt werden, die den besonderen Anforderungen der KTB gerecht werden.

Die Studie enthält keine zusammenfassende Darstellung des generellen Standes der Kernbohrtechnik. Hierzu wird vielmehr auf die bekannten und grundlegenden Zusammenstellungen von Noevig (Lit. 1) und Marx und Young (Lit. 2) verwiesen. Auch die Übersicht von J.C. Rowley (Lit. 3) wird im Rahmen der vorliegenden Studie als bekannt vorausgesetzt.

Generelles Ziel dieser Studie ist es, gangbare Wege zur Entwicklung kontinuierlicher Kernbohrsysteme aufzuzeigen, die in der voraussichtlich ab 1989 abgeteufte KTB-Hauptbohrung eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wird auch darauf verzichtet, Darstellungen theoretisch möglicher, aber sehr langfristig angelegter Entwicklungsrichtungen ausführlich mit einzubeziehen. Der Umfang der geplanten Entwicklungen muß auch dem Umstand Rechnung tragen, daß nicht über die gesamte Planungsteufe von ca. 14000 m ein Bohrkern gewonnen werden muß. So soll bis in den Bereich der Endteufe der vollständig gekernter KTB-Vorbohrung überhaupt nicht kernend gebohrt werden.

Falls nachträglich im Bereich des bereits abgeteufte Bohrlochs Gesteinsproben entnommen werden sollen, müssen geeignete Seitenkerngeräte zur Verfügung stehen. Aufgrund der relativ seltenen Einsatzmöglichkeiten für solche Werkzeuge besteht in diesem Bereich eine besonders große Diskrepanz zwischen dem im Kristallin erforderlichen Leistungsverhalten und den Eigenschaften der gegenwärtig kommerziell erhältlichen Geräte.

1. ANFORDERUNGEN AN KERNBOHRSYSTEME IN DER KTB-HAUPTBOHRUNG

Im Mittelpunkt des geowissenschaftlichen Forschungsprojekts "Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland" (KTB) steht die Abteufung einer bis zu 14.000 m tiefen Bohrung in das Kristallin-Gestein einer Lokation in der Nähe von Windischeschenbach/Erbenheim in der Oberpfalz. Es ist geplant, im Bereich unterhalb der Ankerrohrteufe von ca. 3.000 - 5.000 m über ungefähr 30 % der Gesamtteufe Bohrkerne zum Zweck der wissenschaftlichen Auswertung zu gewinnen.

Das Anforderungsprofil geeigneter Kernbohrsysteme wird einerseits bestimmt durch die Einwirkung der physikalischen und geologischen Parameter, besonders in großen Teufen der Bohrung. Andererseits ergeben sich zusätzliche Bedingungen hinsichtlich einer effektiven Handhabung der Kernbohrsysteme.

Als generelle Anforderung zur Anpassung an die zu erwartenden Bohrlochbedingungen muß von allen einzusetzenden Bohrwerkzeugen eine hohe mechanische Stabilität und Zuverlässigkeit erreicht werden. Tab. 1 enthält eine Darstellung der wichtigsten Bohrlochparameter, die je nach Teufe und Ausbildung des Gesteins, den Kernbohrprozeß in unterschiedlichem Umfang behindern.

- o Temperatur
- o Gebirgsspannung
- o Gesteinsfestigkeit
- o Gesteinsabrasivität
- o Gesteinshomogenität
- o Entfernung zur Bohrlochsohle

Tab. 1: Wirksame Bohrloch-Parameter im Kristallin bei großen Teufen

- o Verschleiß an der Bohrkronen
- o Neigungsaufbau
- o Mangelnde Steuerbarkeit des Kernprozesses
- o Geringer Bohrfortschritt
- o Geringe Standlänge der Kronen
- o Nachfall von Gebirge
- o Kernverklemmer
- o Mangelhafter Bohrkleinaustrag
- o Vibrationen im Bohrstrang
- o Leistungsverluste durch Reibung im Bohrloch
- o Bohrstrangverschleiß
- o Überschreitung der Temperatureinsatzgrenze von Werkzeugen
- o Überschreitung der Tragfähigkeit durch große Stranglänge
- o Spülungsverluste
- o Mangelhafter Kerngewinn

Tab. 2: Kritische Einflußgrößen auf Kernbohrarbeiten im Kristallin bei großen Teufen

Die Auswahl und Auslegung von Kernbohrsystemen muß den angeführten kritischen Einflußgrößen (Tab. 2) weitestgehend Rechnung tragen.

1.1 Bohrplanung für KTB-Hauptbohrung

Das grundlegende bohrtechnische Konzept des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland sieht vor, daß neben der eigentlichen übertiefen Hauptbohrung zunächst eine sogenannte Vorbohrung (KTB-VB) in etwa 200 m Entfernung zur Hauptbohrung abgeteuft wird. Unter Berücksichtigung der im Rahmen einer technisch-wirtschaftlichen Vergleichsstudie gewonnenen Erkenntnisse (Lit. 4) wurde von der KTB-Projektleitung festgelegt, daß hierfür ein modifiziertes Seilkernverfahren verwendet wird. Die Bohrlochplanung für die KTB-Hauptbohrung (KTB-HB) sieht vor, mit Kernarbeiten erst im Bereich der erzielten Endteufe der KTB-VB zu beginnen (Abb. 1).

Die große Härte des Gesteins bildet einen weiteren kritischen Parameter für die Einsatzfähigkeit der zu entwickelnden Systeme und Werkzeuge. Wenn die Kernbohrsysteme mechanisch zu empfindlich ausgelegt sind, besteht die Gefahr der Zerstörung von Diamantschneiden u.ä. bereits beim Befahren des Bohrlochs.

1.3 Temperatur, Druck und Spannungen im Bohrloch

Die Temperatur des Gesteins auf Bohrlochsohle bildet einen besonders kritischen Parameter für die Funktion von Rollenbohrkronen, Untertagedirektantrieben, Kernbohrsystemen, anderen bewegten Untertagewerkzeugen und auch dem Bohrgestänge. Je höher die erwartete Temperatur ist, desto größer wird der Entwicklungsaufwand für die erforderlichen Werkzeuge sein.

Abb. 2 zeigt in vereinfachender Darstellung die Temperaturverhältnisse an der Lokation Oberpfalz entsprechend der derzeit bekannten geologischen Abschätzung.

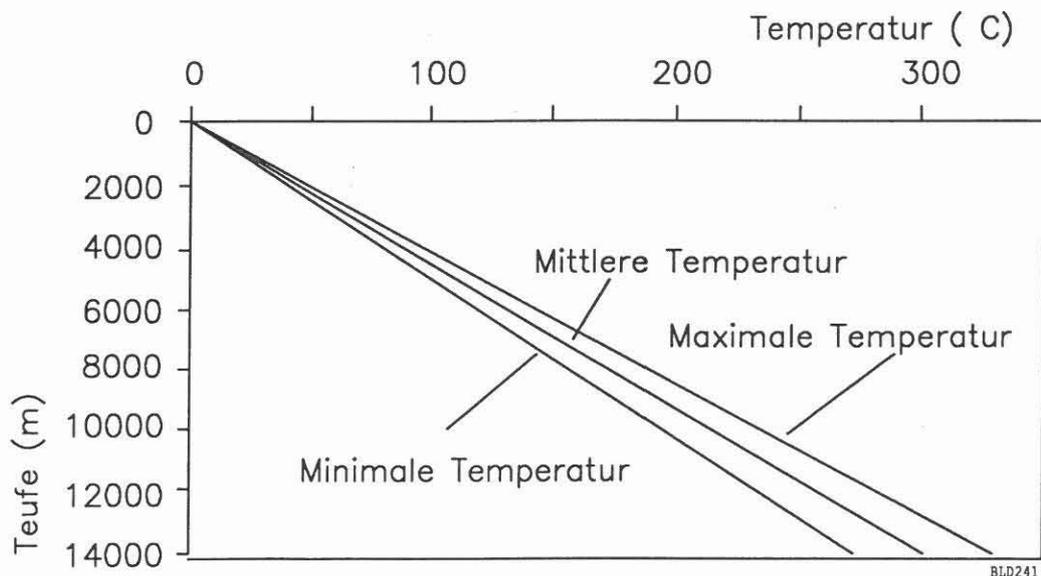


Abb. 2: Temperaturverhältnisse für die Bohrlokation

Verglichen mit einem sonst durchschnittlich angesetzten Gradienten von 3 grad/100 m liegen hier bei einem mittleren Wert von 2 grad/100 m für die Teufe von 15.000 m recht

günstige Verhältnisse vor. Selbstverständlich befindet sich die Temperatur der zirkulierten Spülung immer unterhalb der Bohrlochsohlen-Beharrungstemperatur. Dies zeigt sich deutlich in dem veröffentlichten Zwischenbericht über die Kola SG-3-Bohrung (Lit 6). Die Unterschiede zwischen Gesteins- und Zirkulationstemperatur betragen hier in großer Tiefe bis zu 30 grad. Für die Auslegung der Werkzeuge muß aber sicherheitshalber die Gesteinstemperatur zugrundegelegt werden.

Die Druckverhältnisse auf Bohrlochsohle werden in erster Hinsicht durch den geostatischen Druck bestimmt. Für die vorliegende Lokation wird von einer mittleren Gesteinsdichte von $2,9 \text{ kg/dm}^3$ ausgegangen. Im Rahmen der geologischen Prognose läßt sich damit für die Tiefe von 14000 m ein geostatischer Druck von ungefähr 4000 bar errechnen. Für das Spülgewicht von $1,05 \text{ kg/dm}^3$ stände der Gebirgsspannung in 14000 m Tiefe nur ein Spülungsdruck von wenig mehr als 1000 bar gegenüber.

Die grundsätzliche Ausbildung von Spannungen an der Bohrlochwand ergibt sich entsprechend Abb. 3 (Lit 7).

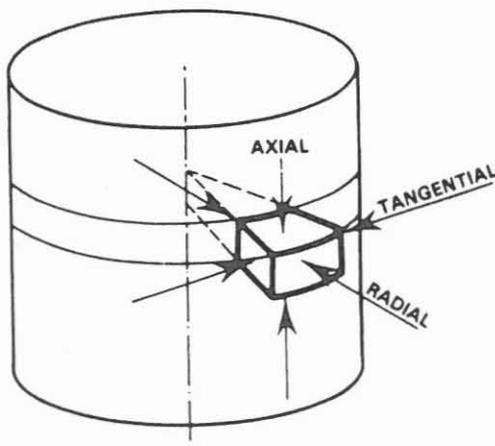


Abb. 3: Spannungen an der Bohrlochwand, nach Lit 7

1.3.1 Einfluß auf Bohrwerkzeuge und Kernprozeß

Erhöhte Temperaturen bilden für viele der heute verwendeten Kernbohrwerkzeuge, bzw. deren Komponenten, einen kritischen Einsatzparameter. Einige der verwendeten Werkstoffe verlieren völlig ihre Funktionsfähigkeit, andere verändern ihre Eigenschaften in bemerkenswertem Umfang.

Das beschriebene Spannungsverhalten im Bohrloch führt zu Problemen bezüglich der Bohrlochform und der Kerngewinnung, wie u.a. auch aus der sowjetischen Bohrung Kola SG-3 bekannt wurde.

Nicht maßhaltige, teilweise erweiterte Bohrlöcher beeinträchtigen die effektive Stabilisierung des Kernrohres. Schwingungen können verstärkt werden, was zu erheblichen Problemen bezüglich der Beibehaltung eines gewünschten Bohrlochverlaufs führt. Ausbrüche und Einstürze der Bohrlochwand sowie andere Bohrlochinstabilitäten können das Bohrloch mit abrasiven Bruchstücken auffüllen. Beim Gestängeeinbau besteht dann insbesondere die Gefahr, daß die relativ großen harten Stücke auch in das Gestängeinnere eintreten und bei der Wiederaufnahme der Kernprozesses Funktionsstörungen hervorrufen.

Die durch die Entspannung des erbohrten Kerns entstehende Volumenänderung führt zu Kernverklemmungen und zu Brüchen entlang der durch die Tektonik vorgegebenen Schwachstellen. Das Kernrohr sollte deshalb möglichst glatt ausgeführt werden und einen etwas größeren Innendurchmesser aufweisen.

Besondere Schwierigkeiten können dabei auch Kerne bereiten, die in schmale Scheiben brechen, wie es u.a. in der Kola-Bohrung (Sowjetunion) gefunden wurde. Die Entstehung der scheibenförmigen Kerne läßt sich auf ein Entspannen des erbohrten, spröden Gesteinsmaterials zurückführen.

1.3.2 Rahmenbedingungen zur Entwicklung von Kernbohrsystemen

Jede Entwicklung von Kernbohrsystemen für die KTB-HB muß als Ausgangsbasis die derzeit vorhandenen Werkzeuge und Systeme der Tief- und Flachbohrtechnik mit verwenden. Für den Bereich mäßiger Teufen wird es schwerpunktmäßig darauf ankommen, Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten in Richtung einer verbesserten Wirtschaftlichkeit zu betreiben. Bei größeren Teufen muß dann das Hauptaugenmerk darauf gerichtet sein, die Betriebssicherheit der Kernsysteme durch entsprechende Verbesserung der Technologie so zu gewährleisten, daß die Kernarbeiten bei gutem Kerngewinn keine wesentliche Beeinträchtigung des Abteufprozesses darstellen. Im Bereich extremer Teufen müssen die Systeme zunächst primär darauf entwickelt werden, daß überhaupt ein Kerngewinn möglich wird.

Teufengrenze m	Bereich	Kernstrecke m	Charakterisierung
3000 (5000)	ET KTB-VB	50	Vollbohren, Seitenkernen, Spatkernen
6000	Mittlere Teufe	350 - 1000	Kerngewinn, Wirtschaftlichkeit, Kernqualität
10000 (12000)	ET 10 5/8"	1300 - 2000	Kerngewinn, Kernqualität
14000	ET KTB-HB	700 - 1300	Kerngewinn

Tab. 3: Kernbohrsysteme für Teufenbereiche der kontinentalen Tiefbohrung (KTB-HB)

Für Zwecke der Entwicklungsplanung soll von den in Tab. 3 aufgeführten charakteristischen Teufenabschnitten ausgegangen werden, die jeweils bestimmte Anforderungen an die Entwicklung von Kernbohrsystemen stellen.

Bis zur erreichten Endteufe der Vorbohrung (KTB-VB) kann in der Hauptbohrung auf einen kontinuierlichen Kerngewinn verzichtet werden. Kontroll-Probenahmen könnten jedoch entweder durch diskontinuierliches Spot-Kernen oder durch nachträgliches Seitenkernen in bereits abgeteufte Bohrlochabschnitten erfolgen. Darüber hinaus böte sich in diesem Abschnitt allerdings die Gelegenheit, in der Entwicklung befindliche Werkzeuge für größere Teufen Feldtests unter realistischen Bedingungen zu unterziehen.

2. STAND DER TECHNIK KONTINUIERLICH BETRIEBENER SYSTEME ZUM VORWARTSKERNEN UND VON SYSTEMEN ZUM SEITENKERNEN

Eine planvolle und effektive Entwicklung optimierter Kernbohrsysteme für die übertiefe KTB-HB muß auf den bisher international gewonnenen Erfahrungen beim Kernen im Kristallin aufbauen. Weiterhin ist der allgemeine Stand der Technik fortschrittlicher Kernbohrsysteme zu berücksichtigen.

2.1 Kernbohrerfahrungen im Kristallin

Im Gegensatz zum Bohren nach Erdöl und Erdgas im Sedimentär-
gestein liegen für das Kristallinbohren bzw. -kernen sehr
wenig Erfahrungen vor. Zudem ist die hier zusammengetragene
Anzahl der Daten relativ schwer überschaubar und kann kaum
in ein einheitliches Bild gebracht werden.

Bezüglich des Einsatzverhaltens von Diamantbohrkronen können
folgende Aussagen gefunden werden.

- o Mit kleinerem Verhältnis von Bohrlochfläche zu Kernfläche
(R-Faktor) verbessern sich Bohrfortschritt und Kronenlebens-
dauer.

Als Beispiel für die Abhängigkeit der Kronenleistung vom
R-Faktor soll die entsprechende vergleichende Auftragung
einiger Ergebnisse für die Standlänge nach Abb. 4 dienen.

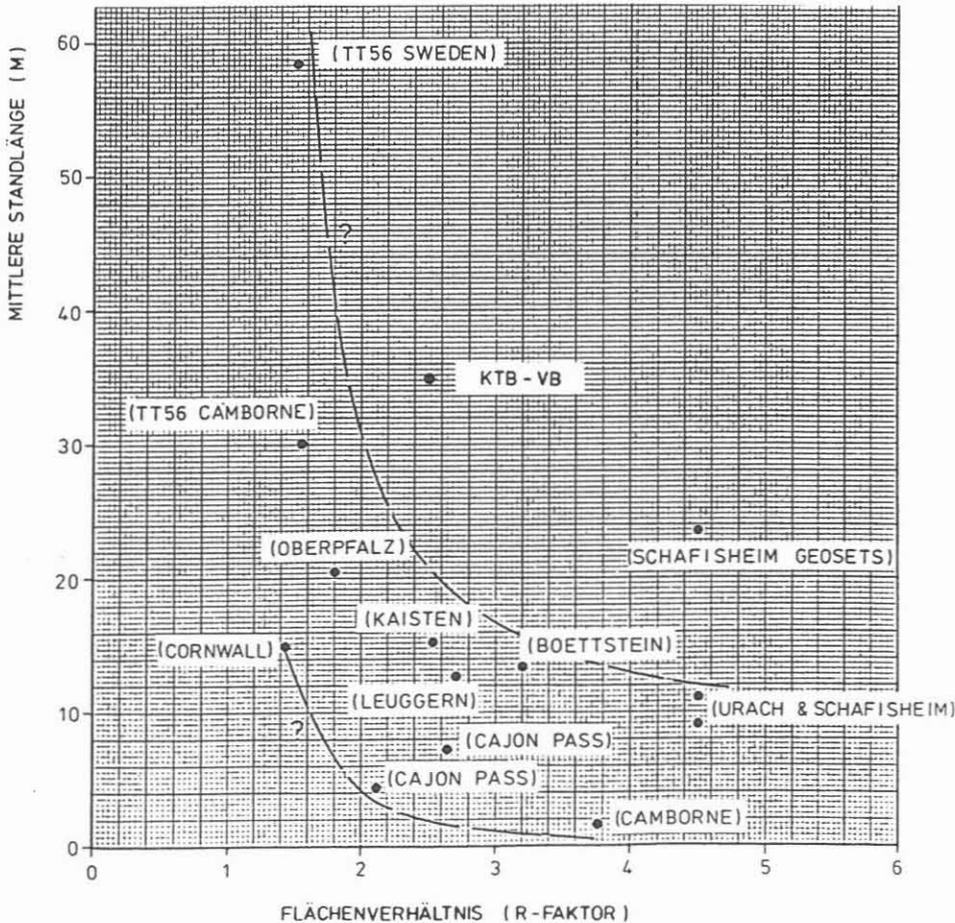


Abb. 4: Mittlere Standlänge von Diamantbohrkronen im Kristallin

- o Bei gleichem Flächenverhältnis scheint das Leistungsbild mit kleinerem Bohrlochdurchmesser insgesamt besser zu sein.
- o Der Bohrfortschritt kann durch zunehmende Drehgeschwindigkeit, z.B. durch Verwendung von Untertagemotoren, verbessert werden. Dabei wird vorausgesetzt, daß solche Systeme erfolgreich angeordnet und betrieben werden können. Die Schneidelemente müssen effektiv gekühlt werden.
- o Das Verhalten in tiefen Bohrungen ist generell schlechter als in flachen Bohrungen. Je tiefer die Bohrungen sind, desto weniger handelt es sich um die reinen unbeeinflussten Probleme des Schneidens und Abtragens.

Allerdings können die angedeuteten Trends nur näherungsweise als Gesetzmäßigkeit angesehen werden. Selbst bei übereinstimmenden geologischen Verhältnissen können signifikante Unterschiede im Leistungsverhalten auftreten. Diese lassen sich z.T. auf die mehr oder weniger optimal eingestellten Betriebsbedingungen zurückführen. Von wesentlicher Bedeutung ist aber auch die Ausschöpfung des durchaus noch vorhandenen Entwicklungspotentials bei Diamantbohrkronen. Durch geeignete Gestaltung können insbesondere imprägnierte Diamantbohrkronen in ihrem Leistungsverhalten beträchtlich verbessert werden. Dazu zeigt Tab. 4 die Ergebnisse (bezogene Größen für Belastung, Bohrfortschritt und Standlänge) von Labortests an einem Bohrversuchsstand, die kürzlich bei Eastman Christensen GmbH in Celle durchgeführt worden sind (Gestein: Amphibolit; Krone: 96 x 63 mm; Spülung: Wasser).

Lfd. Nr.	Design-Typ	WOB/AD (N/mm ²)	ROP•AK/AD (m/h)	s* (m/mm)
1	A	14.2	16.3	6.3
2	B	15.7	31.0	16.6
3	C	13.2	28.5	28.4
4	C	11.6	15.4	18.6
5	C	12.4	15.6	49.4
6	D	8.2	40.0	51.7
7	D	8.2	32.5	9.9
8	D	8.2	15.0	39.5
9	E	11.7	27.1	6.8
10	F	9.2	19.3	18.6

Tab. 4: Bohrleistung imprägnierter Diamantkronen im Laboratoriumsversuch

Die Prüfstandergebnisse ergaben, daß die Bohrleistung durch Optimierung der direkten Schneidflächenbespülung wesentlich erhöht werden kann. Eine Umsetzung der Laborergebnisse in das Bohrfeld muß sorgfältig geplant werden, weil die Umgebungsbedingungen im praktischen Bohrbetrieb von den idealen Bedingungen stark abweichen.

Große Lippenbreiten und Flächenverhältnisse (R-Faktor) sind guten Ergebnissen beim Diamantkernen eindeutig nicht förderlich. Vom Standpunkt der Effektivität des Kernprozesses sind daher Verhältnisse wie im Bergbau, d.h. dünne Lippen und kleine R-Faktoren, grundsätzlich anzustreben. Allerdings müssen dabei konstruktive Probleme, z.B. das der ausreichenden Haltbarkeit der Ausrüstung, gelöst werden. Eine Alternative zur Ausbildung der extrem dünnen Lippe stellt die Möglichkeit dar, bei Kronen mit größerer Lippenbreite durch Änderung bestimmter konstruktiver Parameter ähnliche Betriebsbedingungen wie bei dünnlippigen Kronen zu erhalten.

Auch für Rollenbohrkronen liegen relativ wenig Erfahrungen im Kristallin-Gestein vor. Ohne Berücksichtigung der sowjetischen Kola SG-3-Bohrung können im wesentlichen nur einige Ergebnisse aus Bohrarbeiten im Los Alamos HDR-Projekt, im NAGRA-Endlager-Erkundungsprojekt, im Camborne School of Mines HDR-Projekt sowie aus der Gravberg 1-Bohrung in Mittelschweden bewertet werden. Darüber hinaus wurden in jüngster Zeit im obersten Teufenabschnitt der KTB-Vorbohrung (KTB-VB) zwei unterschiedliche Typen von Rollenbohrwerkzeugen eingesetzt.

Erfahrungen liegen aus der Zeit seit 1974 mit insgesamt 6 verschiedenen Bauarten vor. Wesentliche Grundtypen sind die 4-Rollen-Krone, die 4-Rollen-Hybrid-Krone mit PCD-Schneidelementen zur Verbesserung der Kernqualität und die 6-Rollen-Krone mit je 3 zum Schneiden von Bohrloch und Kern vorgesehenen Rollen.

- o Aufgrund des gegenüber Vollbohrwerkzeugen verringerten Bauraums bereitet die Lagerung der Schneidrollen prinzipiell Schwierigkeiten. Nach den vorliegenden Ergebnissen wurden hierbei jedoch in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte erzielt.
- o Das Schneid- und Verschleißverhalten der im Kristallin üblichen Hartmetall-Stifte konnte ebenfalls verbessert werden. Ein Entwicklungspotential wird hier insbesondere in der Beschichtung dieser Schneidelemente mit noch härteren Materialien gesehen.
- o Ein Kerngewinn, der vergleichbar mit Diamantkronen unter optimalen Betriebsbedingungen ist, scheint gegenwärtig mit Rollenwerkzeugen nicht möglich zu sein.

- o Die Probleme bezüglich des Kerngewinns verschärfen sich offenbar besonders stark mit zunehmender Tiefe. Es müssen daher mit hoher Priorität Vorrichtungen am System Rollenkrone/Kernrohr geschaffen werden, die ein Eindringen des Kerns unter den Spannungsbedingungen tiefer Bohrlöcher erleichtern bzw. überhaupt nur ermöglichen.
- o Aufgrund ihrer Wirkungsweise können mit Rollenbohrkronen im Kristallin bei gleichem R-Faktor ähnliche Bohrleistungen (1-5 m/h, 50 m) erzielt werden wie bei gut dimensionierten Diamantkernsystemen.

Es kann gegenwärtig die Schlußfolgerung gezogen werden, daß Rollenbohrkronen im kristallinen Gestein nur bis zu solchen Teufen gut schneiden, in denen noch keine Spannungs-Entlastungseffekte auftreten. Dies gilt auch für die "Hybrid-Kronen". Rollenbohrwerkzeuge haben grundsätzlich den Vorteil, relativ robust zu sein. Sie eignen sich dazu, beim Befahren des Bohrlochs Räumarbeiten durchzuführen, auf Sohle vorliegender Nachfall kann zermahlen werden, und sie vertragen generell eine relativ raue Behandlung, ohne zerstört zu werden. Verbesserungen sind erforderlich bezüglich einer Integration in die konstruktive Auslegung des Kernrohrs, insbesondere mit Blick auf den Kernfangmechanismus.

2.2 Verfügbare Kernbohrsysteme

Zumindest in der westlichen Welt wurden Kernbohrsysteme für die Anwendung zum Kontinuierlichen Kernen im Kristallin nur im Bereich der Bergbau-Exploration zielgerichtet entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Seitenkernsysteme sind bisher nur vereinzelt erfolgreich im Kristallin eingesetzt worden.

2.2.1 Kontinuierliche Systeme zum Vorwärtskernen

Die aus dem Bergbau-Bereich bekannten Systeme mit Diamantkronen, gegebenenfalls unter Verwendung der Seilkerntechnik, sind für die Teufen und Durchmesser der KTB-Hauptbohrung (KTB-HB) in der vorliegenden Form nicht geeignet. Es scheint aber möglich und sinnvoll, bestimmte Komponenten oder Bauteile für neu zu entwickelnde Kernbohrsysteme zu übernehmen. Ein wesentliches Merkmal der Bergbau-Technik ist die häufige und erprobte Verwendung von kontinuierlichen Kernverfahren.

Aus dem Bereich Ölfeld-Rotary-Kernbohren kann hier grundsätzlich zwischen dem Drehtischantrieb des gesamten Bohrstranges und dem direkten Antrieb des Werkzeugs durch Untertageantrieb unterschieden werden. Der Drehtischantrieb weist prinzipiell den Nachteil einer begrenzten Drehzahl auf. Außerdem verstärken sich mit zunehmender Teufe die Leistungs-

verluste durch Strangreibung im Bohrloch. Schließlich ist auch von einem signifikanten Verschleiß des Gestänges im abrasiven Kristallin auszugehen. Grundsätzlich muß daher nach allen vorliegenden Erfahrungen, zumindest ab mittleren Teufen von 5000 - 6000 m, dem Untertagedirektantrieb der eindeutige Vorzug gegeben werden. Als Antriebe kommen im wesentlichen nur Moineau-Verdrängermotoren und Turbinen in Frage. Der Einsatz von Verdrängermotoren ist jedoch teufenmäßigen Beschränkungen unterworfen, weil die Elastomerauskleidung des Stators derzeitiger Ausführungsformen nur bis zu Temperaturen von ca. 150°C einsetzbar ist. Ein realistisches mittelfristiges Entwicklungsziel bildet eine Temperaturgrenze von 200°C.

Turbinen, die deutlich höhere Fertigungskosten aufweisen, können mit relativ geringem Modifizierungsaufwand für den Einsatz bei höheren Temperaturen umgestellt werden. Größerer Entwicklungsaufwand ist hier allenfalls im Bereich der zu erwartenden Maximaltemperaturen der Bohrung erforderlich. Allerdings sind die gegenwärtig gebräuchlichen Turbinen aufgrund ihrer relativ hohen Drehzahl mit Rollenbohrkronen nicht unter optimalen Bedingungen einzusetzen. Entsprechender Entwicklungsaufwand zur Reduzierung der Drehzahl ist daher unumgänglich (Lit 8).

Die eigentliche Vorrichtung zur Aufnahme des Gesteinskerns bildet sicherlich den kritischsten Teil des gesamten Kernbohrsystems. Im oberen Bohrlochabschnitt bis ca. 6000 m lassen sich zwar mit den vorhandenen Systemen vermutlich Kerngewinne in gewissem Umfang erzielen. Zur Steigerung der Effektivität und Qualität sind aber auch hierfür bereits Entwicklungsanstrengungen erforderlich. Bei Einsatz von Diamantkronen geht es im wesentlichen um eine Erhöhung des Bohrfortschritts. Bei Rollenwerkzeugen ist eine optimale Abstimmung des Systems Krone-Kernrohr erforderlich. Ansatzpunkte für Verbesserungen sind z. B. Ausführung und Beschichtung des Innenrohrs von Kernrohren, Optimierung der Kernfangeinrichtung und Maßnahmen zur Unterstützung des Kerneindringens in das Kernrohr. Kontinuierlich arbeitende Systeme für diesen Teufenbereich existieren zur Zeit nicht.

Für den Teufenbereich ab 6000 m besteht keine realistische Hoffnung, mit den heute zur Verfügung stehenden Systemen nennenswerte Kerngewinne erzielen zu können. Sämtliche Komponenten, also Antrieb, Kernaufnahmevorrichtung und Kernbohrkrone müssen wesentlich überarbeitet werden, weil Temperatur, Gebirgsspannungen und Teufenbedingte Festigkeitsprobleme eine einwandfreie Funktion nicht mehr zulassen. Ab 10000 m Teufe erfahren diese Parameter erneut eine weitere Verschärfung.

Für die KTB-HB gilt generell, daß keine Systeme existieren, die einen kontinuierlichen Kerngewinn in den anstehenden Durchmesserbereichen liefern könnten.

2.2.2 Systeme zum Seitenkernen

Zur Bewertung gegenwärtig zur Verfügung stehender moderner Seitenkernsysteme wurden schließlich nur noch vier Verfahren unter realistischen Gesichtspunkten behandelt (Tab. 5).

Typ	Bohrwerkzeug	Antriebsmotor	Antrieb über	Steuerung über	Kenndurchmesser/-länge (mm)	Kernmagazin	Einsatzteufe Parameter
ITE - EC Moineau-System	Imprägnierte Diamantkrone	Moineau-Motor	Spülung / Strang	Wireline	41	1	150° C -- --
Gearhart Hard Rock Coring Tool	Imprägnierte Diamantkrone	Hydraulikmotor	El. Stromkabel	Multi-Conductor	24/44	12	150° C 1380 bar --
Schlumberger Diamond Core Slicer	Diamant-Sägeblätter	Elektromotoren	El. Stromkabel	Multi-Conductor	25,4 x 914	4	150° C 1380 bar 6700 m
Statoil - EC SWC	Imprägnierte Diamantkrone	Hydraulikmotor	Spülung / Strang	Multi-Conductor	37 / 89	15	70° C (120° C) 3000 m (6000 m)

Tab. 5: Vergleichende Kenndaten von Seitenkernsystemen

Felderfahrungen liegen bisher nur für das Gearhart- und das Schlumberger-Werkzeug vor. Sie weisen z. Zt. den am weitesten fortgeschrittenen Entwicklungsstand auf. Beide Werkzeuge werden über Multi-Conductor-Wireline mit Elektromotoren angetrieben, wobei im Gearhart-Werkzeug das Drehmoment der Krone hydraulisch erzeugt wird. Das ITE-EC-System und das Statoil-EC-System werden zunächst am Gestänge eingebaut. Beim ITE-EC-System wird anschließend das Kernrohr mit Moineau-Motor am Seil eingebaut, während beim Statoil-EC-System eine Lanze mit Kernmagazin nachträglich am Seil eingebaut wird. Bei diesen beiden Verfahren erfolgt der Antrieb durch die Bohrspülung. Die maximale Einsatzteufe ergibt sich für alle Systeme durch die Betriebstemperatur.

3. ENTWICKLUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR KTB-KERNBOHRSYSTEME

Die Realisierung von Werkzeugen zum kontinuierlichen Vorwärtskernen und zum Seitenkernen in der KTB-HB kann mit unterschiedlichen Mitteln erfolgen. Im vorliegenden Abschnitt soll zunächst die Bandbreite möglicher Entwicklungsziele dargestellt werden. Angesichts der notwendigen zeitlichen und finanziellen Beschränkungen wird dann nachfolgend eine entsprechende Schwerpunkt-Bildung erfolgen, die schließlich in den Vorschlag eines realistischen Entwicklungsprojekts mündet.

3.1 Systeme zum kontinuierlichen Vorwärtskernen

Systeme zum kontinuierlichen Kernen zeichnen sich dadurch aus, daß ein beträchtlicher Teil der üblicherweise für Roundtrip-Arbeiten erforderlichen Zeit eingespart wird, weil das Zutagefördern des Bohrkerns ohne Ausbau des Bohrstrangs möglich ist. Das Funktionieren dieses Prinzips setzt aber eine Standlänge der Bohrwerkzeuge voraus, die ein Mehrfaches der Länge eines einzelnen Kernmarsches beträgt. Ein solches System ist allerdings auch dann gerechtfertigt, wenn aufgrund häufiger Kernverklemmer das Kernrohr bzw. Innenkernrohr besonders häufig ausgebaut werden muß. Ein optimales kontinuierliches Kernbohrsystem beinhaltet neben dem ohne Strang-Roundtrip beförderbaren Kern auch noch die Möglichkeit, die Bohrkronen mit dem Innenrohr zusammen auszubauen. Der Bohrstrang könnte auf diese Weise über die gesamte Kernbohrsektion auf Sohle verbleiben.

Eine Übersicht möglicher kontinuierlicher Systeme wird in Abb. 5 gezeigt. Eine grobe Unterscheidung ist auch hier wieder zu treffen zwischen Systemen auf der Basis des reinen Drehtischantriebs und solchen mit Untertagedirektantrieb. Eine Besonderheit bilden Kombinationssysteme, die auf der gleichzeitigen Verwendung von Rotary- und Motor-Antrieb beruhen. Schlag-Kernbohrsysteme könnten mit dem Bohrstrang oder durch Motoren angetrieben werden.

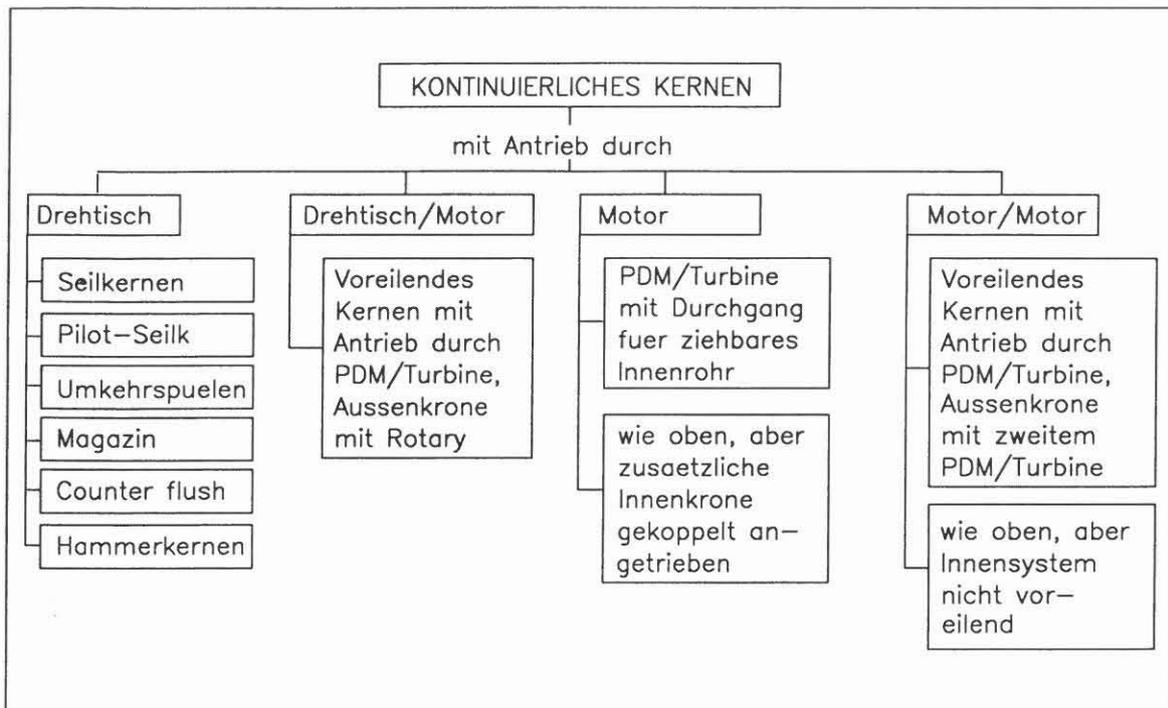


Abb. 5: Kontinuierliche Kernbohrverfahren

3.1.1 Antrieb über Bohrstrang

Das System erster Wahl bei Antrieb des Bohrstrangs von Drehtisch oder Kraftdrehkopf ist das im Bergbau bereits klassische Seilkernen. Dabei wird das Innenkernrohr mit dem Gesteinskern am Seil zutage gefördert. Im Bergbau werden hierzu im allgemeinen spezielle Bohrstränge verwendet, die nur relativ geringfügige Innenverdickungen im Verbinderbereich aufweisen. Falls ein gewöhnliches Rotary-Gestänge mit größeren Durchmessererengungen im Verbinderbereich verwendet werden soll, muß der Durchmesser des Kernrohrs entsprechend klein gehalten werden.

Das beschriebene Standard-System wird mit einem durchgehenden Strang konstanten Durchmessers betrieben. Als Variante dieses Konzepts kann auch eine Anordnung gemäß Abb. 6 realisiert werden.

Dabei wird mit einem Rotary-Bohrstrang das Bohrloch im Nenn-Durchmesser bis auf die Kernbohrteufe gebohrt. Zum Kernen wird am unteren Ende des Drehbohrgestänges ein Bergbau-Seilkernbohrstrang befestigt. Das Bohrloch wird nun mit dem kleineren Durchmesser des Seilkern-Systems durch Verschieben und Drehen des Rotary-Bohrstrangs weiter abgeteuft. Die eingebaute Gestängelänge des Bergbau-Stranges soll mindestens der erwarteten Standlänge der Diamantkrone entsprechen.

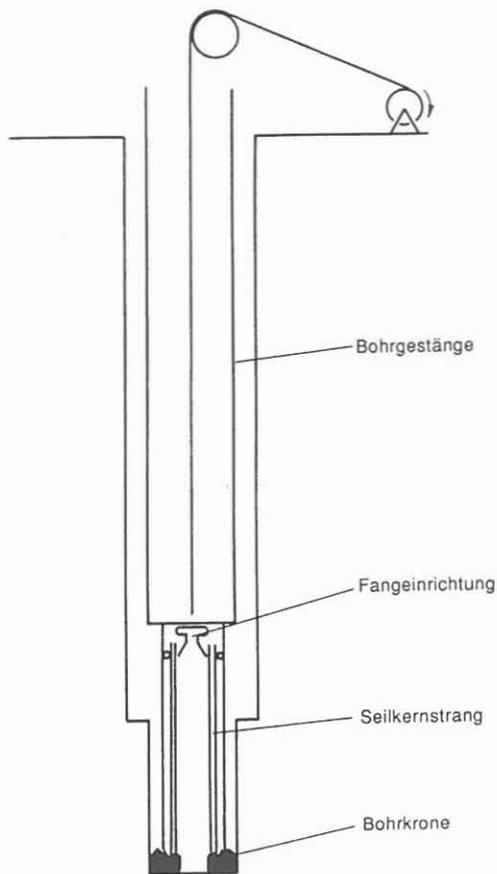


Abb. 6: Im Rotary-Strang abgesetzter Bergbaustrang

Das gefüllte, oder auch das verklemmte, Innenkernrohr muß dann so dimensioniert sein, daß es die engsten Stellen von Seilkernstrang und Rotary-Gestänge passieren kann. Ein Ausbau des kompletten Stranges ist nur erforderlich, wenn entweder die Bohrkrone verschlissen oder die Länge des Bergbau-Gestänges abgebohrt ist. Das Bohrloch wird anschließend mit einem am Drehbohrgestänge angebrachten Vollbohrwerkzeug auf den Nenndurchmesser erweitert. In einer Variante dieser Vorgehensweise könnte der gesamte Bergbau-Strang ziehbar im Drehbohrstrang angeordnet sein. Dann würde nach jedem Befüllen des Kernrohrs der Bergbau-Strang ausgebaut. Anschließend könnte der untere Strang verlängert bzw. die Pilot-Bohrkrone ausgetauscht und die Anordnung wieder eingebaut werden, bis schließlich das Bohrloch mit dem Vollbohrmeißel erweitert wird.

Bergbau-Diamantkernbohrsysteme werden grundsätzlich optimal mit wesentlich höheren Drehzahlen betrieben, als dies der Rotary-Antrieb erlaubt, Es bietet sich daher an, den Bergbau-Strang mit einem Untertagemotor anzutreiben. Als erste Alternative dieser Lösung wäre der nicht-rotierende Teil des Motors mit dem Rotary-Gestänge verbunden, während die Antriebswelle den Übergang zum Bergbau-Strang bildet. Um das

Innenrohr am Seil ausbauen zu können, muß der Motor einen entsprechend großen freien Durchgang besitzen. Als weitere Alternative bietet sich die Verwendung eines im Drehbohrgestänge längsverschieblich an einem Untertageantrieb gekoppelt angeordneten Kernrohrs an, wie schematisch in Abb. 7 dargestellt ist.

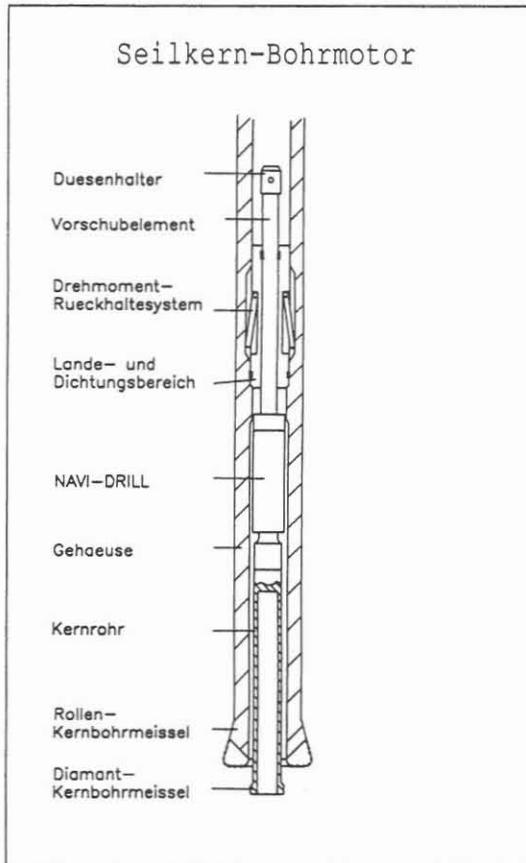


Abb. 7: Hydraulisch drehendes und vorschiebendes Motor-Kerngerät

Die Kombination aus Diamantbohrkrone, Kernrohr, Verdrängermotor und Verriegelungssystem wird in den Strang eingeworfen und verriegelt längs-verschieblich in dessen unterem Teil.

Grundsätzlich wurde bei allen bisher angesprochenen kontinuierlichen Kernverfahren davon ausgegangen, daß der Kernbehälter im weitesten Sinne mit Hilfe eines Seiles zutage gefördert wird. Allerdings ist es prinzipiell auch möglich, das Zutagefördern des gefüllten Innenrohrs mit Hilfe einer sogenannten Umkehrspülung durchzuführen.

Das Magazinkernrohr ermöglicht die untertägige Speicherung einer bestimmten Anzahl kleiner Bohrkerne. Die vierte Alter-

native verzichtet schließlich gänzlich auf die Verwendung eines Innenkernrohrs. Bei diesem "Counter-Flush-Verfahren" wird die Spülung permanent durch den Ringraum nach unten gepumpt. Es wird kontinuierlich gekernt. Gesteinskerne brechen ab und werden mit der im Gestänge aufsteigenden Spülung zutage gefördert.

Bohrtechnische Vorteile von Kernbohrwerkzeugen unter Verwendung des überlagerten Schlagbohr-Prinzips bestehen nach Ansicht vieler Fachleute darin, daß kristallines Gestein durch Aufbringen einer impulsartigen Belastung besonders effektiv zerstört werden kann. Es ist daher durchaus denkbar, nach diesem Prinzip auch kontinuierliche Kernbohrwerkzeuge anzutreiben, wenn geeignete Bohrkronen zur Verfügung stehen.

3.1.2 Antrieb über Bohrstrang und Bohrlochsohlenmotor

Kontinuierliches Kernbohren auf der Basis einer Kombination von Drehtisch- und Motorantrieb wurde bereits im Zusammenhang mit der Darstellung nach Abb. 7 angesprochen. Ein System nach diesem Prinzip wurde von Eastman Christensen GmbH im Rahmen des "Ocean Drilling Projects" als Prototyp gefertigt und ersten Tests unterzogen. Mit der Rollenbohrkrone wird dabei ein Durchmesser von 10 1/2" (267 mm) erbohrt. Als Antrieb des inneren Systems dient ein NAVI-DRILL Mach 3 der Größe 3 3/4".

Anstelle des Verdrängermotors, dessen maximale Einsatztiefe durch die Temperaturbeständigkeit der Statorauskleidung begrenzt wird, kann grundsätzlich auch eine Turbine verwendet werden. In Abwandlung dieses Prinzips könnte aber auch vorgeschlagen werden, den Bohrlochsohlenantrieb in das Außenrohr zu verlegen. In diesem Fall würde sich ein innerer Bohrstrang durch die hohlgebohrte Welle des Motors in Richtung der Sohle des Pilotbohrlochs verschieben (Abb. 8). Dabei bleibt der Vorortantrieb stationär auf der Sohle des Bohrlochs mit großem Durchmesser und treibt von dort den ziehbaren Seilkernstrang an. Die Turbine verbleibt auf der Sohle des großen Bohrlochs, wenn der dünne Bergbaustrang zur Kerntrennung mit dem Seil ausgebaut wird. Nachdem ein Teufenabschnitt von bis zu mehreren hundert Metern mit der Pilotgarnitur abgebohrt worden ist, muß das Bohrloch auf den vollen Durchmesser erweitert werden. Dazu wird das äußere Gestänge nach Einwerfen eines Führungsmeißels mit der am unteren Strangende angebrachten Rollenkrone rotiert.

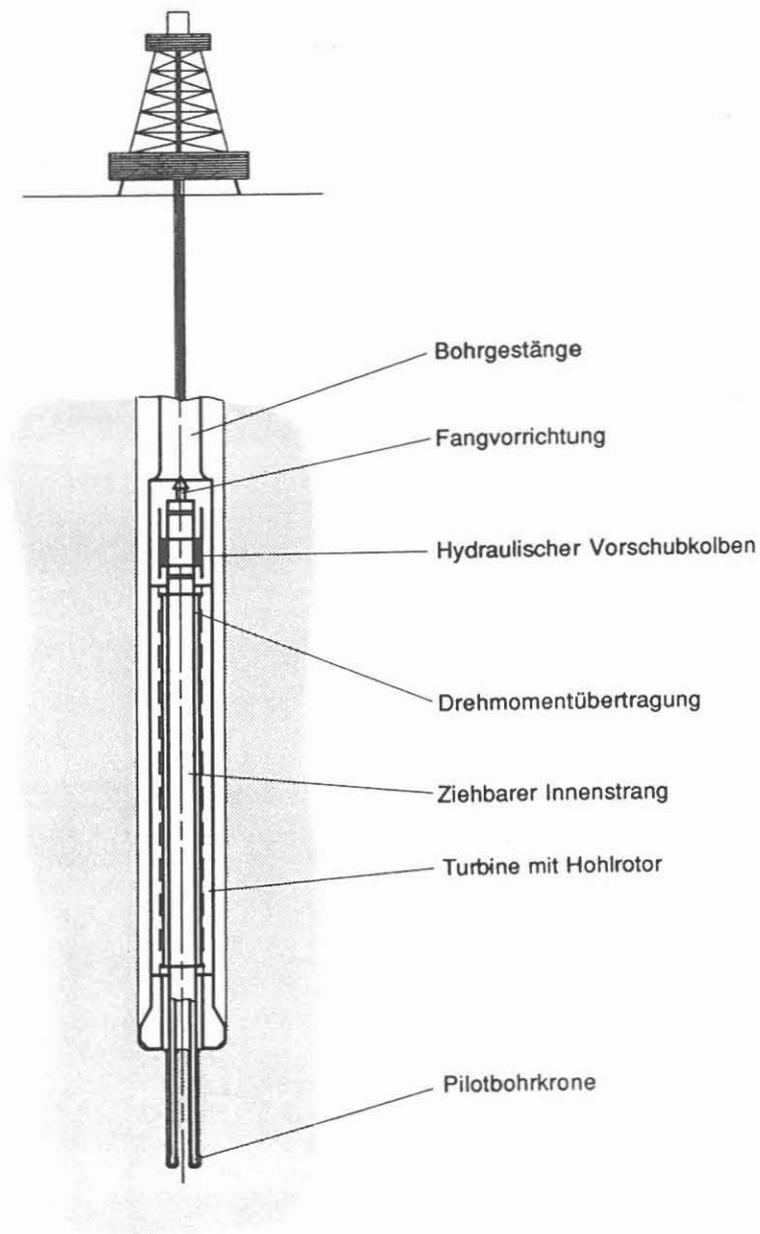


Abb. 8: Pilot-Kernen durch Turbine mit Hohlrotor

3.1.3 Antrieb über Bohrlochsohlenmotor

In großer Teufe der KTB-Bohrung ist damit zu rechnen, daß ein Antrieb des Bohrwerkzeugs von Übertage wegen zu großer Bohrlochreibung Schwierigkeiten bereiten wird. Dann wird auch für Kerneinsätze, speziell für kontinuierliches Kernen, die

ausschließliche Verwendung eines Bohrlochsohlenantriebs erforderlich. Um einen kontinuierlichen Kerngewinn realisieren zu können, muß der Kernbehälter durch das Innenteil des Motors gezogen werden können.

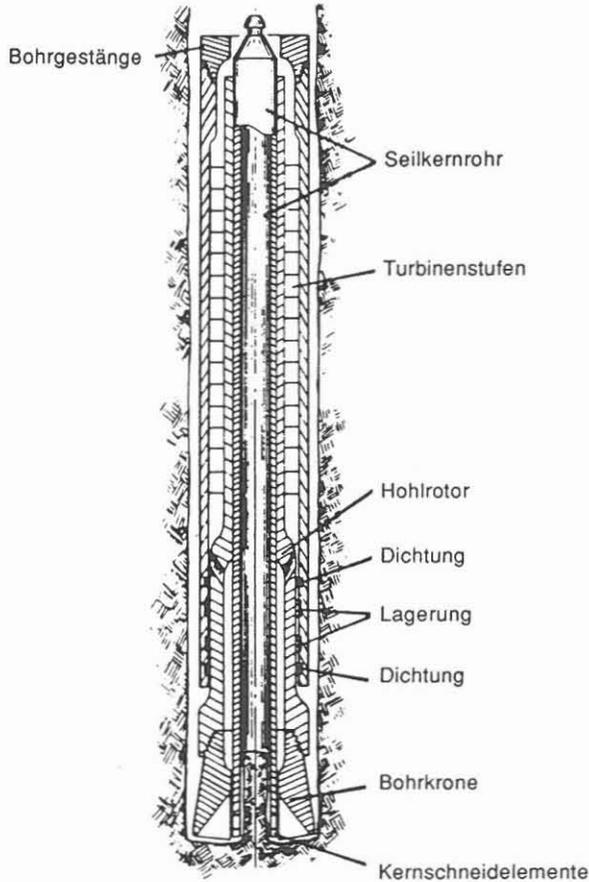


Abb. 9: Bohrturbine mit ziehbarem Innenrohr, nach Lit 3

In Abb. 9 wird beispielhaft die Realisierung dieses Prinzips unter Verwendung einer Turbine als Meißelantrieb aufgezeigt. Um ein möglichst ungestörtes Einwachsen des Kerns in das im Turbinenrotor eingehängte Innenrohr zu unterstützen, ist das Innenrohr gegen Mitdrehen zu sichern. Dies geschieht bei modernen Doppelkernrohren durch eine Wälzlagerung des Innenrohrs. Bei Systemen für diskontinuierlichen Kerngewinn ist bei Eastman Christensen bereits ein anderer Weg beschritten worden. Dazu wird der stillstehende Bohrstrang mit dem Innenteil des Motors verbunden. Es ist auch drehfest an das Innenkernrohr angeschlossen, so daß hier eine drehende Relativbewegung gegenüber dem Kern auszuschließen ist.

Um ein Zutagefördern des Kerns ohne Ausbau des Bohrgestänges realisieren zu können, muß das Innenrohr ziehbar bzw. pumpbar

ausgeführt sein. In der Darstellung nach Abb. 10 ist ein optimiertes System schematisch dargestellt, das die Merkmale

- o Vorortantrieb direkt über Bohrkrone
- o Innenrohr drehfest mit Strang verbunden
- o Innenrohr ziehbar im Strang

gleichzeitig aufweist. Wegen des für den Einbaumechanismus erforderlichen Bauraums muß der Kerndurchmesser gegenüber einer nicht ziehbaren Version reduziert werden. Da die Lippenbreite der Krone entsprechend vergrößert werden muß, wird das Leistungsverhalten prinzipiell verschlechtert.

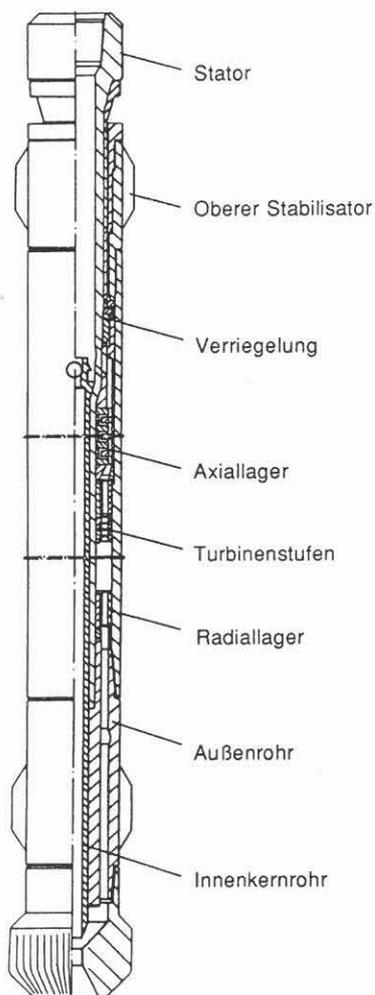


Abb. 10: Turbinen-Kernbohrmotor mit stationärem Innenteil, rotierendem Außenteil und ziehbarem Innenrohr

Entsprechend der Systematik in Abb. 5 ist eine Modifikation des oben beschriebenen Kernbohrprinzips denkbar, bei der eine zweite Krone innerhalb der äußeren Krone läuft und den Kern für das Kernrohr schneidet. Die Krone ist über ein Planetengetriebe mit dem Außenrohr so verbunden, daß sie eine höhere Drehzahl aufweist als die für das Erbohren des Lochdurchmessers verantwortliche Krone. Auf diese Weise kann eine Optimierung des Kerngewinns dadurch angestrebt werden, daß der bei einteiligen Kronen unvermeidliche Effekt der zur Bohrlochmitte reduzierten Umfangsgeschwindigkeit aufgehoben wird. Ein Nachteil dieses Antriebsprinzips besteht darin, daß für die Ankopplung des Innensystems eine recht aufwendige Mechanik erforderlich ist.

3.1.4 Antrieb über zwei Bohrlochsohlenmotore

Der Antrieb der Bohrkrone durch einen Vorortmotor bei gleichzeitig ziebarem Innenrohr wurde in Abschnitt 3.1.3 ausführlich erörtert. Als wesentliche Vorteile eines Pilotkernsystems mit Motorantrieb sind eine Verbesserung von Kerngewinn und Kernqualität anzuführen. Zum Erweitern des Bohrlochs auf den erforderlichen Durchmesser muß dann anschließend der Strang von Übertage rotiert werden. Es ist zu erwarten, daß dies insbesondere in großen Teufen Schwierigkeiten bereiten wird.

Als Abhilfe ist zu erwägen, diesen Außenantrieb ebenfalls durch einen Untertagemotor zu erzeugen. Solange das innere System voreilend in Betrieb ist, dreht das äußere System nicht. Nach dem Ziehen des Innensystems wird mit dem äußeren System das Bohrloch auf den Nenndurchmesser erweitert.

In Abwandlung dieser Konfiguration könnte auch auf die voreilende Funktion des Innenkernrohrs verzichtet werden. Bei Beaufschlagung beider Antriebssysteme mit Spülung würde der große Bohrlochdurchmesser kontinuierlich weiter abgeteuft. Gleichzeitig könnte aufgrund des abgekoppelten Innensystems der Kerngewinn unter optimalen Bedingungen erfolgen.

3.2 Systeme zum Seitenkernen

Im Rahmen der Darstellung des Standes der Technik in Abschnitt 2.2.2 wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Systeme

- o EC-ITE mit Moineau-Motor über eingebaute Schräge
- o Gearhart-Hard Rock-Coring Tool mit 90°-Kernen
- o Schlumberger Diamond Core Slicer mit Diamantsägeblättern

am ehesten Aussichten auf eine erfolgreiche Anpassung an die Anforderungen zum Seitenkernen im harten Kristallin der KTB-Hauptbohrung bieten. Zwar weist das in Zusammenarbeit zwischen Eastman Christensen und Statoil bis zum ersten Prototyp-Stadium entwickelte Seitenkerngerät in einigen Bereichen Vorteile gegenüber allen anderen Systemen auf. Es ist aber fraglich, ob der entsprechende Entwicklungsaufwand für den möglichen Einsatz in der KTB-HB unter wirtschaftlichen Aspekten gerechtfertigt werden könnte.

Die Systeme von Gearhart und Schlumberger werden elektrisch über Kabel von der Oberfläche angetrieben. In größeren Tiefen nimmt daher der kontinuierliche Leitungswiderstand sehr stark zu, so daß sehr hohe Spannungen zur Verfügung gestellt werden müssen. Die Abmessungen der mit dem Gearhart-Werkzeug gewonnenen Bohrkern sind mit $D = 24 \text{ mm}$ und $l = 44 \text{ mm}$, entsprechend einem Gesteinsvolumen von 20 cm^3 , relativ gering. Die Auswertung der mit dem Gesteinssägeverfahren gewonnenen Kerne weist aufgrund der ungewöhnlichen Probenform einige Nachteile auf.

Insgesamt erscheint es vielversprechend, neben dem versuchsweisen Einsatz des kommerziell erhältlichen Gearhart-Werkzeugs, Entwicklungsarbeit an einem System zu leisten, das sich möglichst gut in die für den Einsatz in der KTB-HB vorgesehenen Bohrsysteme integrieren läßt. Insbesondere sollte es sich um Werkzeuge handeln, die von der Bohrspülung untertage direkt an der Wirkstelle angetrieben werden.

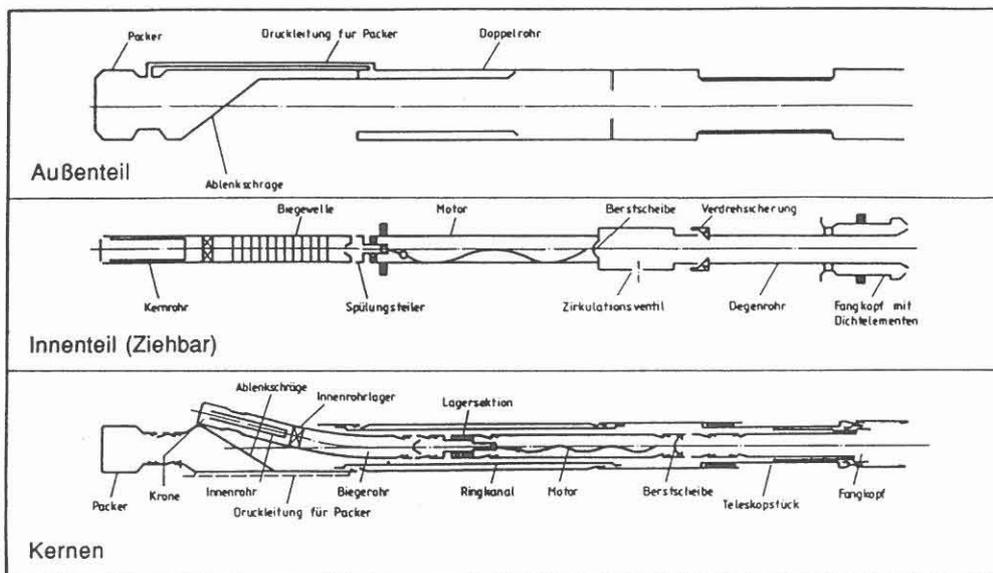


Abb. 11: Im Laboratorium getestetes Prinzip eines Seitenkernbohrgerätes mit Ablenkschräge und Spülmotor (EC/ITE)

Dabei stellt das in Abb. 11 dargestellte Werkzeug nur eine mögliche Ausbildungsform einer Anordnung dar, die aus den wesentlichen Elementen

- o Ablenkschräge als Bestandteil des Bohrstrangs
- o Ziehbare Kombination von Diamantkrone, Kernrohr und Motor
- o Packer zur Festlegung im Bohrloch

besteht.

Der dargestellte Prototyp wurde im Rahmen des BMFT-Entwicklungsprojektes O3E-3001-A vom Institut für Tiefbohrtechnik der TU Clausthal und Eastman Christensen GmbH entwickelt. Schwachstellen bestehen z. Zt. insbesondere im Bereich der Anbohrschräge, der elastischen oder gelenkigen Welle sowie der Temperaturstabilität des Packers. Die Temperaturgrenze des Stator-Elastomers wird erst später erreicht, weil der Stator nur im Spülstrom betrieben wird und daher nicht der tatsächlichen Bohrlochsohlentemperatur ausgesetzt ist. Alternativen zum bestehenden Konzept beinhalten die Möglichkeit, den Antriebsmotor, der auch als Turbine ausgeführt werden kann, in den Bohrstrang zu integrieren. Am Seil wird dann nur das Kernrohr mit Krone herabgelassen. In einer weiteren Lösung könnten Motor, Kernrohr, Krone und Anbohrschräge untertage als Einheit zusammengestellt und im Bohrstrang abgesetzt werden.

4. REALISTISCHES KONZEPT ZUR ENTWICKLUNG VON KERNBOHRSYSTEMEN

Die Analyse vom gegenwärtigem technischen Stand der Kernbohrsysteme, den zu erwartenden Umgebungsbedingungen in der Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland sowie der Anforderungen an den Kerngewinn führt auf eine Reihe von Lösungsansätzen zur Entwicklung optimal geeigneter Systeme.

Eine Klassifizierung solcher Teilziele kann u. a. nach der Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Teufen erfolgen. Einige der zu erwartenden Probleme im oberen Bereich bis 6000 m Teufe sind in Tab. 6 genannt.

- o Spülungsverluste im klüftigen Gebirge
- o Kernverklümmungen
- o Bohrlochversatz
- o Bohrlochsohlentemperatur bis 150°C
- o Festwerden durch Nachfall aus gebrochenen Zonen
- o Hoher Kronenverschleiß und geringe Standlänge
- o Schwierigkeiten beim Abreißen des Kerns im kompakten Gebirge
- o Kernverlust auf Sohle, d. h., Kern bleibt zum Teil auf Sohle stehen

Tab. 6: Erwartete Probleme beim Kernem im Teufenbereich zwischen 3000 m und 6000 m

Im mittleren Bereich der hier vorgenommenen Einteilung, von 6000 bis 10000 m, sind u. a. folgende zusätzliche Schwierigkeiten zu erwarten.

- o Erhöhte Bohrlochtemperatur von bis zu 235°C
- o Scheibenbildung (Core Disking) des Bohrkerns infolge Spannungsverhältnisse
- o Sedimentation des Bohrkleins im unteren Bohrlochbereich bei niedrigem Spülgewicht
- o Erhebliche Reibung zwischen Bohrlochwand und rotierendem Strang, insbesondere bei Hinterschneidungen im Bohrlochverlauf
- o Beschädigung der Bohrlochwand durch Ein- und Ausfahren des Gestänges
- o Überschreitung der Teufengrenze konventioneller Drahtseile für Wireline-Systeme
- o Abtasten der Sohle, Kontrolle des WOB sowie die gesamte obertägige Steuerung aufgrund der erheblichen Stranglänge wesentlich erschwert.

Tab. 7: Zusätzliche Probleme beim Kernem im Teufenbereich zwischen 6000 m und 10000 m

Für den letzten Teufenabschnitt der geplanten übertiefen Bohrung bis 14000 m treten noch zusätzliche prinzipielle Schwierigkeiten auf. Bezüglich der kernbohrtechnischen Realisierung dieser Phase wird eine Reduzierung des Bohrl Lochdurchmessers auf 8 1/2" großen Einfluß auf die Auswahl möglicher Systeme nehmen. Folgende kritische Parameter sind

für diese Sektion zusätzlich zu erwarten.

- o Erhöhte Bohrlochtemperatur von bis zu 330°C
- o Kernverklemmung, Bohrfortschritt, WOB und Bohrlochrichtung können ohne Telemetrie-Systeme nicht mehr kontrolliert werden
- o Kernen mit Drehtischantrieb nicht mehr möglich
- o Bohrkleinaustrag im Ringraum des oberen Bohrlochbereiches nicht mehr gewährleistet, wenn übliche Pump-raten für kleine Ringquerschnitte im Kernrohrbereich angewandt werden
- o Aufgrund der außerordentlich großen Spannungsdiffe-renzen auf Bohrlochsohle erfolgt eine Zertrümmerung des abgebohrten Gesteins vor dem Eindringen in das Kernrohr

Tab. 8: Zusätzliche Probleme beim Kernen im Teufenbereich zwischen 10000 m und 14000 m

Anzuwendende Kernbohrtechniken in den hier grob eingeteilten Teufenabschnitten müssen die genannten Schwierigkeiten berücksichtigen. Alle Erfahrungen der Vergangenheit haben gezeigt, daß mehrere Alternativen für Kernbohrsysteme den Vorteil bieten, bei Versagen eines Gerätetyps auf ein alternatives Konzept ausweichen zu können. Sinnvollerweise sollten dabei, falls irgend möglich, sowohl Systeme auf der Basis bewährter Komponenten als auch gänzlich neuartige Techniken berücksichtigt werden. Angesichts eines als beschränkt anzusehenden Zeit- und Finanzrahmens wird es jedoch als notwendig erachtet, für das vorzuschlagende Entwicklungsprojekt eine klare Schwerpunktbildung vorzunehmen.

4.1 Systeme zum kontinuierlichen Vorwärtskernen

Systeme zum Vorwärtskernen werden aus mehreren Gründen umfangsmäßig im Vordergrund der Entwicklung stehen. Sie bieten im Vergleich zu Seitenkernsystemen folgende prinzipielle Vorteile:

- o Gleichzeitige weitere Vertiefung des Bohrlochs beim Kernen
- o Möglichkeit zum Gewinnen ausgedehnter Gesteinskerne von z. B. 6 oder 9 m Länge während eines Kernmarsches
- o Relativ großer Durchmesser des Gesteinskerns

- o Möglichkeit zur Adaptierung umfangreicher Erfahrungen aus dem Spot-Kernen im Sedimentärgestein bei der Erdöl-Erdgas-Exploration sowie von kontinuierlich kernenden Systemen der Berg- und Flachbohrtechnik
- o Relativ günstige Voraussetzungen zur Gewinnung orientierter Kerne

Kontinuierlich arbeitende Systeme haben aus mehreren Gründen eine höhere Priorität als diskontinuierliche Verfahren.

- o Höhere Gesamtwirtschaftlichkeit durch Zutagefördern des Bohrkerns ohne Strangausbau
- o Einsparungen zusätzlicher Roundtrips bei den zu erwartenden Kernverklemmern
- o Integration von Kabelmeßverfahren oder am Kabel einfahrbarer Meßsysteme in das Kernrohrsystem
- o Anwendbarkeit spezieller ziehbarer Innenkernsysteme zur Optimierung der Kernqualität

Angesichts der in großen Teufen des Kristallin zu erwartenden rauen Umgebungsbedingungen muß grundsätzlich großer Wert auf eine robuste und wenig störanfällige Ausführung der Systeme gelegt werden.

4.1.1 Grundannahmen für Entwicklungssysteme

Auf der Basis der bisher zusammengestellten Erkenntnisse werden einige Grundannahmen getroffen, die zur Festlegung eines vorgeschlagenen Entwicklungsprojekts führen.

- o Rollenbohrwerkzeuge mit Hartmetallstiften ermöglichen einen guten Bohrfortschritt.
- o Die Lebensdauer von Rollenbohrkronen ist wesentlich verbessert worden und bietet die Möglichkeit für weitere Fortschritte.
- o Diamantbohrwerkzeuge bilden eine wesentliche Voraussetzung für Kerngewinn und Kernqualität.
- o Rollenwerkzeuge müssen mit langsamen Drehzahlen ($n < 120$ 1/min) und Diamantbohrwerkzeuge sollten mit hohen Schnittgeschwindigkeiten ($v = 2 - 4$ m/s) betrieben werden.
- o Für den Transport des Kerns bzw. des Kernauffangbehälters wird ein Seil verwendet.
- o Mit zunehmender Teufe wird der Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren aus verschiedenen Gründen interessanter
- o Verdrängermotoren auf Basis des Moineau-Prinzips können aus Gründen der Temperaturbeständigkeit nur bis zu einer kritischen Teufe eingesetzt werden. Die kritische Teufe kann zu größeren Werten hin verschoben werden, wenn der Motor nur im Inneren des Stranges unter der Einwirkung der zugeführten Spülung eingesetzt wird.

- o Der im Bereich des 10 5/8"-Bohrlochs eingesetzte Bohrstrang besitzt einen freien Innendurchmesser von mindestens 4" (101,6 mm).

Weiterhin ist eine unverzichtbare Forderung jeder Entwicklungsarbeit an kontinuierlichen Kernbohrwerkzeugen, daß durch ständigen Informationsaustausch mit allen Beteiligten eine vollständige Kompatibilität zu den übrigen Komponenten, wie Bohranlage, Bohrstrang usw. sichergestellt ist.

4.1.2 Vorgeschlagene Entwicklungsarbeit

Das vorzuschlagende Entwicklungsprojekt beinhaltet nicht Verbesserungsarbeiten an diskontinuierlichen Kernbohrsystemen, die möglicherweise im Rahmen der Bohrarbeiten als erforderlich anzusehen sind. Es wird auch nicht eingegangen auf anzustrebende Entwicklungen zur Erhöhung der Standlänge und Steigerung des Bohrfortschritts bei Diamant- und Rollenbohrkronen.

Als Grundvoraussetzung für die effektive Anwendbarkeit von Kernbohrsystemen, die einen Kerngewinn ohne Ausbau des Stranges ermöglichen, ist ein möglichst großer freier Innendurchmesser des Bohrgestänges zu nennen.

Das Entwicklungskonzept konzentriert sich entsprechend der Bohrlochplanung nach Abb. 1 zunächst auf die Sektion mit 10 5/8" Durchmesser. Nach der vorliegenden Planung ist dafür der Teufenbereich von 5000 bis 10000 m vorgesehen. Eine weitere Vertiefung mit diesem Durchmesser würde erfolgen, falls dies technisch möglich ist. Als Planungsvorgabe für die Auslegung kontinuierlicher Kernbohrsysteme kann in diesem Bereich ein kleinster Innendurchmesser von 4" (101,6 mm) vorausgesetzt werden.

Zum Transport des Bohrkerns von Sohle zur Oberfläche wird die Verwendung eines Seiles vorgesehen. Systeme mit umgekehrter Spülungsrichtung sind nämlich als fragwürdig anzusehen, weil Spülungsverluste in der Formation die Funktion stören können. Außerdem können durch die Einleitung der mit Bohrklein beladenen Spülung Probleme im Innenraum des Bohrstrangs auftreten. Herkömmliche Drahtseile konstanten Durchschnichts weisen nicht die für das Erreichen der Endteufe erforderliche Fertigkeit auf. Es wird daher erforderlich, ein neuartiges Konzept für das Seil zu entwickeln. Denkbare Lösungsansätze beinhalten entweder die Nutzung alternativer Werkstoffe, z.B. hochfester Kunststoffe, oder den Aufbau eines abgesetzten Stahlseils mit reduziertem Querschnitt. Den Vorteilen außerordentlich niedrigen Gewichts und hoher mechanischer Festigkeit des Kunststoffs, z. B. Kevlar (Fa. DuPont), steht als Nachteil eine kritische Temperaturfestigkeit gegenüber.

Bei der Auslegung eines neuen Seils sollte in jedem Fall die Möglichkeit berücksichtigt werden, einen elektrischen Leiter für Datenübertragungszwecke zu integrieren.

4.1.2.1 Kernbohrwerkzeuge für 10 5/8"-Bohrlochdurchmesser

Aufgrund der Effektivität des Gesteinszerstörungsprozesses im Kristallin wird die Rollenbohrkrone zunächst das Werkzeug erster Wahl in diesem Bohrlochbereich darstellen. Erfahrungen, wenn auch aus geringeren Teufen, konnten bereits in der KTB-Vorbohrung gewonnen werden. Die bisher bekannt gewordenen Ergebnisse aus der Gravberg 1-Bohrung in Schweden machen jedoch auch deutlich, daß bezüglich der mit solchen Systemen in großen Teufen erzielbaren Kernqualität Vorbehalte angebracht sind.

Es wird vorgeschlagen, auf der Basis der Rollenbohrkrone ein stufenweise ausbaufähiges System entsprechend der Darstellung in Tab. 9 zu entwickeln, das auch die anerkannt gute Qualität des Diamantkernprozesses integriert.

- o Kernrohr mit Rollenbohrkrone 10 5/8" x 3 1/4" Innenrohr mit Außendurchmesser < 100 mm durch Gestänge am Seil ziehbar, Antrieb von Übertage
- o Kernrohr mit Rollenbohrkrone 10 5/8" wird von Übertage angetrieben; am Seil ziehbare voreilende Innenkernbohrgarnitur aus Diamantkrone 100 mm x 61 mm, Bergbau-Kernrohr HWD 4 und modifiziertem 3 3/4"-Moineau-Motor
- o System wie oben beschrieben, jedoch Innenkernbohrgarnitur für Richtbohrarbeiten im Winkel zur Werkzeugachse voreilend
- o Kernrohr mit Rollenbohrkrone 10 5/8" x 3 1/4" wird über Verdrängermotor 8 1/2" angetrieben, Innenkernrohr mit Motorwelle am Seil ziehbar

Tab. 9: Kontinuierliches Kernbohrsystem für Rollenbohrkrone im 10 5/8"-Bohrlochbereich

In der Basisausführung wird das Doppelkernrohr für Rollenkronen so modifiziert, daß das Innenrohr nach Art der im Bergbau eingeführten Diamant-Seilkernbohrtechnik ohne Strangausbau zutage gefördert werden kann. Die Anwendbarkeit dieses Systems kann einerseits dadurch begrenzt werden, daß der Kerngewinn zu schlecht ausfällt. Die Verwendung eines Doppelkernrohrs mit Diamantkrone und ziehbarem Innenrohr

sollte dann erwogen werden. Bisherige Erfahrungen lassen jedoch nur schwache Bohrleistungen erwarten. Hier besteht nun die Möglichkeit, ein voreilendes Diamantkernbohrsystem in ziehbarer Ausführung im Kernrohr mit Rollenbohrkrone einzusetzen, um die Vorteile beider Schneidprinzipien zu nutzen. Ein solches System könnte prinzipiell in modifizierter Form auch dazu verwendet werden, während des Kernens eine erwünschte Abweichung von der Bohrlochrichtung zu erbohren.

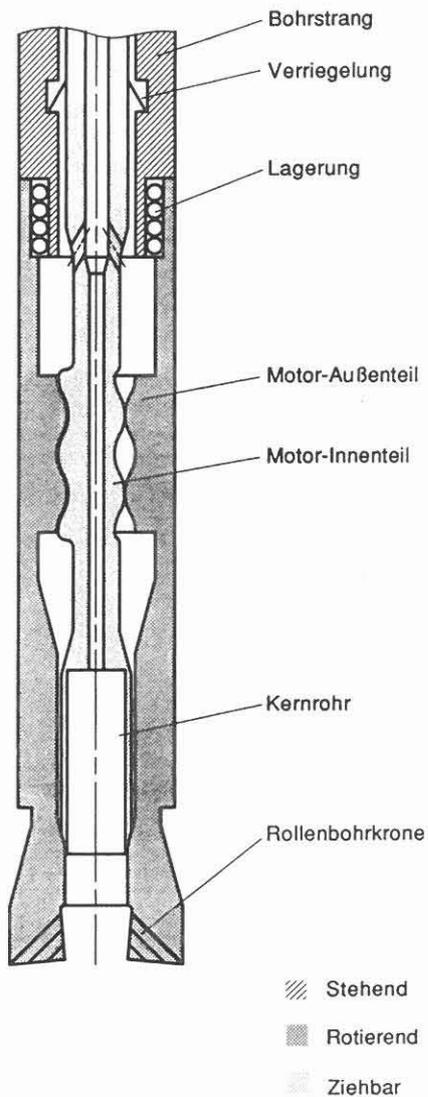


Abb. 12: Motor-Kernsystem mit ziehbarer Welle am Innenrohr

Wenn in größeren Teufen zur Reduzierung des Verschleißes an Gestänge und Bohrlochwand nur noch mit geringer Drehzahl rotiert werden soll, bietet sich der Einsatz eines Bohrlochsohlenantriebs an. Die vorgeschlagene Lösung sieht vor, daß ein Verdrängermotor mit niedriger Drehzahlcharakteristik ein Kernrohr mit ziehbarem Innenrohr antreibt (Abb. 12).

Zum Auswechseln des Kernbehälters wird dieser mit der an der Motorwelle befestigten Fangeinrichtung am Seil zutage gefördert.

Eine Alternative zum Kernem mit Rollenwerkzeugen bildet das Diamantkernem. So kann der Antrieb eines Kernrohrs mit einer Bohrturbine bei relativ hoher Drehzahl erfolgen, was die bekannten Vorteile im Kernprozess erwarten läßt. Tab. 10 zeigt als Vorschlag eine Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten einer solchen Anordnung.

Kernprinzip	- Rotierendes Turbinenaußenrohr mit Diamantbohrkrone, am Seil ziehbares Innenkernrohr in stillstehender Turbinenwelle
Wellenbohrung	- 101,6 m (4") Durchmesser
Bohrkrone	- Diamantwerkzeug 10 5/8" x 3 3/8" (270 x 86 mm)
Kronenlippe	- 92 mm Lippenbreite / 514 cm ² Lippenfläche
Turbine	- 8 1/2"-Turbine mit $n = 887$ 1/min und $T = 2964$ Nm bei $V = 2400$ l/min

Tab. 10: Kontinuierliches Turbinen-Diamantkernsystem für 10 5/8"-Bohrloch

Im Sinne einer möglichst kompakten Bauweise und einer optimal geschützten Kernaufnahme ist ein ziehbares Innenrohr im Inneren des Hohlrotors der Turbine untergebracht. Durch "umgekehrtes" Einbauen der Turbine kann außerdem dafür gesorgt werden, daß die Welle mit dem Strang drehfest verbunden ist und daher stillsteht.

Prinzipiell wäre es auch möglich, durch die Hohlwelle eine Pilot-Kernbohrvorrichtung einzufahren. Eine solche Maßnahme könnte sich aber nur als sinnvoll erweisen, wenn ein Kerngewinn über den vollen Bohrlochdurchmesser aus gesteinsphysikalischen Gründen zu große Probleme bereiten sollte.

Für eine eventuelle Verwendung der Kernbohrturbine mit Rollenwerkzeugen müßte eine deutliche Reduzierung der Drehzahl vorgenommen werden.

4.1.2.2 Kernbohrwerkzeuge für 8 1/2"-Bohrlochdurchmesser

Das vorgeschlagene Konzept zum kontinuierlichen Kernen im 8 1/2"-Durchmesserbereich wird gegenüber dem 10 5/8"- Durchmesser wesentlich durch den deutlich reduzierten Bauraum beeinflusst. So erscheint es nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisierbar, ein Pilotkernsystem in der untersten Schwerstange unterzubringen, das zugleich noch am Seil ziehbar ist. Auch die Verfügbarkeit von Rollen-Bohrkronen mit ausreichender Standlänge und Zuverlässigkeit für diese Bohrlochabmessung gilt noch nicht als gesichert. Weiterhin muß das Prinzip des Meißelantriebs von Übertage bei diesen Teufen als sehr fragwürdig angesehen werden. Andererseits begünstigt der relativ kleine Durchmesser aus technischen und ökonomischen Gründen den Einsatz von Diamantbohrwerkzeugen unter den zu erwartenden Bohrlochbedingungen.

Unter Berücksichtigung aller gegenwärtig bekannten Umgebungsbedingungen wird daher die Entwicklung eines Turbinenkernsystems vorgeschlagen. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen soll es soweit wie möglich aus vorhandenen Komponenten aufgebaut werden. Im hohlgebohrten Rotor einer 7 1/4"- Turbine wird dazu ein ziehbares Innenkernrohr untergebracht. Die wichtigsten Systemparameter zeigt Tab. 11.

Kernprinzip	- Rotierendes Turbinenaußenrohr mit Diamantbohrkrone, am Seil ziehbares Innenkernrohr in stillstehender Turbinenwelle
Bohrkrone	- Diamantwerkzeug 8 1/2" x 1,875" (215,9 x 47,62 mm)
Kronenlippe	- 77 mm Lippenbreite / 307 cm ² Lippenfläche
Turbine	- 7 1/4" Turbine mit n = 790 1/min und T = 3000 Nm im Auslegungspunkt

Tab. 11: Kontinuierliches Turbinenkernsystem für 8 1/2"-Bohrloch

Damit das Innenrohr mit einem größten Durchmesser von 71,4 mm auch den im 8 1/2"-Bereich voraussichtlich abgesetzten Strang durchfahren kann, muß dort ein Innendurchmesser von 3" (76 mm) der engsten Stelle vorgesehen werden. Die Diamantbohrkronen sind in Richtung eines guten Bohrfortschritts und vor allem einer großen Standlänge zu optimieren. Die

Kombination der Elemente

- o Hohe Drehzahl
- o Diamantbohrkrone
- o Integrale Verbindung Motor/Kernrohr

bildet die besten Voraussetzungen für einen guten Kerngewinn in großer Teufe.

4.2 Systeme zum Seitenkernen

Gegenwärtig kommerziell erhältliche Systeme und erkennbare Entwicklungsoptionen wurden bereits an anderer Stelle erörtert. Der Überblick hat gezeigt, daß praktisch ein kommerzielles System (Gearhart) die Möglichkeit zur Durchführung von Seitenkernoperationen im Kristallin bietet. Allerdings sind sowohl die Abmessungen des Kerns als auch die Teufenkapazität begrenzt. Eine Weiterentwicklung dieses Systems wird wegen der prinzipiellen Einschränkungen hinsichtlich des Antriebsmechanismus nicht empfohlen.

Hinsichtlich des Entwicklungspotentials muß dem durch die Bohrlochspülung angetriebenen Bohrlochsohlenmotor mit darunter angebrachtem Kernrohr der Vorzug gegeben werden. Die Kombination aus Diamantkrone, Kernrohr und Motor wird über eine im Bohrstrang angebrachte Schräge (Keil) zum Eindringen in die Bohrlochwand veranlaßt. Als Antrieb kann neben dem Verdrängermotor auch eine stationär oder ziehbar angeordnete Turbine eingesetzt werden, was zu einer erheblichen Ausweitung der u. a. durch die Temperatur beeinflussten Teufenkapazität führen würde. Bei dem von Eastman Christensen GmbH und ITE der TU Clausthal vor einigen Jahren bis zur Laboratoriums-Reife entwickelten Seitenkerngerät (siehe Abschnitt 2.2.2) wird zunächst in einem Außenrohr die Ablenkschräge am Bohrstrang eingebaut und das Motorkernsystem nachfolgend am Seil eingeführt. In Abwandlung dieses Prinzips kann auch der Ablenkkeil zusammen mit dem Kernbohrmotor in das Außenrohr am Seil eingelassen werden.

Wenn die Entscheidung zugunsten der Entwicklung eines Seitenkernsystems mit Ablenkschräge und Spülungsantrieb des Motors getroffen wird, muß noch eine endgültige Festlegung erfolgen, ob der vorhandene Labor-Prototyp weiterentwickelt oder stattdessen mit einem modifizierten Konzept begonnen werden soll.

5. PROJEKTPLANUNG KERNBOHRSYSTEME KTB

Die vorliegende Studie hat u. a. zum Ziel, eine Vorklärung der inhaltlichen Schwerpunkte eines nachfolgend zu bearbeitenden Werkzeug-Entwicklungsprojekts herbeizuführen. Eine endgültige Festlegung auf bestimmte Systeme kann nur nach intensiver Diskussion der in der Studie erarbeiteten Konzepte mit der Projektleitung KTB erfolgen.

5.1 Technische Teilziele

Das Ziel einer Bereitstellung kontinuierlich arbeitender Systeme zum Vorwärtskernen sowie von Seitenkerngeräten für Kristallin-Gestein soll durch Entwicklung verschiedener Komponenten erreicht werden, die in möglichst großem Umfang untereinander kompatibel sind. Der vorgetragene Plan stellt einen Mindestbedarf dar. Es werden aber auch Wege aufgezeigt, wie diese Systeme im Bedarfsfall um zusätzliche Komponenten erweitert werden können. Dazu müßte dann allerdings noch eine zusätzliche Kostenplanung vorgenommen werden. Bei kleinerem Bohrlochdurchmesser als dem genannten werden die Grenzen der technischen Realisierbarkeit kontinuierlicher Systeme überschritten. Es besteht dann nur noch die Möglichkeit, im diskontinuierlichen Betrieb weiter zu arbeiten. Insgesamt werden die in Abb. 13 wie folgt charakterisierten Grundsysteme zur Entwicklung vorgeschlagen.

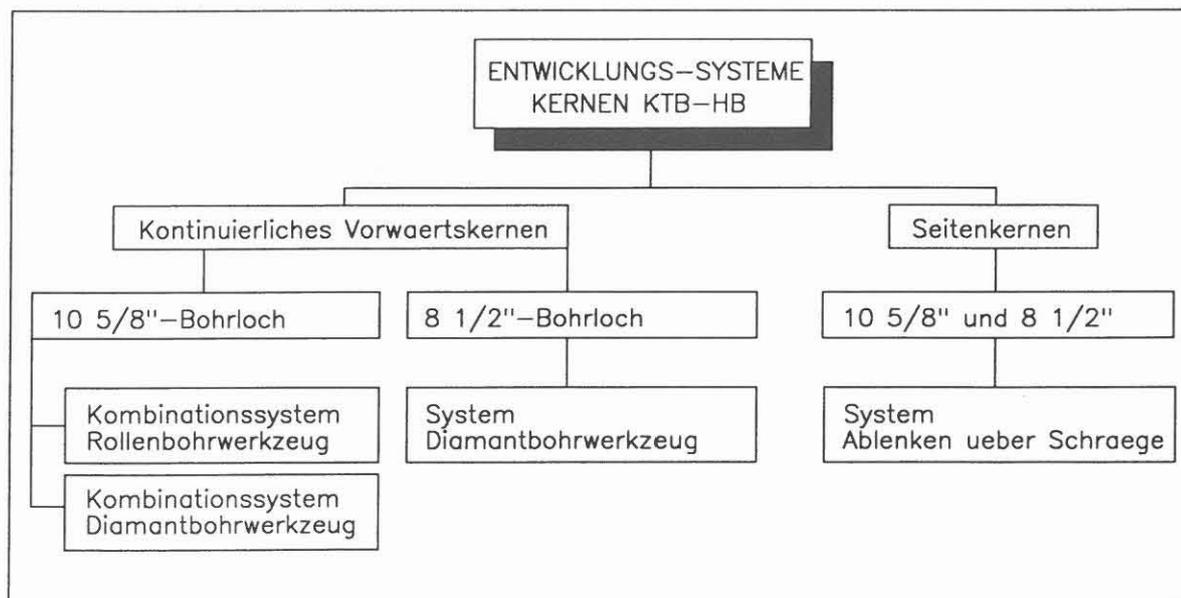


Abb. 13: Kernbohrsysteme für KTB-Hauptbohrung

Lfd.Nr.	Baugruppe	Priorität
1	Seil für Wireline-Arbeiten bis 14000 m Teufe	a
2	Kernrohr mit ziehbarem Innenrohr für RK 10 5/8" x 3 1/4"	a
3	Wie 2, aber RK 10 5/8" x 4" und Pilotkernbohrmotor 3 3/4" (PDM) mit DK 100 x 61 mm	a
4	Wie 3, jedoch 3 3/4"-Turbine	c
5	Wie 3, aber Innenkernbohrsystem für Richtbohrarbeiten über Schräge voreilend	b
6	Wie 2, jedoch Antrieb des Kernrohrs mit PDM	a
7	TURB-Außenrohr mit DK 10 5/8" x 3 3/8", 8 1/2"-Turbine, Innenrohr ziehbar	b
8	Wie 7, jedoch statt ziehbarem Innenrohr Pilotkernbohrmotor 3 3/4"	b
9	Wie 7, jedoch TURB mit Untersetzungsgetriebe und RM	c
10	7 1/4"-TURB mit Hohlrotor und integriertem ziehbarem Innenrohr, DK 8 1/2" x 1.875"	a
11	Seitenkerngerät schräg austreibend mit PDM	a
12	wie 11, jedoch mit stationärer TURB	b

RK :	Rollenbohrkrone
DK :	Diamantbohrkrone
PDM :	Moineau-Verdrängermotor
TURB:	Bohrturbine

Tab. 12: Entwicklungs-Baugruppen

Die in Tab. 12 mit "a" gekennzeichneten Gegenstände sollen Bestandteil eines zentralen Programms zur Entwicklung von kontinuierlichen Vorwärts-Kernsystemen und Seitenkerngeräten sein. Optionen für Erweiterungen dieser Konzepte sind mit "b" und "c" gekennzeichnet. Viele Probleme, die bei Kernarbeiten unter den Bedingungen der übertiefen KTB-HB erwartet werden und im Rahmen dieser Studie auch schon entsprechend betont worden sind, müssen noch technisch gelöst werden. Dies ist im wesentlichen unabhängig davon, ob ein diskontinuierliches oder ein kontinuierliches Kernverfahren betrieben wird. Es muß daher noch einmal ausdrücklich betont werden, daß die vorliegende Projektplanung entsprechend dem Balkendiagramm in Abb. 14 noch keine sichere Lösung der angeschnittenen Zusatzprobleme beinhaltet.

KERNBOHRSYSTEME KTB	1988	1989	1990	1991	1992
(1) System-Anforderungen	▨		▨		▨
(2) HD/HT-Seil	▨				
(3) Kernrohr für RK mit ziehbarem Innenrohr (10 5/8")		▨			
(4) Pilot-Kernbohrmotor für (3)		▨			
(5) PDM-Antrieb für System (3)		▨			
(6) Turbinkernrohr mit integr. Innenrohr (8 1/2"-Bohrloch)			▨		
(7) Seitenkerngerät, schräg austreibend mit PDM		▨			

Abb. 14: Projektplanung Kernbohrsysteme

Zu Beginn der Projektbearbeitungszeit müssen sämtliche Detailanforderungen soweit geklärt werden, wie dies vor dem eigentlichen Bohrbeginn nur irgend möglich ist. Modifikationen zum aufgestellten Konzept werden sich während der eigentlichen Kernarbeiten in der KTB-HB vermutlich nicht vermeiden lassen. Das Vorhandensein eines geeigneten Zugseils ist für die Realisierung aller kontinuierlichen Verfahren von unabdingbarer Bedeutung. Entsprechende Arbeiten

müssen daher zum frühestmöglichen Zeitpunkt begonnen werden. Als erstes System zum kontinuierlichen Kernn soll ein Kernrohr für Rollenmeißel mit ziehbarem Innenrohr bereitgestellt werden, um unmittelbar mit den Kernarbeiten nach Abteufen der oberen Vollbohrstrecke beginnen zu können. Der Entwicklungsaufwand hierfür scheint überschaubar. Besonderes Augenmerk ist u. a. auch auf ein möglichst geschütztes Eindringen des Kerns in das Innenrohr zu richten. Außerdem ist bereits in dieser Phase darauf zu achten, daß das im nächsten Teilziel zu implementierende Pilot-Motorkernsystem entsprechend eingepaßt werden kann. Erste Erfahrungen, allerdings für andere Anwendungen, mit solchen Pilot-Kernsystemen liegen bei Eastman Christensen bereits vor. Entsprechende Ausführungsformen sind inzwischen auch patentrechtlich geschützt (Lit. 9).

Die bisher angesprochenen Systeme basieren noch auf dem Antrieb des Bohrstranges von Übertage. In mittleren bis großen Teufen werden aber häufig Bohrlochsohlenantriebe vorgezogen. Das folgende Teilziel sieht daher vor, für den Untertageantrieb des Kernrohr-Außenteils im 10 5/8"-Bohrloch einen 8 1/2"-Moineau-Motor zu entwickeln, durch den ein Gesteinskern zutage gezogen werden kann.

Für den Bereich des 8 1/2"-Bohrlochs ist aufgrund der hohen Temperatur und des begrenzten Bauraums mit oberster Priorität ein Turbinenkernbohrsystem zu entwickeln. Dabei soll das in die Welle integrierte Kernrohr am Seil ziehbar sein.

Ein wichtiger Anwendungsbereich für Seitenkernsysteme ergibt sich im oberen Teufenabschnitt, zwischen 3000 und 5000 m. Kernoperationen sind hier eigentlich nicht geplant. Zur Überprüfung des in der KTB-Vorbohrung gewonnenen Kenntnisstandes können aber sinnvoll Seitenkerne gezogen werden. Die Entscheidung zwischen den zur Wahl stehenden Systemen mit schräg austreibendem Kernrohr muß noch getroffen werden. Für die Ausführung mit einer Turbine spricht der Umstand, daß damit ein Einsatz in jeder Teufe der KTB-HB möglich ist. Wenn die erforderlichen Turbinenstufen im unteren Teil des Bohrstrangs fest eingebaut sind, muß lediglich nach jeder Seilkernoperation das gefüllte Kernrohr am Seil ausgebaut werden. Im Sinne einer möglichst ausgedehnten Anwendbarkeit sollte das neu zu entwickelnde Gerät sich auch in der 8 1/2"-Sektion im untersten Bohrungsabschnitt einsetzen lassen.

5.2 Kostenplanung

Der Balkenplan nach Abb. 14 berücksichtigt nur die zunächst naheliegenden Entwicklungsschritte für kontinuierliche Kernbohrsysteme. Er beinhaltet weder sinnvolle oder wünschenswerte Ergänzungen bzw. alternative Entwicklungsoptionen, noch bestimmte spezielle Vorrichtungen, die bei kontinuierlichem und auch bei diskontinuierlichem Kernen das Kerneinwachsen in großen Teufen erleichtern sollen.

Unter Zugrundelegung der in Abb. 14 vorgeschlagenen Arbeitsplanung wurde noch eine Abschätzung der Kosten vorgenommen, die für die einzelnen Teilziele nach heutigem Kenntnisstand vorzusehen sind.

	Teilziel	Kosten (TDM)
1	Systemanforderungen	150
2	HD/HT-Wireline	200
3	Kernrohr für 10 5/8", ziehbar	350
4	Pilot-PDM-Kernbohrmotor	800
5	PDM-Außenrohrantrieb für 10 5/8"	1000
6	Turbinen-Kernrohr für 8 1/2"	1500
7	Seitenkerngerät	500
Gesamtprojektkosten		4500

Tab. 13: Kostenübersicht für geplantes Entwicklungsprojekt "Kontinuierliches Kernen", gegliedert nach Teilzielen

Die vorgeschlagenen Kernbohrsysteme sind speziell auf die Anforderungen der übertiefen KTB-Bohrung ausgerichtet. Eine Anwendung für andere Bereiche, außerhalb der KTB, ist zunächst nicht abzusehen. Es ist daher erforderlich, im Rahmen

der Beantragung eines geförderten Projekts einen relativ geringen Eigenanteil für den Antragsteller einzusetzen. Für den Fall, daß andere Systeme, die in Tab. 12 mit "b" bzw. "c" klassifiziert wurden, ersatzweise oder zusätzlich entwickelt werden sollen, können höhere Kosten auftreten.

Generell umfaßt die vorgelegte Kostenplanung die Entwicklungskosten und die Kosten für die Fertigung eines für den Labor- und Feldeinsatz geeigneten Prototyps für jedes der Teilziele. Ausnahmen bilden die Entwicklung des optimierten Seiles und des Seitenkerngerätes. Im Fall des Seiles sollten nur Labortests an kürzeren Seilabschnitten im Zusammenhang mit der Festlegung geeigneter Seileigenschaften vorgenommen werden. Die Anschaffung eines kompletten Seiles, insbesondere im Bereich extremer Teufen, bleibt dem Bohrunternehmen überlassen. Bezüglich des Seitenkerngerätes sind zunächst Vor- und Laboratoriumsuntersuchungen vorgesehen. Nach einer Klärung des Bedarfs und Festlegung auf ein Antriebsprinzip müßte eine separate Prototyp-Fertigung beantragt werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Studie war die Erarbeitung eines Konzeptes für die Entwicklung neuartiger Kernbohrsysteme, die in der Anwendung für die übertiefe KTB-Hauptbohrung einen kontinuierlichen Kerngewinn ermöglichen. In einem zusätzlichen Schwerpunkt wird als Ergänzung der Systeme zum Vorwärtskern auch eine entsprechende Klärung für Werkzeuge zum Seitenkern herbeigeführt.

Dazu ist zunächst festzustellen, daß Kernbohrsysteme, die einen Kerngewinn ohne Ausbau des Gestänges ermöglichen, für den erforderlichen Bohrl Lochdurchmesser gegenwärtig überhaupt nicht existieren. Erfahrungen liegen aus der Seilkerntechnik im Bergbau vor. Einen erschwerenden Parameter bildet die angestrebte extreme Endteufe der KTB-Bohrung. Schließlich müssen die zu erwartenden geophysikalischen Phänomene im Kristallin noch zusätzlich berücksichtigt werden. Zum Erbohren kleiner Kerne aus der Wand eines offenen Bohrlochs ist derzeit nur ein erwähnenswertes kommerzielles Werkzeug erhältlich. Nachteile sind hier jedoch relativ kleine Kernabmessungen, keine vollständige Systemzuverlässigkeit und eine limitierte Teufenkapazität.

Nach der Bewertung der zu erwartenden Einsatzbedingungen und der Zusammenfassung vorliegender Erfahrungen mit Kernbohrarbeiten im Hartgestein werden im Überblick grundsätzliche Entwicklungsmöglichkeiten dargestellt. Schwer-

punkte eines realistischen Konzepts zur Entwicklung im Bereich der 10 5/8"-Sektion bilden Rollenkronen-Kernbohrsysteme ohne und mit Bohrlochsohlenantrieb sowie Hybrid-Systeme, bei denen ein kleineres Kernrohr mit Diamantbohrkrone voreilend im Inneren der untersten Schwerstange eingesetzt wird. Für den im unteren Teil des Bohrlochs vorgesehenen Durchmesser von 8 1/2" konzentriert sich die Entwicklungsempfehlung auf einen Turbinenkernbohrmotor für Diamantkronen mit Hohlwelle zur Aufnahme des Gesteinskerns. Für die Entwicklung von Seitenkernsystemen wird dem Prinzip der Richtungsablenkung eines über eine im Bohrstrang angebrachte Schräge voreilenden Motorwerkzeugs der Vorzug gegenüber komplizierter aufgebauten Systemen gegeben, die senkrecht in die Bohrlochwand eindringen können.

Allen Systemen gemeinsam ist die Verwendung eines Stahl- oder Kunststoffseiles zum Transport des Kerns nach Übertage. Für diese wichtige Systemkomponente sind ebenfalls Entwicklungsaufwendungen vorgesehen. Weiterhin ist allen Systemen die Verwendung der Bohrspülung als Antriebsmedium gemeinsam, soweit nicht der Drehantrieb über das Bohrgestänge vorgenommen wird.

In Form einer konkretisierten Projektplanung werden die Aufwendungen für ein Minimal-Entwicklungsprogramm abgeschätzt, das Aussicht auf Erreichen der geforderten Ziele bietet. Das Programm konzentriert sich streng auf die Entwicklung kontinuierlicher Systeme für den Vorwärts- und Seitenkernbetrieb. Nicht berücksichtigt sind dabei besondere erforderliche Aufwendungen für Untertage-Meßsysteme sowie spezielle mechanisch-hydraulische Systeme, die das Eindringen des Gesteins in das Innenrohr in großen Teufen unterstützen.

Bei der Festlegung der in der Projektplanung genannten Werkzeugtypen wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß dabei möglichst weitgehend vorhandene Kernrohrsysteme und Untertageantriebe berücksichtigt werden können. Erweiterungen des Programms oder Austausch bzw. Modifizierung vieler Teilziele sind jederzeit möglich durch Übernahme der ebenfalls dargestellten Alternativen.

7. LITERATUR

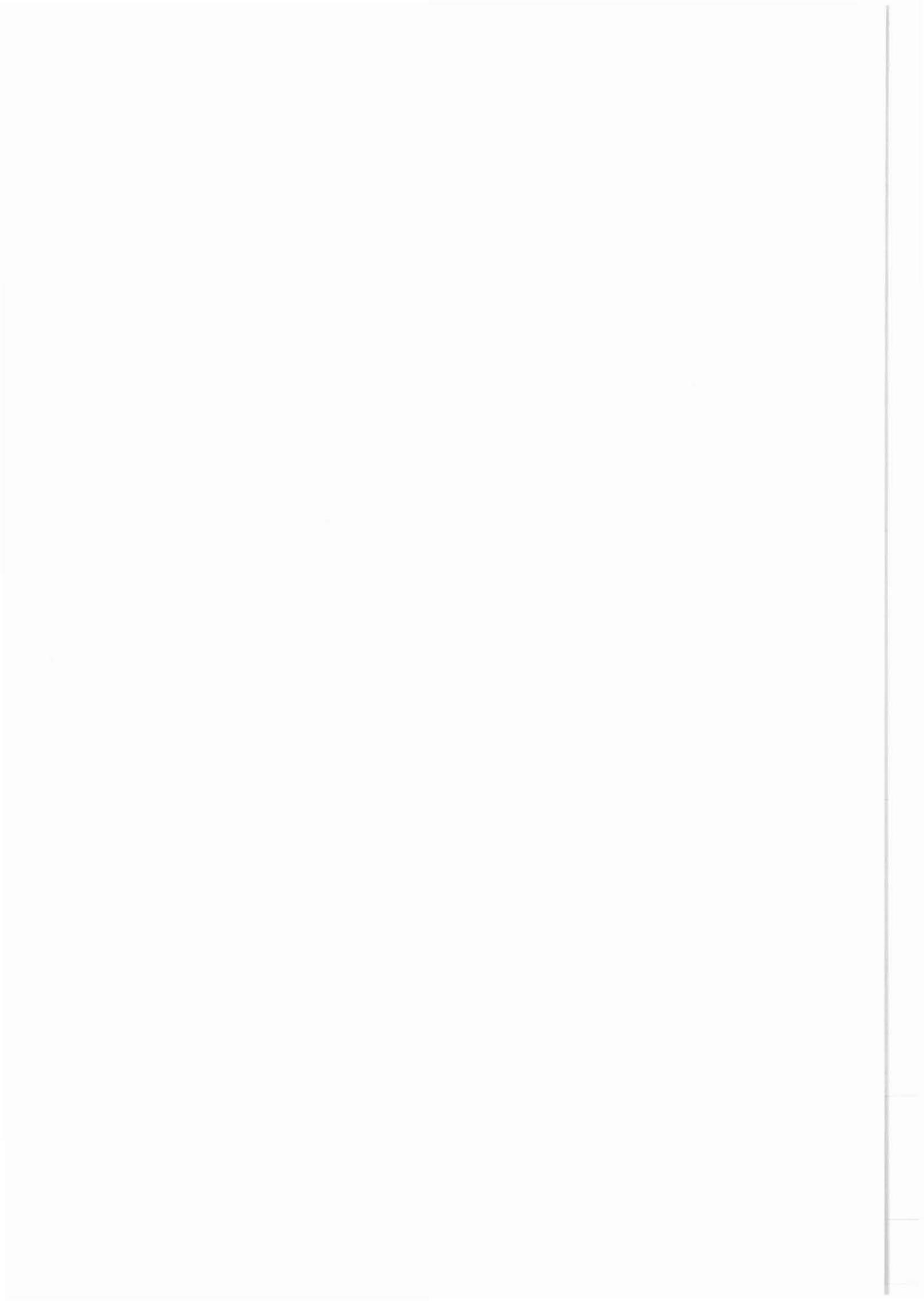
1. Noevig, T. Status report on coring procedures in deep-drilling technology. Project report, Energy research and development programme. Technische Universität Clausthal, 1977
2. Marx, C. and Young, F. Darstellung von Kerngewinnungsverfahren und Bewertung ihrer Einsatzmöglichkeiten in übertiefen Bohrungen, Clausthal, 1983
3. Rowley, J. C. Coring technologies for scientific drilling projects - an overview, Los Alamos National Laboratory, Report No. LA 10485-OBES, 1985
4. Oppelt, J. Studie Vorbohrung KTB-Bergbautechnik, Eastman Christensen GmbH, im Auftrag der KTB-Projektleitung, März 1987
5. Wohlgemuth, L. Persönliche Mitteilung, KTB-Projektleitung, März 1987
6. Kozlovsky, Y. A. The superdeep well of the Kola peninsula, Springer Verlag, 1987 (Original-Ausgabe Moskau, 1984)
7. Maury, V. M. und Sanzay, J.-M. Borehole Instability: Case Histories Rock Mechanics Approach, and Results SPE/ADC Paper No. 16051, March 1987 Drilling Conference, New Orleans, Louisiana
8. Krüger, V. und Daenicke, H. Studie Untertageantriebe, Eastman Christensen GmbH, NLfB, Projekt AZK/15-RG 86040, 1988
9. Ostertag, A. und Biehl, J. DE 3,701,914 "Direktangetriebenes Kernbohrwerkzeug", 24.01.1987, Eastman Christensen

Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Kernbohren im Hartgestein Seitenkerntechnik

Prof. Dr.-Ing. C. Marx
Dipl.-Ing. J. Weltermann



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung.....	185
2. Einleitung.....	185
3. Bedeutung der Gewinnung von Kernen aus der Bohrlochwand.....	186
4. Darstellung der Voraussetzungen für ein leistungsstarkes Kernbohren im Hartgestein.....	186
5. Betrachtung der verfügbaren Seitenkerne- gewinnungsverfahren.....	190
5.1 Eintreibverfahren.....	190
5.1.1 Lochstanzverfahren.....	190
5.1.2 Kernschießverfahren.....	190
5.2 Eindrehverfahren.....	193
5.2.1 Seitenkerngerät der Firma A-1 Bit & Tool Company.....	193
5.2.2 Seitenkernsystem des Instituts für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung....	195
5.2.3 Side Wall Coring Tool der Firma Eastman Christensen.....	201
5.2.4 Seitenkernsystem der Firma Gearhart (Hard Rock Coring Tool).....	201
5.3 Kernsägeverfahren.....	203
6. Bewertung der Seitenkernverfahren.....	205
7. Literaturverzeichnis.....	212



1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Studie wird auf die Bedeutung der Entnahme von Kernen aus der Bohrlochwand als Möglichkeit zur Verringerung der Kosten der Kerngewinnung in großen Teufen und als Beitrag zur Verbesserung des Leistungsbohrprozesses hingewiesen. Nach der grundsätzlichen Darstellung der Voraussetzungen für ein leistungsstarkes Kernbohren im Hartgestein wird ein Überblick über die derzeit verfügbaren Seitenkernsysteme und deren Einsatzmöglichkeiten unter Berücksichtigung der bei der Kontinentalen Tiefbohrung auftretenden Besonderheiten gegeben.

In einer abschließenden Bewertung der einzelnen Verfahren wird ein Vergleich der im Hartgestein einsetzbaren Seitenkernsysteme vorgenommen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, daß eine Weiterentwicklung des Seitenkernverfahrens des Institutes für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung für KTB dringend empfohlen werden kann, da sich dieses System allen anderen betrachteten Verfahren als überlegen erweist.

2 EINLEITUNG

Für Forschungsbohrungen stellt die Bereitstellung von erbohrtem Kernmaterial eine besonders hoch zu bewertende Voraussetzung für die petrographische Beurteilung der durchbohrten Schichten dar. Da das Kernbohren bei den im Rahmen des KTB angestrebten Bohrlochdurchmessern von 8-1/2" bzw. 10-5/8" und Teufen von 12 bis 14 km auf den Bohrmeter bezogen erheblich kostenaufwendiger als das Vollbohrverfahren ist, müssen die Kernbohrstrecken auf ein Minimum begrenzt werden. Für das KTB-Projekt wird angestrebt, 25 % der Gesamtbohrmeter kernend zu bohren.

Die Möglichkeit, auch aus dem im Vollbohrverfahren abgetauften Bohrlochbereich Kernproben zu gewinnen, kann durch Seitenkernverfahren realisiert werden. Für Hartgestein steht diese Technik jedoch nur sehr eingeschränkt zur Verfügung und bedarf einer weiteren Entwicklung /11/.

3 BEDEUTUNG DER GEWINNUNG VON KERNEN AUS DER BOHRLOCHWAND

Seitenkernverfahren werden zur Gewinnung von Kernen aus der Bohrlochwand eines gebohrten, jedoch unverrohrten Bohrloches eingesetzt. Gegenüber den konventionell aus der Bohrlochsohle erbohrten Kernen weisen diese Verfahren wesentliche Vorteile auf:

- Eine Unterbrechung des Leistungsbohrprozesses zum Zwecke des Kernens ist nicht erforderlich
- Nach Erreichen der erforderlichen Teufe können im Bereich des offenen Bohrloches durch Bohrlochmeßverfahren für die Seitenkerngewinnung interessante Teufenabschnitte ermittelt und gezielte Kernentnahmen durchgeführt werden.
- Mehrfache Kerngewinnung bei einem Geräteeinsatz ohne Gestängeaus- und -einbau ist möglich
- Kerngewinn aus Bereichen mit hohen Kernverlusten beim konventionellen Kernen ist möglich

Besondere Probleme ergeben sich beim Seitenkernen aus der Forderung, eine für Analysen ausreichende Kerngröße und Kernqualität zu erhalten. Weiterhin ergeben sich Einsatzgrenzen für einige Systeme, die durch große Teufen und Gesteinhärten bestimmt sind.

4 DARSTELLUNG DER VORAUSSETZUNGEN FÜR EIN LEISTUNGSSTARKES KERNBOHREN IM HARTGESTEIN

Das Bohren in kristallinem Gestein in großen Teufen (10 bis 15 km) mit Bohrlochdurchmessern von 8-1/2" und größer ist für industrielle Anwendungen bisher nicht notwendig gewesen. Aus diesem Grund sind spezielle Bohr- und Kerntechniken für die genannten Einsatzbedingungen nicht entwickelt worden. Für die existierenden Rotary-Kernsysteme in Bohrlöchern mit Durchmessern von 8-1/2" und Hartgestein sind Bohrfortschritte von $v = 0,5$ m/h und Meißelstandzeiten von $S = 10$ m charakteristisch. Hier sind deutliche Leistungseinbußen gegenüber dem Kernen in Sedimentgestein festzustellen. Kernmenge und Qualität der Kernbeschaffenheit nehmen ebenfalls ab /11/.

Die Weiterentwicklung bestehender Systeme ist unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und technologischer Gesichts-

punkte notwendig. So sollten für die geplanten Teufen Kernsysteme mit Wireline-Technik eingesetzt werden, um zeitraubende und die Bohrleistung mindernde Roundtrips zu vermeiden. Die Meißelstandzeiten sollen 30 m, d.h. etwa das dreifache heute möglicher Kernlängen von 9 m, betragen /11/.

Einen wichtigen Einfluß auf die Leistung des Kerngewinnungsprozesses hat das Verhältnis R von Außendurchmesser des Meißels zum Kerndurchmesser. Große Verhältnisse von R, d.h. dicklippige Bohrkronen, verursachen beim Kernen in Hartgestein mehr Probleme als der Einsatz von dünnlippigen Kronen /14/.

In diesem Zusammenhang hat sich ein kleiner Bohrlochdurchmesser von 50 bis 75 mm als günstig in kristallinem Gestein erwiesen /11/. So werden in der Bergbauindustrie mit imprägnierten Diamantbohrkronen im Hartgestein durchschnittliche Bohrgeschwindigkeiten von $v = 6$ m/h und Kronenstandzeiten von $S=60$ m erreicht. Wie aus Abbildung 1 zu erkennen ist, liegen die geometrischen Verhältnisse in anderen Bereichen vergleichsweise höher als in der Bergbauindustrie.

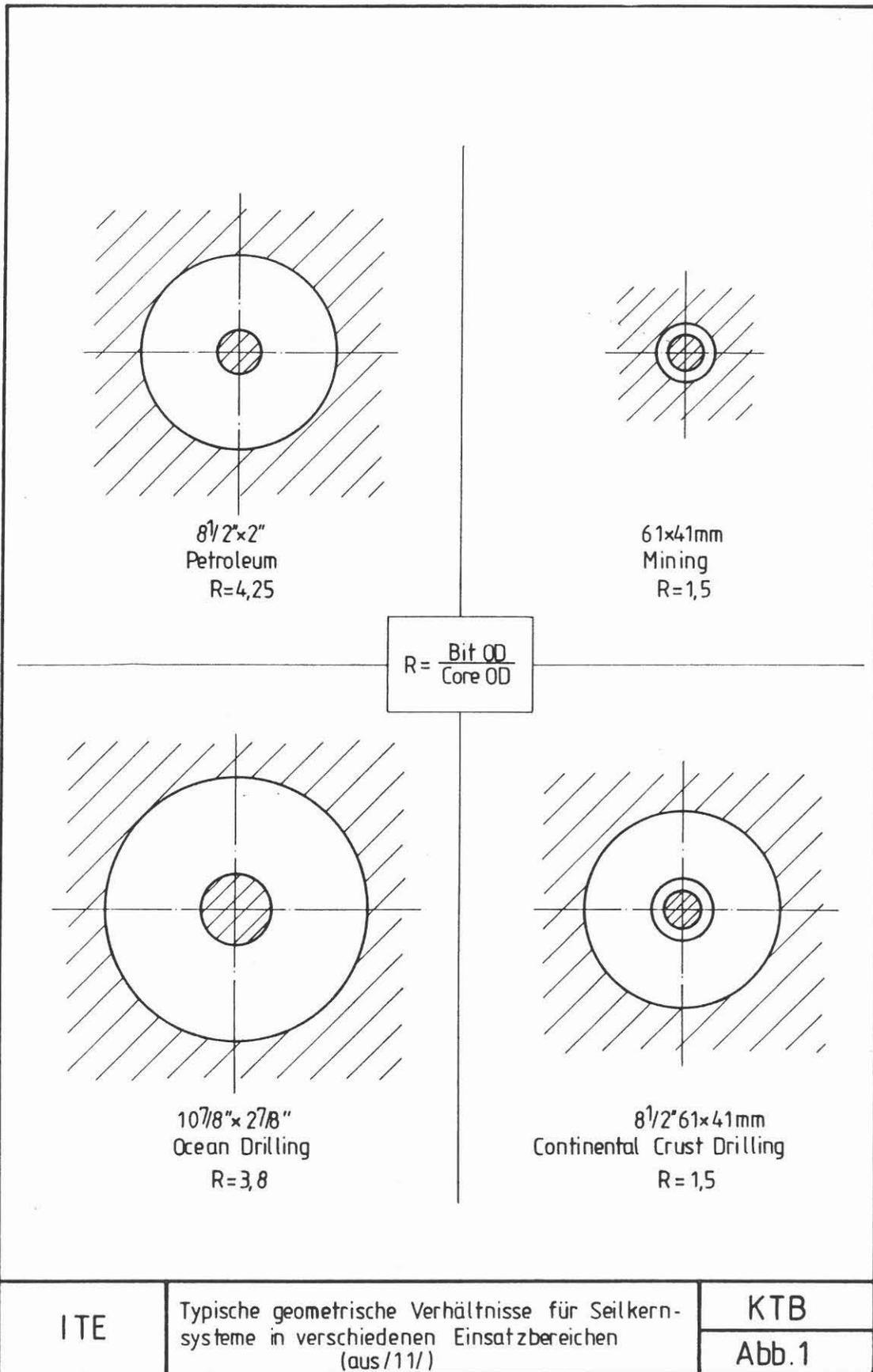
Diese Erfahrungen haben sich in der Schürfb Bohrtechnik beim Diamec-Verfahren bestätigt, welches im harten Gebirge Anwendung findet. Es werden Kronen mit schmaler Lippenbreite und imprägnierter Körnung gegenüber breiten Lippen mit gesetzten Diamanten beim Wireline-System eingesetzt. /2/.

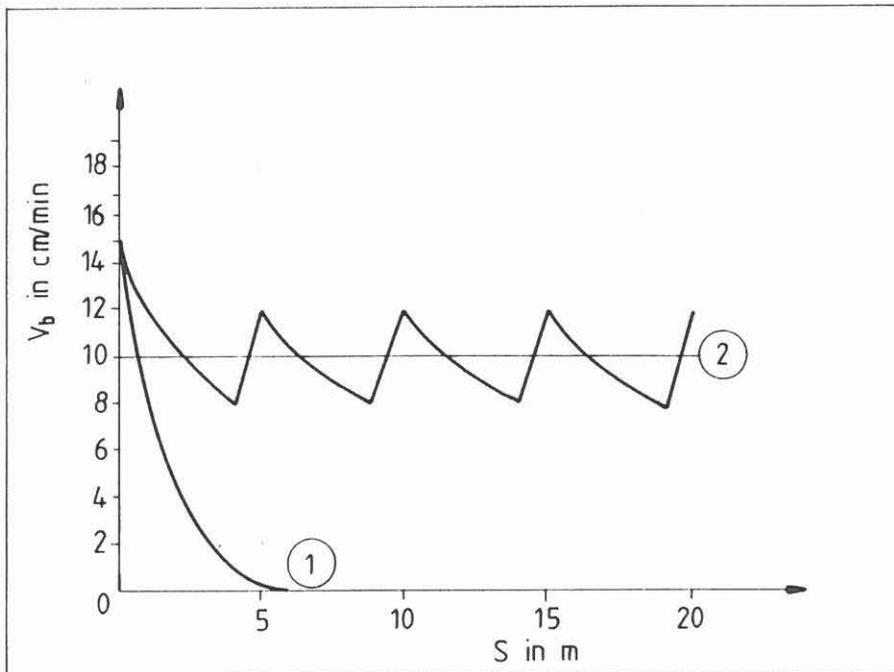
Der Vorteil der imprägnierten Bohrkronen liegt in der relativ konstanten Bohrgeschwindigkeit durch Abnutzen und erneutes Freilegen von Diamantmaterial gegenüber den oberflächengesetzten Bohrkronen. Bei diesen verringert sich unter konstanten Bohrbedingungen die Bohrgeschwindigkeit rasch /15/ (siehe Abbildung 2).

Mit zunehmender Teufe wird besonders im Hartgestein zur Kerngewinnung der Einsatz von Untertageantrieben (Moineau-Motoren) interessant. Diese liefern nämlich die für die Gesteinszerstörung mit Diamantkronen günstigen hohen Drehzahlen, welche es gleichzeitig erlauben, mit geringeren Andrücken zu bohren und die Standzeiten der eingesetzten Diamantkronen zu erhöhen /5/.

Mit der Kombination aus Bohrmotor und Kernrohr können im Hartgestein gegenüber dem konventionellen Kernen hohe qualitative und quantitative Kerngewinne mit größeren Bohrfortschritten erreicht werden /1,2,3,5,11/.

Die bisher genannten Grundsätze zum Kernen in Hartgestein gelten prinzipiell auch für das Seitenkernen. Sie sind der Beurteilungsmaßstab für die nachfolgend aufgeführten Verfahren zur Seitenkerngewinnung.





ITE	Bohrfortschritte von oberflächengesetzten (1) und imprägnierten Diamantbohrkronen (2) (aus/21/)	KTB
		Abb. 2

5 BETRACHTUNG DER VERFÜGBAREN SEITENKERNGEWINNUNGS- VERFAHREN

5.1 Eintreibverfahren

5.1.1 Lochstanzverfahren

Die einfachste und zugleich älteste Methode zur Kernentnahme bietet das Eintreiben eines Kernrohres auf mechanische Weise. Auf Grund seiner bedingten Einsatzfähigkeit in sehr weichen Formationen und seiner unzureichenden Kerngrößen spielt dieses Verfahren jedoch heute keine Rolle mehr /6/.

Das Gerät besteht aus einem eigenen starkwandigen Gehäuseteil, welcher am Ende eines Gestängestranges eingelassen wird (siehe Abbildung 3). Der gelenkige Teil, der für die Kernaufnahme bestimmt ist, gleitet entlang des schräggestellten Keilstückes gegen die Bohrlochwand. Wenn der Bohrstrang nachgelassen wird, drückt sich das Kernrohr in die Bohrlochwand. Beim Anheben des Bohrstranges klappt das Kernrohr mit dem gewonnen Kern über die Keilfläche wieder ein und kann über eine Fangvorrichtung gezogen werden /6/.

5.1.2 Kernschießverfahren

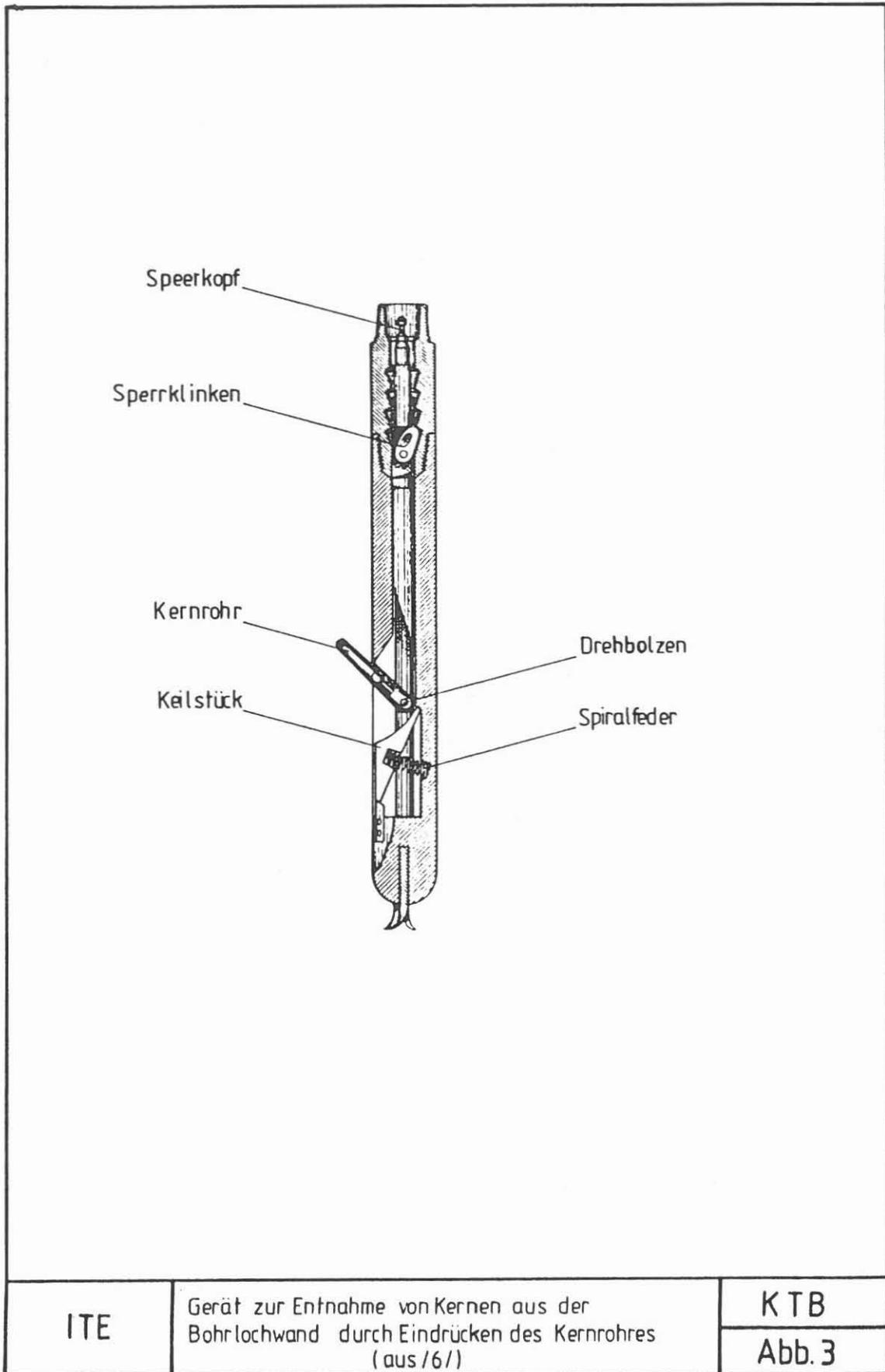
Beim Kernschießen werden aus einem Kernschußgerät durch elektrisch gezündete Sprengladungen kleine Kernrohre seitlich in die Bohrlochwand eingeschossen (siehe Abbildung 4).

Das Gerät wird an einem mehradrigen, isolierten Kabel in das unverrohrte Bohrloch eingelassen. Die zylindrischen und hohlen Schußkörper haben vorn eine Schneide. Bei weichem Gestein hat der Schneidkopf eine scharfe Schneide, bei hartem Gestein ist er mit stumpfen Schneidwinkeln gezahnt /6,9,10/.

Die Ladungen werden einzeln gezündet, um ein Festsetzen des Gerätes zu vermeiden. Die Kernrohre sind durch zwei Stahldrähte mit dem Gehäuse verbunden. Sie werden durch Ziehen am Aufhängeseil aus der Bohrlochwand geholt. Bis zu 100 Kerne können während eines Gerätemarsches gewonnen werden /9,10/.

Die Kerngrößen hängen von der Größe des Kernschußgerätes ab. Durchmesser und Länge betragen im Hartgestein jeweils 1" /6,8,9,10/.

Kernschußgeräte können in Bohrlochdurchmessern von 4" - 25" eingesetzt werden.



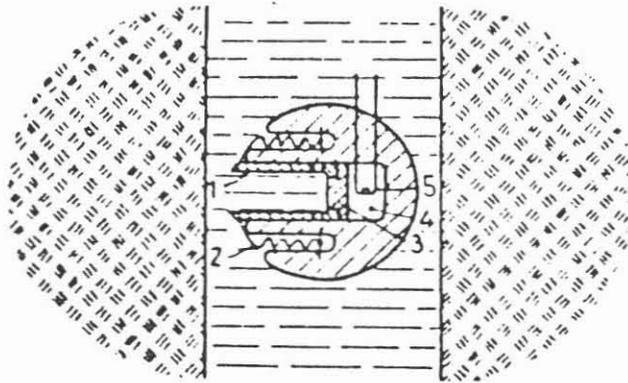
ITE

Gerät zur Entnahme von Kernen aus der Bohrlochwand durch Eindringen des Kernrohres (aus /6/)

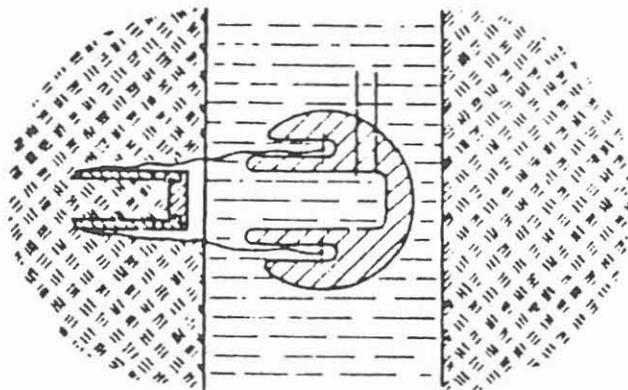
KTB

Abb. 3

A) Gerät in Schußstellung



B) Kernrohr in die anstehende Formation geschossen



- 1) Geschöß (Kernrohr)
- 2) Stahldraht
- 3) Geschößboden
- 4) Ladung
- 5) Zünder

ITE

Das Prinzip des Kernschießens (aus/6/)

KT B

Abb. 4

Die Seitenkerne weisen gegenüber gebohrten Kernen aus der gleichen Formation entscheidende Abweichungen auf. Diese Unterschiede, z.B. bezüglich Porosität und Permeabilität, entstehen durch die große Einschlagschubkraft des Kernschießens, die eine Zertrümmerung bzw. eine Beschädigung der Gesteinsprobe verursacht.

Abweichungen tauchen auch gegenüber den ursprünglichen Sättigungsverhältnissen auf. Diese beruhen auf Porositätsänderungen und Spülungsfiltratinvasion.

In hartem Gestein ist der Kerngewinn in der Regel sehr niedrig. Die Kernprobe ist außerdem bei erfolgreichem Einsatz sehr klein und liegt unter 1". In nicht konsolidierten Sanden kann der Kern ausgewaschen werden /6,8,9,10/.

Im Bereich der Kernrohrschneiden tritt bei steigender Härte des Gesteins eine zunehmende Pulverisierung des Gesteinsmaterials auf.

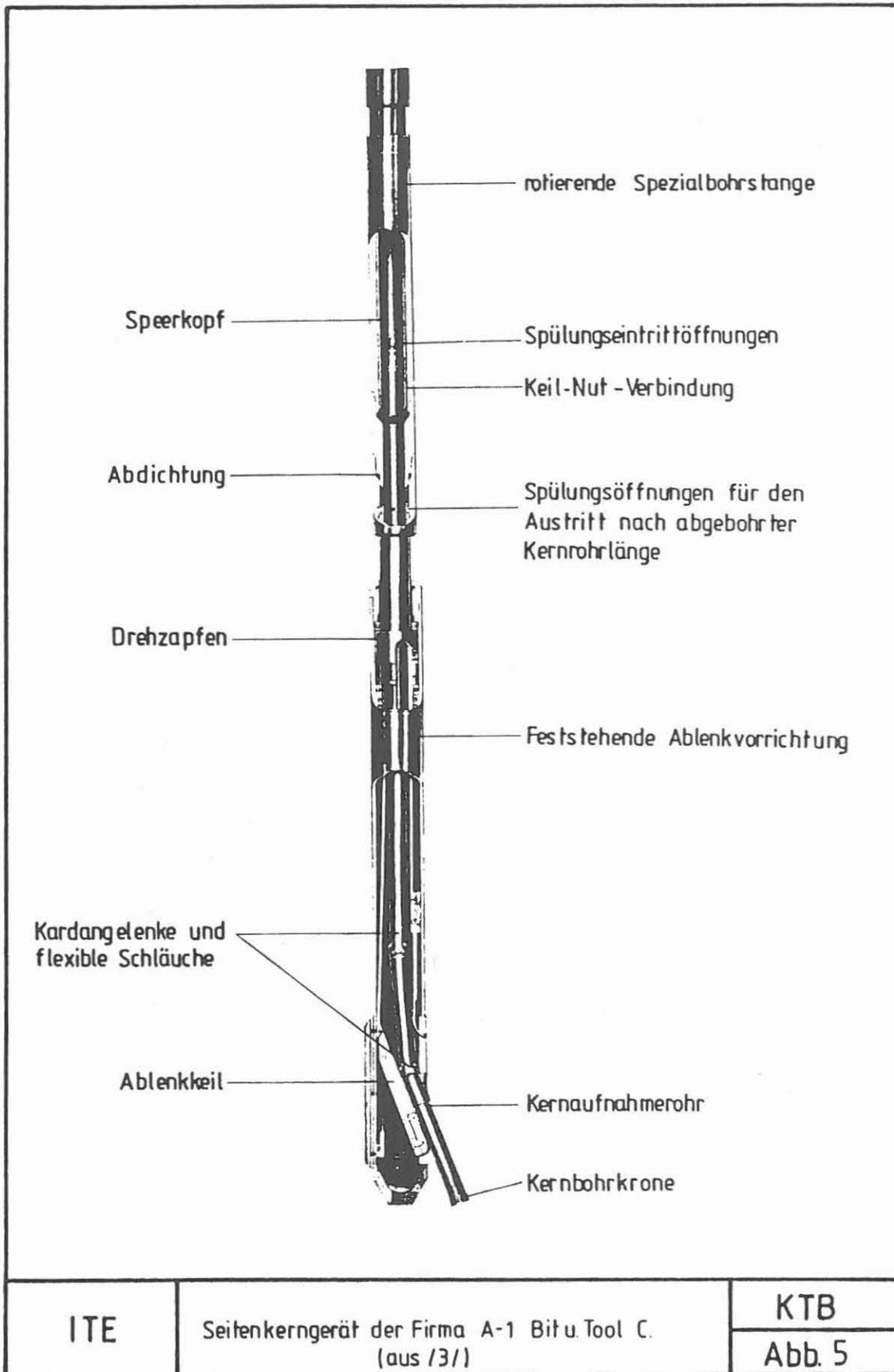
Das Kernschießen ist durch die Temperaturempfindlichkeit des Sprengstoffes auf Bohrlochtemperaturen von 205 °C und hydrostatische Drücke von 1380 bar begrenzt /9,10/.

Die aufgeführten Nachteile und der in der Regel zu kleine Kern lassen dieses Seitenkernverfahren für das KTB-Projekt als ungeeignet erscheinen.

5.2 Eindrehverfahren

5.2.1 Seitenkerngerät der Firma A-1 Bit & Tool Company

Um einen Kern aus der Bohrlochwand herauszudrehen, wurde von der A-1 Bit & Tool Company ein Gerät konstruiert, das am Ende eines Gestängestranges bis zur gewünschten Teufe eingebaut wird. Es besteht aus einer unteren feststehenden Ablenkvorrichtung und einem oberen Gehäuse, das sich mit dem Bohrstrang dreht (siehe Abbildung 5). Das Gehäuse enthält eine Keilnut, eine Abdichtung und einen Drehzapfen. Die Keilnut überträgt die Rotation des Bohrgestänges auf das Kernrohr. Die Abdichtung schließt den Raum zwischen dem Gehäuse und dem Kernrohr ab, so daß der hydraulische Druck der Spülung das Kernrohr in die Formation drücken kann. Die Ablenkvorrichtung ist am Gehäuse aufgehängt und nimmt nicht an der Drehbewegung teil /6/. Der Ablenkwinkel beträgt 20° zur Bohrlochachse. Die Winkelbeweglichkeit des Kernrohres wird durch Kardangelenke hergestellt. Diese sind mit flexiblen Schläuchen ummantelt, damit die Spülung nicht austreten kann.



Das Kernrohr besteht aus einer Mitnehmerstange mit einer für das Gehäuse passenden Keilnut, welche das Drehmoment überträgt und die Abwärtsbewegung des Kernrohres erlaubt. Beim Kernbohren wird der Gestängestrang gedreht. Ist die Kernlänge abgebohrt, kann die Spülung durch spezielle Öffnungen in den Ringraum entweichen. Der Abfall des Spülungsdruckes wird übermäßig registriert und das Kernrohr gezogen. Das Gehäuse wird zu einer neuen Position bewegt. Nach Einwerfen eines neuen Kernrohres kann ein weiterer Kern erbohrt werden.

Für Bohrlochdurchmesser im Bereich von 6" bis 8-3/4" können Kerne mit einem maximalen Durchmesser von 1" gewonnen werden. Bohrlochdurchmesser bis 12-1/4" erlauben Kerndurchmesser von 1-1/4". Die Länge der Kerne beträgt 20 bis 45 cm /1,3,6/.

Es bestehen keine wesentlichen Veränderungen der gesteinsphysikalischen Eigenschaften gegenüber den ursprünglichen Lagerstättenbedingungen /6/.

Über die Kardangelenke und den großen Ablenkwinkel kann nur eine begrenzte Andruckkraft erzeugt werden. Das System wird aus diesem Grund für den Einsatz in weichen bis harten Formationen, nicht jedoch für sehr harte Gesteine als anwendbar betrachtet /1,6/.

Als besondere Nachteil dieser Ausführung wird die niedrige Drehzahl, bedingt durch den Antrieb über den Drehtisch, angesehen, die bei dem kleinen Kronendurchmesser zu sehr ungünstigen Schnittbedingungen führen /1,2,3,6/.

5.2.2 Seitenkernsystem des Institutes für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung

Das Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung (ITE) hat im Rahmen eines BMFT-Projektes 03 E 3001 A für Sedimentgestein ein Seitenkernsystem konzipiert und entwickelt, mit dem Kerne aus der Bohrlochwand in 8-1/2" oder größeren Bohrlöchern gewonnen werden können. Dieses System kann die gestellte Aufgabe auch im Hartgestein leisten, wenn entsprechende Weiterentwicklungen durchgeführt werden.

Der Antrieb des Kernrohres erfolgt durch einen Moineau-Bohrmotor (z.B. Eastman/Christensen, Dyna Drill). Beim Einsatz dieses Seitenkernsystems wird zunächst der Bohrstrang mit Absetzpacker, Anbohrschräge und dem äußeren Außenrohr mit Teleskopstück sowie Landeschulter bis in eine vorbestimmte Absetzteufe eingebaut. Das separate Innensystem mit dem Kernrohr und dem Bohrmotor als Hauptelementen wird danach am Seil eingelassen. Nach Abbohren der gewünschten Kernstrecke wird das Innensystem gezogen. Der Packer erlaubt ein mehrfaches

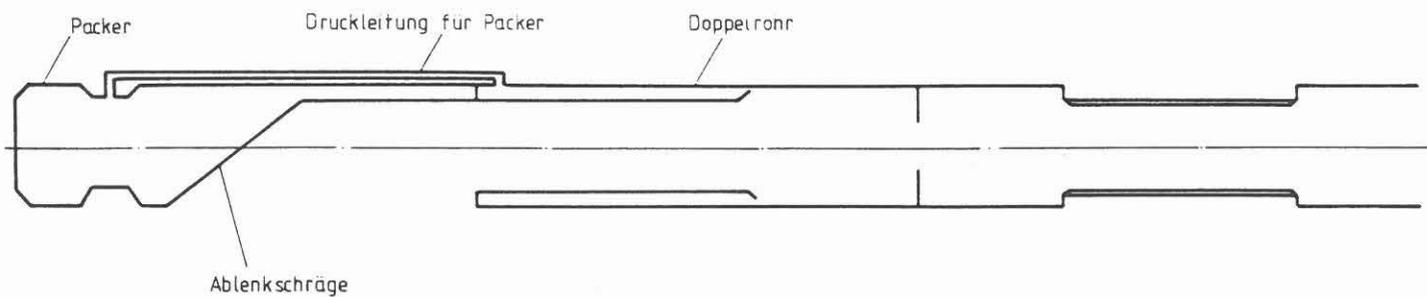


Abb. a)

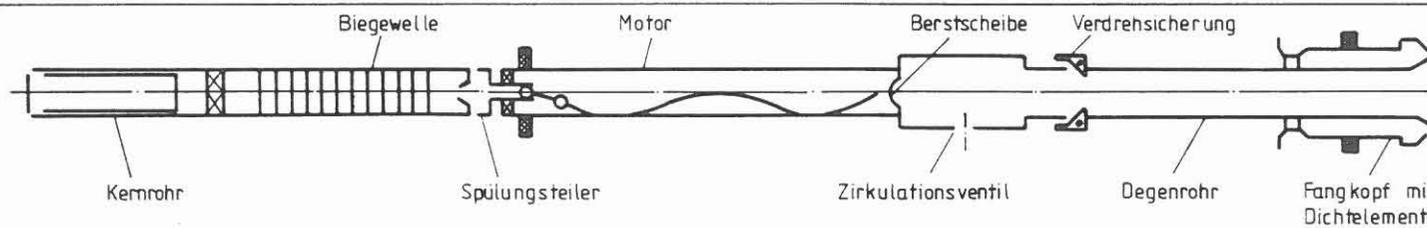


Abb. b)

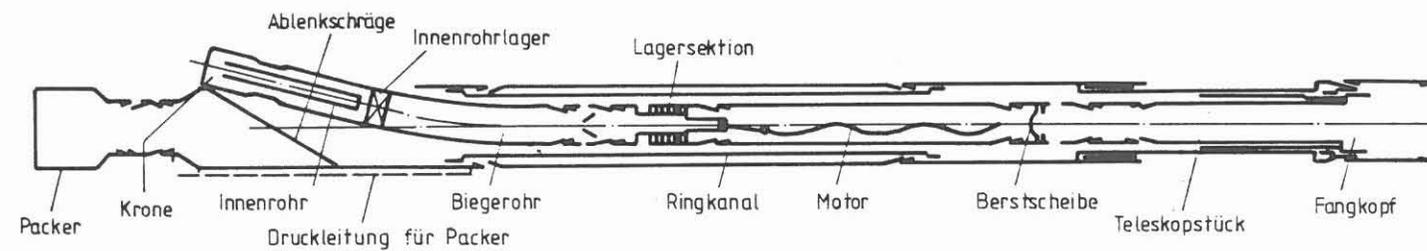
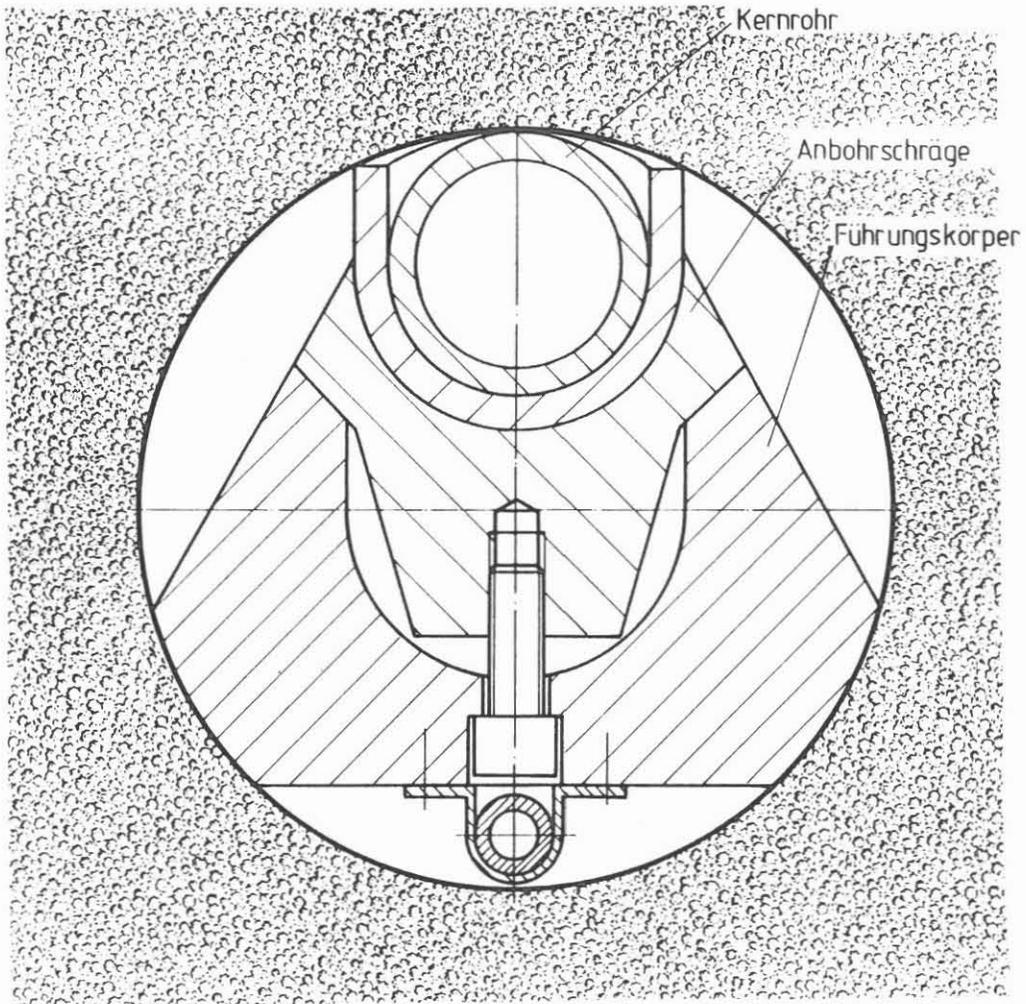


Abb. c)

ITE

Seitenkernsystem des ITE mit Integriertem Bohrmotor (aus/1.2/)

KTB
Abb.6



ITE

Führungskörper mit Anbohrschräge

KTB

Abb. 7

Lösen und erneutes Setzen, so daß mehrere Kerne während eines Gestängeeinbaus gezogen werden können /1,3,5/.

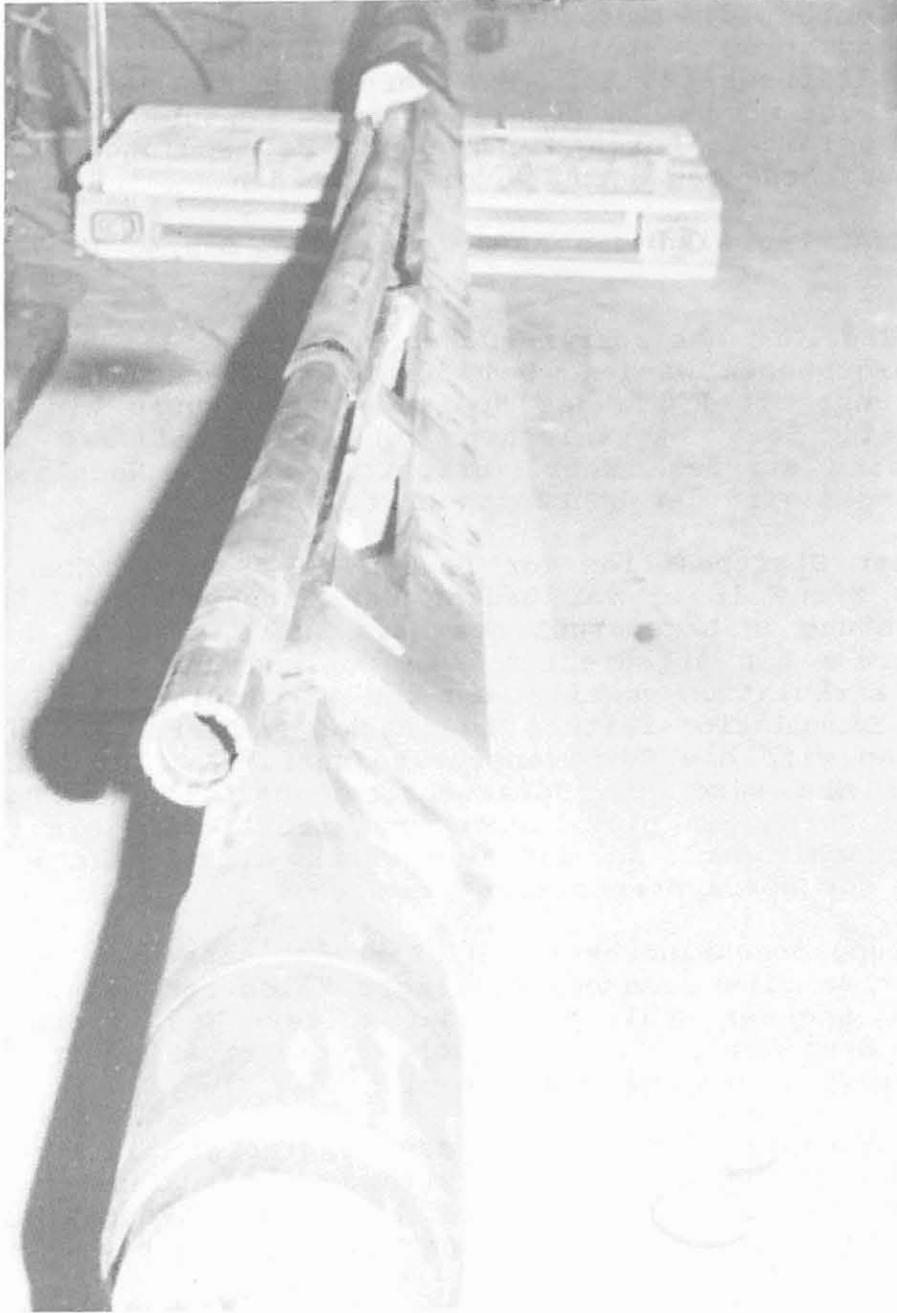
Abbildung 6 verdeutlicht die einzelnen Systemkomponenten und die Funktionsweise des Kerngerätes. Das Bohrstrangelement besteht aus Packer, Anbohrführung, Doppelrohr, Teleskopstück und Anschlußgehäuse (Abbildung 6a). Das ziehbare Kernbohrsystem enthält das Kernrohr mit Diamantkrone, Biegewelle, Spülungsteiler, Bohrmotor, Zirkulationsventil, Verdrehsicherung, Vorschubeinrichtung und Fangkopf mit Dichtelementen für die Zieharbeiten (Abbildung 6b).

Die exakte Fixierung und Positionierung des Gerätes im Bohrloch wird durch den am Ende des Bohrstrangelementes angeordneten Packer erreicht. Dieser verfügt über eine 1,68 m lange, aufblasbare Gummimanschette, die durch den Spülungsdruck aufgepumpt wird und sich an die Bohrlochwand anlegt. Eine Verbindungsleitung führt den aus dem Ringraum des Doppelrohres kommenden, zum Setzen des Packers notwendigen Druck am Fenster der Anbohrschräge vorbei zum Packer. Eine am Top des Bohrmotors befindliche Berstscheibe verhindert während des Aufpumpvorganges, daß der Spülungsdruck über den Motor entweichen kann.

Über dem Packer befindet sich ein Führungskörper. In einem Fenster ist die Anbohrschräge plazierte, welche die Krone in die Bohrlochwand führt. Abbildung 7 zeigt einen Schnitt durch den Führungskörper und die Anbohrschräge. Letztere setzt sich aus zwei Teilen mit unterschiedlicher Steigung zusammen. Ein kurzes Anfangsstück mit einer Steigung von $16^{\circ}20'$ soll die Krone in einem Bereich, wo sie noch nicht schneidet, an die Bohrlochwand heranzuführen. Der zweite Teil der Anbohrschräge besitzt eine Steigung von $4^{\circ}30'$ und soll die Krone unter diesem Winkel in das Gestein hineinführen. Die Größe dieses Winkels wurde in Versuchen am ITE experimentell ermittelt. Die Gesamtlänge der Ablenkschräge beträgt 1,27 m. Sie ist als leicht austauschbares Verschleißteil gefertigt /1,3,5/.

Oberhalb der Anbohrschräge befindet sich ein Doppelrohr, das als Übertragungselement für den zum Setzen des Packers notwendigen Druck dient. Das sich nach oben anschließende Teleskopstück hat die Aufgabe, bei festgesetztem Packer den zum Abbohren eines Kernes notwendigen Hub von 1,5 m zu ermöglichen. Das Einschubteil wird über das Anschlußgehäuse mit dem Bohrstrang verbunden.

Am unteren Ende des ziehbaren Kernbohrsystems befindet sich das Kernrohr. Verwendet wird ein konventionelles Doppelkernrohr der Serie BWD-4 der Firma Eastman Christensen. Als Kernbohrkopf wird eine oberflächenbesetzte Diamantbohrkrone verwendet. Bei einem Außendurchmesser von 61 mm erbohrt sie einen Kern von 41 mm Durchmesser. Die Länge des vollständigen, zylinderförmigen Kernes beträgt 30 cm, sowie etwa 30 cm Anschnittkern /3/.



ITE

Austritt des Kernrohres aus dem Gehäuse

KTB

Abb. 8

Die oberhalb des Kernrohres angeordnete Biegewelle soll die für die Ablenkung notwendige Winkelbeweglichkeit zwischen Kernrohr und Bohrmotor ermöglichen (siehe Abbildung 8).

Der sich an die Biegewelle nach oben anschließende Spülungsteiler hat die Aufgabe, den aus dem Bohrmotor austretenden Spülungsstrom zu teilen, so daß nur etwa ein Drittel durch das Doppelkernrohr fließt. Die verbleibenden zwei Drittel der Spülungsmenge werden in den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Gestänge geleitet. Durch die Trennung des Spülungsstromes soll eine Auswaschung des Kerns vermieden werden.

Als Drehantrieb wird ein handelsüblicher 2-3/4" Moineau-Motor verwendet.

Die Regelung des Bohrandruckes kann hydraulisch oder mechanisch vorgenommen werden. Bei der hydraulischen Regelung wird der Vorschub mit Hilfe des Spülungsdruckes über ein Degenrohr realisiert. Beim mechanischen Vorschub wird das Degenrohr durch ein starres Rohr ersetzt. Durch Nachlassen des Bohrstranges wird der Bohrfortschritt erreicht.

In der Startposition vor Beginn des Kernmarsches befindet sich die Krone 15 cm vor Beginn der Anbohrschräge. Durch die Außendichtung am Lagerstuhl des Navi-Drill wird das Doppelrohr zum Ringraum hin abgedichtet. Die Spülung tritt durch Öffnungen des Zirkulationsventils aus und wird durch das Doppelrohr und die Zirkulationsleitung zum Packer geführt. Durch langsames Pumpen wird die Gummimanschette entfaltet. Bei einem Druck von 10,3 MPa wird die Berstscheibe oberhalb des Bohrmotors zerstört. Durch den plötzlichen Druckabfall wird ein Ventil im Packer geschlossen, so daß der Druck nicht mehr entweichen kann und das Kernsystem fixiert ist.

Die Spülungsgeschwindigkeit im Zirkulationsventil steigt an. Dadurch wird eine federbeaufschlagte Hülse vor seine Öffnungen geschoben und der Spülung ist der weitere Weg in den Ringraum zwischen Navi-Drill und Außenrohr versperrt. Sie wird über den Motor geleitet, der zu drehen beginnt.

Nach Beendigung des Bohrvorganges erfolgt das Abreißen des Kernes durch Anheben des Bohrstranges. Das Innensystem wird zurück in die Startposition gezogen. Durch Fangen mit einem OverShot kann es mittels Wireline-Technik ausgebaut werden.

Nach Lösen des Packers kann der Bohrstrang in eine neue Kernposition gebracht werden. Das Innensystem wird mit einer neuen Berstscheibe ausgerüstet erneut eingeworfen und der gesamte Vorgang wiederholt /1,3,5/.

5.2.3 Side Wall Coring Tool der Firma Eastman Christensen

Von der Firma Eastman Christensen wurde der Prototyp eines Side Wall Coring Systems erprobt, welches mit einem während des Kernens horizontal ausgerichteten Kernrohr Gesteinsproben aus der Bohrlochwand erbohrt. Das System besteht im wesentlichen aus einem Mittellrohr mit der Kernbohrereinrichtung, einem darüber liegenden hydraulischen Antriebssystem und einem darunter angeordnetem Ventilpaket mit anschließendem Computer und Batteriepaket. Der größte Durchmesser beträgt 8-1/4". Die Kerne werden aus der Seitenwand senkrecht zur Bohrlochachse erbohrt und im Kernmagazin abgelegt. Sie haben einen Durchmesser von 38 mm und eine Länge von 80 mm. Der Antrieb des Kernrohres erfolgt über einen Moineau-Motor. Die Steuerung der Kernbohrereinrichtung geschieht über ein Kommunikationskabel mit einer übertägigen Kontrolleinheit.

Erfahrungen mit dem Side Wall Coring Tool liegen noch nicht vor.

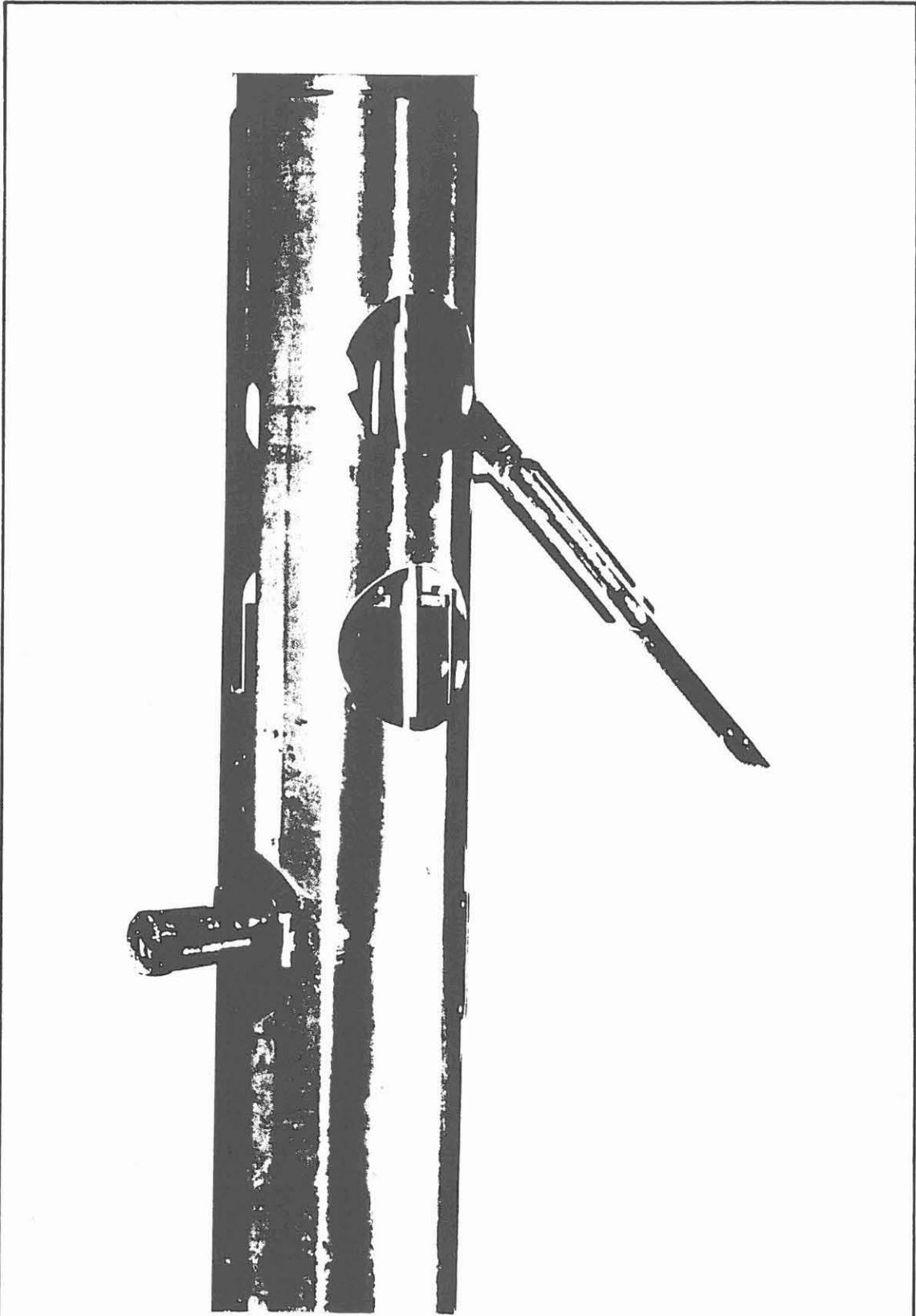
5.2.4 Seitenkernsystem der Firma Gearhart (Hard Rock Coring Tool)

Bei diesem Seitenkernsystem handelt es sich um ein Gerät, welches bei ausgebautem Bohrgestänge mittels Kabel in das Bohrloch gefahren wird. Über eine integrierte Meßeinrichtung wird das Gerät in der gewünschten Teufe positioniert und mit Sperrklinken an der Bohrlochwand verklemmt. Durch einen im Gehäuse integrierten Elektromotor wird eine Diamantbohrmaschine mit $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ angetrieben. Ist der Kern aus der horizontalen Lage abgebohrt, richtet sich die Bohrmaschine im Gehäuse vertikal auf. Der Kern wird aus der Kernhülse herausgedrückt und in einer Kernkammer abgelegt. Auf diese Weise können bis zu zwölf Kerne bei einmaligem Einfahren erbohrt werden (siehe Abbildung 9). Die Kerngröße ist mit 24 mm im Durchmesser und 35 mm in der Länge klein, aber ausreichend für viele Untersuchungen /11,16/.

Über das Kabel kann über Tage im Meßwagen der Bohrprozeß überwacht und gesteuert werden.

Der Bohrl Lochdurchmesser kann 6-3/4" bis 12-3/4" betragen. Das Gerät ist bis zu Temperaturen von 150 °C und Drücken von 1380 bar einsetzbar /11,16/.

Bei bisherigen Einsätzen erzielte das Gerät laut Firmenangaben Kerngewinne zwischen 30% und 100 %.



ITE	Hard-Rock Coring Tool der Fa. Gearhart (aus /21/)	KTB
		Abb. 9

5.3 Kernsägeverfahren

Ein Kernsägegerät wird von der Firma Schlumberger unter dem Namen "Diamond Core Slicer" angeboten. Wie aus Abbildung 10 zu sehen ist handelt es sich hierbei um ein Gerät, das mit Hilfe von zwei diamantbesetzten Sägeblättern, die einen Winkel von 45° einschließen, einen dreieckigen Kern aus der Bohrlochwand schneidet.

Die Kerne haben die Form eines gleichseitigen Dreieckes mit einer Seitenlänge von 2,54 cm. Hieraus ergibt sich ein Kernquerschnitt von ca. 2,77 cm². Die maximale Kernlänge beträgt 91,44 cm. Während eines Einsatzes können vier Kerne gewonnen werden. Dieses entspricht einer Kernstrecke von 3,66 m und einem Gesamtkernvolumen von ca. 1015,1 cm³. Abstriche vom nutzbaren Kernvolumen müssen bei Vorhandensein von Filterkuchen gemacht werden, da der horizontale Vorschub der Sägeblätter begrenzt ist /1,3,6/.

Die Sägeblätter werden von einem Elektromotor mit einer Leistung von 1,1 kW angetrieben. Dieser Motor ist bis zu Temperaturen von 149 °C und einem Druck von 1380 bar einsetzbar. Eine weitere Teufenbegrenzung ergibt sich aus der maximalen Kabellänge von ca. 6700 m. Bei einer Kabellänge über 3000 m ist eine Erhöhung der eingespeisten Spannung (U = 550 V) erforderlich /1/.

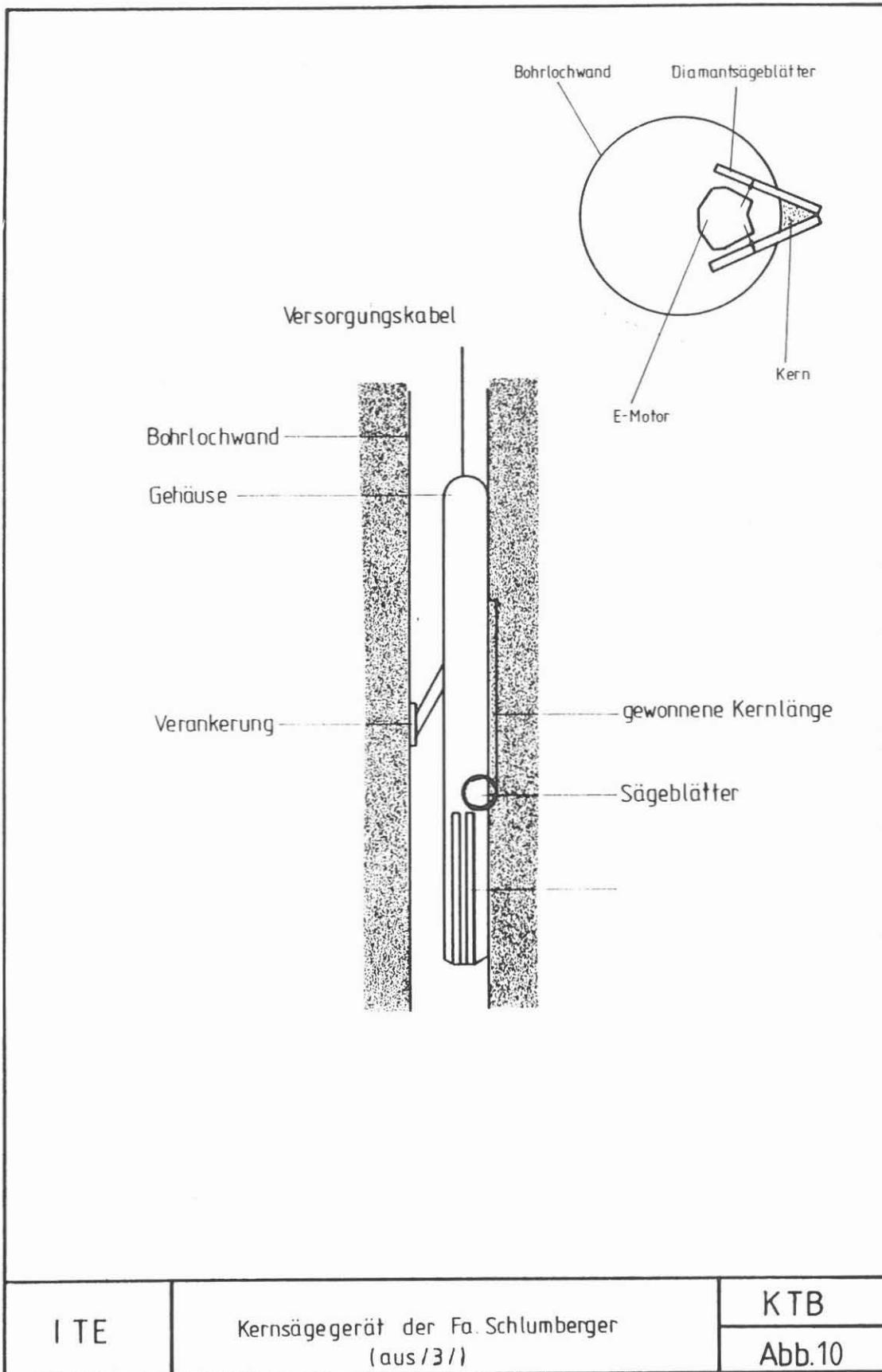
Durch den Einbau einer Orientierungsrichtung ist eine nachträgliche Bestimmung von Einfallen und Streichen der gekernteten Schichten möglich.

Das Kernsägegerät ist in Bohrlöchern mit Durchmesser von 6-1/3" bis 15-1/4" einsetzbar.

Die Sägeblätter können sehr weiche bis sehr harte Gesteine (Granit) schneiden. Das Kernsägen verursacht keine gesteinsphysikalischen Veränderungen im Kern /1,11/.

Nicht konsolidierte Gesteine neigen während des Kernsägens zum Zerfall und können verloren gehen. Geklüftete Formationen können gekernt, jedoch nicht immer ganze Kerne gewonnen werden /1,3,6/.

Erfahrungen mit diesem Gerät beim probeweisen Einsatz in kristallinem Gestein wurden von der schweizerischen Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) gemacht. Aus einem Teufenbereich von 1241,0 m bis 1386,6 m wurden vier Kerne gezogen. Ein Kern aus frischem Granit hatte eine Länge von 1 m. Der Kerngewinn bei den restlichen Kernen aus hydrothermal umgewandeltem Granit lag zwischen 3 % und 50 %.



Die Auswertung dieser Kerne war nur sehr beschränkt möglich. Die Qualität der konventionell gewonnen Kerne konnte nicht erreicht werden /13/.

6 BEWERTUNG DER SEITENKERNVERFAHREN

Der Vergleich der beschriebenen Seitenkernverfahren erfolgt nach der prinzipiellen Einsatzfähigkeit in kristallinem Hartgestein unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 genannten Forderungen.

Verfahren, welche sich von der Konzeption her nicht für diesen Einsatzbereich eignen, sind das Lochstanzverfahren, das Eindrehverfahren der A-1 Bit & Tool Company und das Kernschießverfahren.

Während das Eindrehverfahren wegen der ungünstigen Schnittbedingungen und der geringen Andruckmöglichkeit aufgrund der Kardangelenke im Kernrohrbereich aus der Betrachtung herausfällt, scheidet das Kernschießverfahren wegen schlechter Kernbeschaffenheit, zu geringer Kerngröße und einer Teufenbegrenzung durch das verwendete Kabel für einen Einsatz im Rahmen des KTB-Projektes aus (siehe Tabelle 1 u. 2).

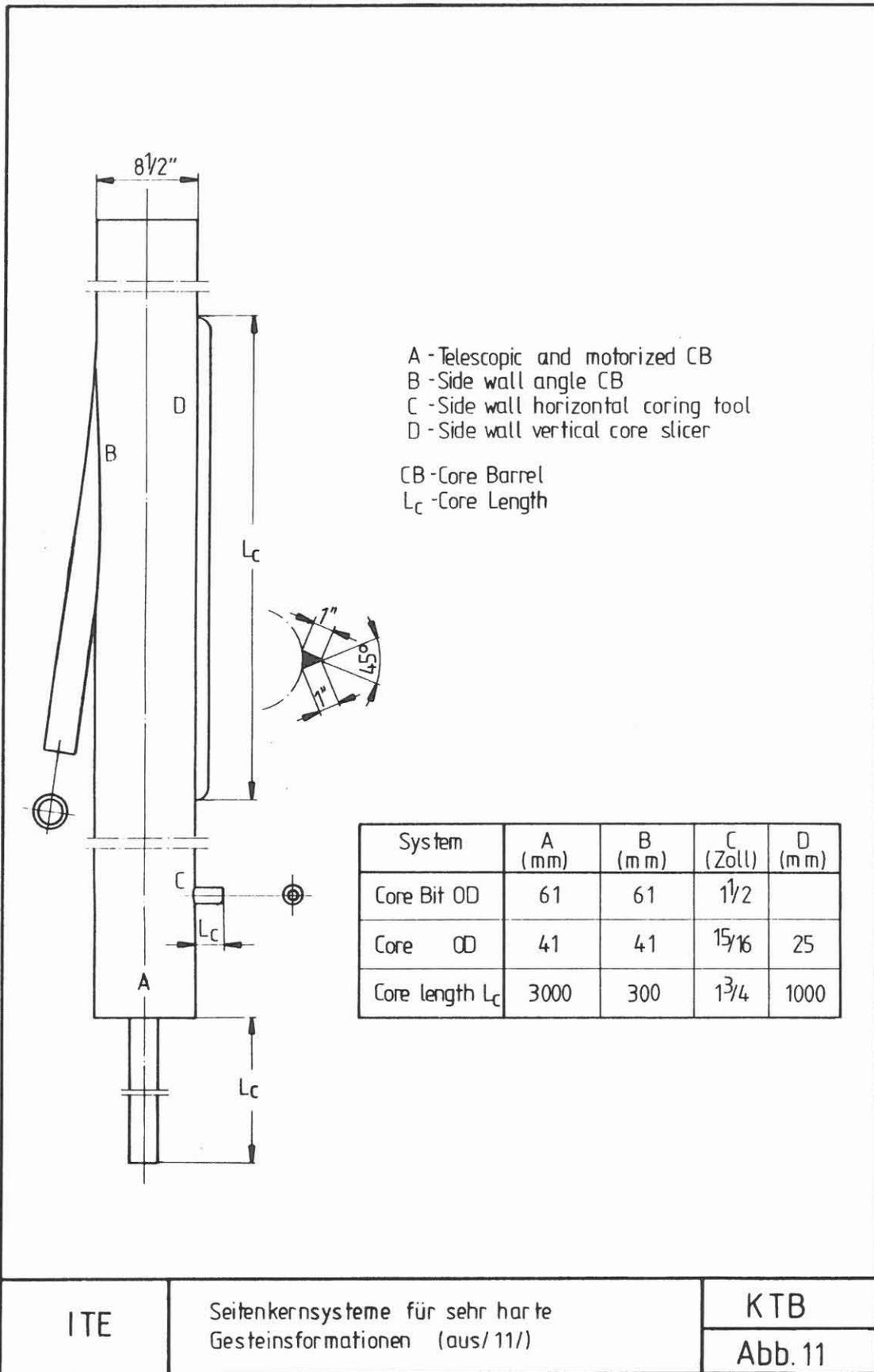
Für einen möglichen Einsatz in sehr harten Gesteinsformationen verbleiben somit das ITE-System, das Hard Rock Coring Tool und das Kernsägeverfahren.

In Abbildung 11 sind diese Seitenkernverfahren dargestellt. Deutlich ist hier der Vorteil des ITE-Systems (Version B) gegenüber den anderen Seitenkernverfahren (Version C und D) zu erkennen.

Das ITE-System und das Gerät der Firma Gearhart weisen mit $R = 1,6$ bezüglich der Meißelabmessungen sehr gute Werte für das Kernem im Hartgestein auf (siehe Tabelle 3). Der Vorteil des ITE-Systems liegt hier in den bedeutend größeren Abmessungen der gewonnen Kerne (siehe Tabelle 1).

Die Druckbelastbarkeit liegt bei allen Systemen mit etwa 1400 bar in der gleichen Größenordnung. Alle Verfahren sind im geforderten Bohrlochdurchmesserbereich von 8-1/2" bis 10-5/8" einsetzbar (siehe Tabelle 2).

Hard Rock Coring Tool und Diamond Core Slicer weisen jedoch andere entscheidende Nachteile gegenüber dem ITE-System auf. Sie benötigen zum Antrieb des Elektromotors (siehe Tabelle 2) eine übertägige Stromversorgung. Mit zunehmender Teufe (> 3000 m) sind größere Spannungen wegen des Leitungswiderstandes erforderlich. Das Kabel, an dem die Geräte herabgelassen



ITE

Seitenkernsysteme für sehr harte
 Gesteinsformationen (aus/ 11/)

KTB

Abb. 11

werden, und die Temperaturbelastbarkeit von nur 150 °C grenzen die Einsatztiefe ein.

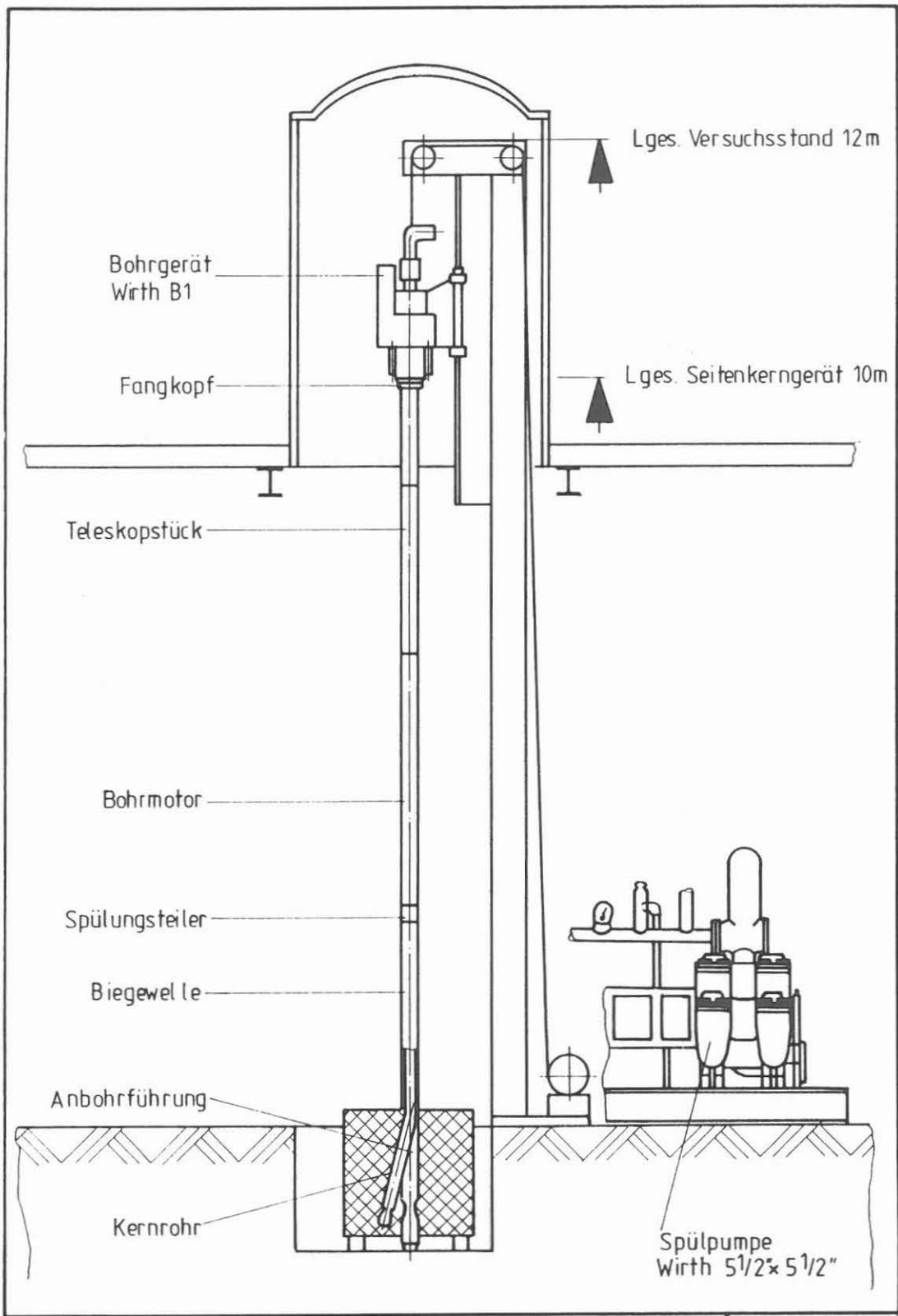
Beide Geräte können bei einem Geräteeinsatz nur eine bestimmte Kernmenge ziehen. Sie beträgt beim Hard Rock Coring Tool mit 12 Kernen aufgrund der geringen Kerngröße nur etwa 190 cm³ (s. Tabelle 1). Danach muß das Gerät zum Entleeren des Kernmagazins gezogen werden. Das ITE-System erlaubt durch die Wireline-Technik während eines Geräteeinsatzes bedeutend größere Kernmengen. Rechnet man die Kernanschnittlänge hinzu, erreicht man bereits bei einem Kernmarsch etwa 600 cm³.

Das Kernsägeverfahren weist bei Kernlängen von etwa 900 mm eine gegenüber dem ITE-System schlechtere Kernqualität auf.

Gemessen an den geforderten Eigenschaften für ein leistungsfähiges Seitenkernsystem in großen Teufen und kristallinen Gesteinsformationen ist hier eine eindeutige Entscheidung für das Seitenkerngerät des Institutes für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung zu treffen. Es ermöglicht durch seine Konzeption einen weiten Einsatzbereich bezüglich Teufe, Gesteinhärte, Druck- und Temperaturbedingungen sowie die Gewinnung von großen Kernen mit für geowissenschaftlichen Auswertungen geeigneten Qualitäten und Quantitäten.

Der Prototyp wurde am ITE unter schwierigen Bedingungen getestet und hat seine Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt. Die Versuchsergebnisse zeigten die erforderlichen Anpassungen für einen Einsatz des Gerätes in Hartgestein auf.

Die Abbildung 12 zeigt schematisch den zur Weiterentwicklung des Seitenkerngerätes geplanten Versuchstand am ITE.



ITE	Schematische Darstellung des Versuchsstandes zum Seitenkernen	KTB Abb.12
-----	--	---------------

Seitenkernsystem	Kernlänge [mm]	Kerndurchmesser [mm]	Kernmenge pro Einsatz [cm ³]	Einschätzung des prozentualen Kernge- winnns [%]	Kernorientierung	geowissenschaftliche Auswertbarkeit
Kernschießen	25	25	772,2 (1287)	ca. 70	nein ¹⁾	auf Grund Porositäts- u. Permeabilitätsverän- derungen für KTB nicht geeignet
A-1 Bit&Tool	200 - 450	32	unbegrenzt (wireline)	-	nein ¹⁾	für geowissenschaftliche Auswertung in Hartgestein nicht geeignet
ITE-Seiten- kernsystem	300 (600)	41	unbegrenzt (wireline)	100 % (bei Testversuchen in Sedimentgestein)	nein ¹⁾	für geowissenschaftliche Auswertung in Qualität u. Quantität geeignet
Hard Rock Coring Tool	35	24	190	78 - 100	nein ¹⁾	für geowissenschaftliche Auswertung in Qualität u. Quantität geeignet
Diamond Core Slicer	910	25 (Seite)	1015	3 - 50 % (NAGRA-Ergebnisse in kristallinem Gestein)	nein ¹⁾	auf Grund der NAGRA-Er- gebnisse unzureichend

¹⁾ orientierter Geräteeinbau möglich

Tabelle 1: Beurteilungskriterien für die geowissenschaftliche Auswertung von Seitenkernen

Seitenkernsystem	Kernverfahren	Antriebssystem	Kernmeißel	Kernmeißel- durchmesser OD/ID [mm]	R = -- OD ID	Meißel- standzeiten [m]	Bohrge- schwindigkeit [m/h]
ITE-Seiten - kernsystem	Wireline	Moineau-Motor	Diamantbohr- krone (imprä- gniert)	61/41	1,6	> 30	3
Hard Rock Coring Tool	Kabel	Elektromotor	Diamantbohr- krone (imprä- gniert)	38/24	1,6	> 20	0,5
Diamond Core Slicer	Kabel	Elektromotor	diamantbesetzte Sägeblätter	76 (OD)	-	50	3,5

Tabelle 3: Technische Daten verfügbarer Seitenkernsysteme für Hartgestein

Seitenkernsysteme	Temperaturbelastbarkeit [°C]	Druckbelastbarkeit [bar]	Bohrlochdurchmesser [inch]	Teufenbegrenzung durch Kabel ⁴⁾	Gesteins- härte (max.)
Kernschießen	205 ¹⁾	1380 ¹⁾	4 - 25	ja	sehr hart
ITE-Seiten - kernsystem	175 ²⁾	1380 ²⁾	>= 8-1/2	nein	sehr hart
Hard Rock Coring Tool	150 ³⁾	1380 ³⁾	6-3/4 - 12-3/4	ja	sehr hart
Diamond Core Slicer	150 ³⁾	1380 ³⁾	6-1/3 - 15-1/4	ja	sehr hart

¹⁾ durch Sprengstoffempfindlichkeit bedingt

²⁾ durch Elastomerteile des Moineau-Motors bedingt

³⁾ durch Elektromotor bedingt

⁴⁾ durch Zunahme des Leitungswiderstandes und Belastbarkeit des Kabels

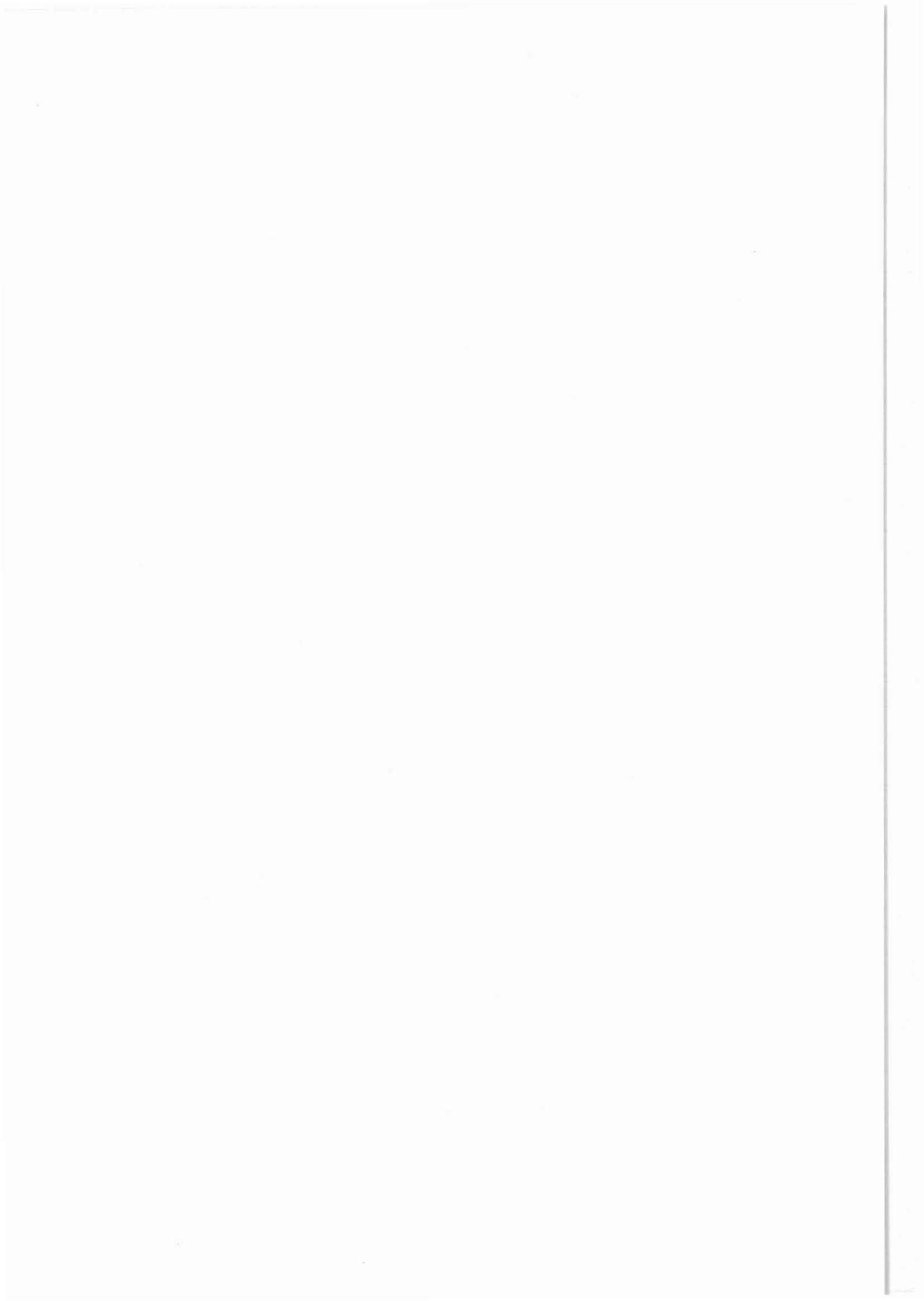
Tabelle 2: Einsatzgrenzen der Seitenkernsysteme

7 LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Young, F. Darstellung von Kerngewinnungsverfahren und Bewertung ihrer Einsatzmöglichkeiten in übertiefen Bohrungen. Diplomarbeit, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Clausthal, August 1983
- 2 Marx, C. Statusbericht Schürfbohrtechnik. Behrens, J. Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Clausthal, Mai 1981
- 3 Marx, C. Entwicklung neuer und Verbesserung bestehender Kerngewinnungsmethoden. Krömer, E.J. Forschungsbericht BMFT-FB-T 82-091, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Clausthal, Juni 1982
- 4 Nawangsidi, D. Untersuchung kritischer Einflußfaktoren und neuartiger Systemkomponenten beim Kernbohren. Dissertation, TU Clausthal, Februar 1980
- 5 Marx, C. Spezielle Entwicklungen für die Jürgens, R. Tiefbohrtechnik. Rohde, H. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 97. Jg., Februar 1981, S. 42 - 46
- 6 Marx, C. Statusbericht über Kerngewinnungsverfahren in der Tiefbohrtechnik. Növig, T. Mitteilung aus dem Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung (ITE), TU Clausthal, 1977
- 7 N.N. Entwicklung und Erprobung eines Gamma-Ray-Mess-Systems und einer Seitenkernapparatur für den Einsatz in Schürfbohrungen. Abschlußbericht zum BGR-Forschungsvorhaben 6/79 B der Christensen Diamond Products GmbH, Oktober 1982
- 8 Toney, J.B. Coring. World Oil, August 1, 1985, S. 29-36
- 9 N.N. Information der Firma Dresser Atlas Europe S.A., Dresser Atlas Division, Niederlassung Bremen, Juli 1983

- 10 Wolk, P. The Mechanics of Sidewall Sampling.
Dresser Atlas, Technical Memorandum
Volume 7, No. 1, March 1976
- 11 Marx, C. Drilling and Coring Techniques for
Rischmüller H.Hard Rock
Erdöl-Erdgas-Kohle, 102. Jahrg., 1986,
Heft 7/8, S. 333 - 337
- 12 N.N Unterlagen der Firma Eastman
Christensen GmbH, November 1986
- 13 NAGRA Technical Report NTB 85-01,
Sondierbohrung Böttstein,
Untersuchungsbericht, Juni 1985
- 14 Marx, C. Diamantbohrwerkzeuge und ihr Einsatz in
Flachbohrungen
Christensen Diamont Products,
Celle, 1972
- 15 Marx, C. Entwicklungsmöglichkeiten moderner
Schürfbohrtechnik
Erzmetall 33, 1980, Nr. 4,
S. 196 - 201
- 16 NN Hard Rock Coring Tool
Unterlagen der Firma Gearhart
Wireline Services Ltd,
Dyce, Aberdeen 1987

B. Entwicklung von Bohrwerkzeugen
und Untertage-Equipment



Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

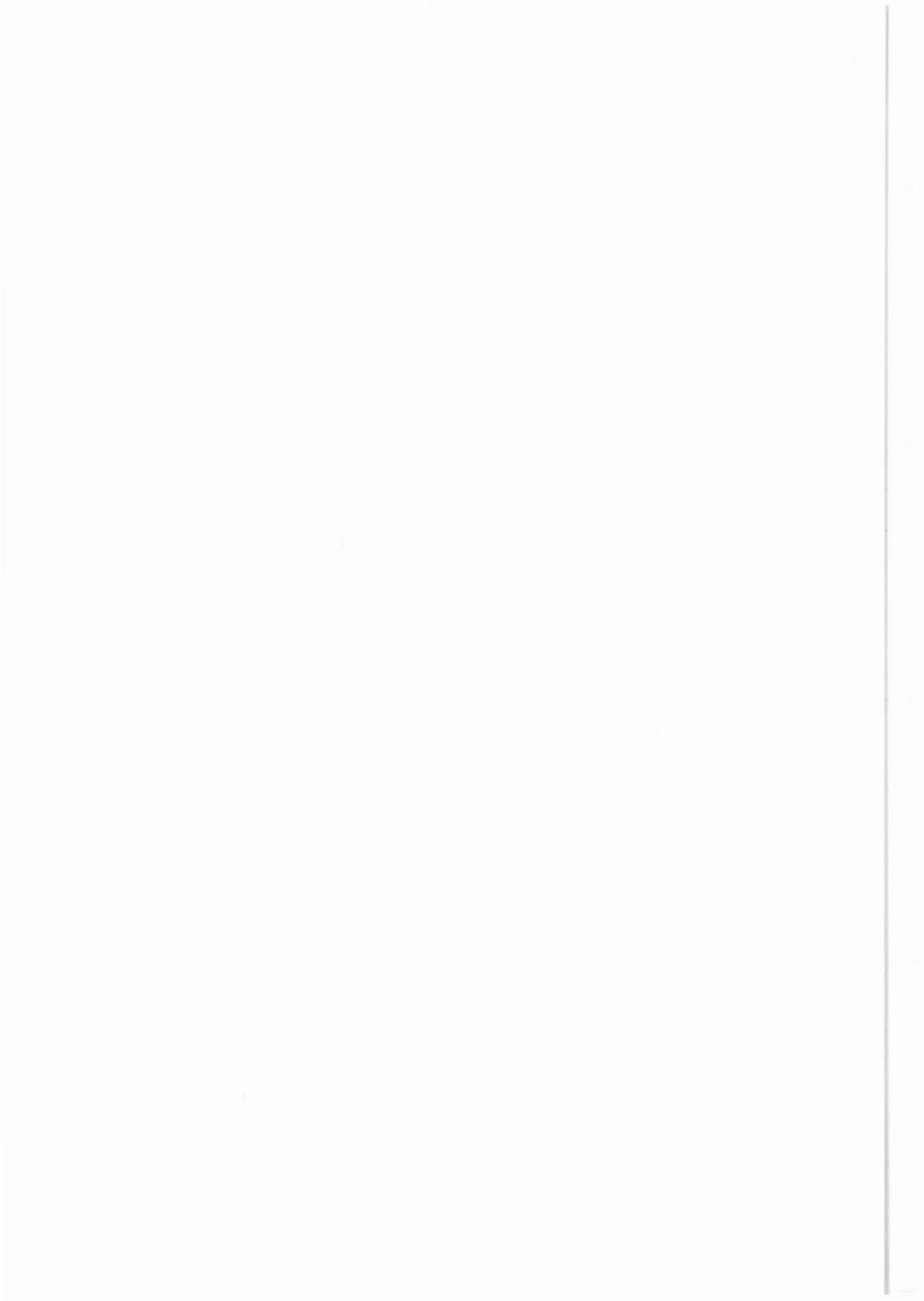
Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Untersuchungen zur
Beanspruchung von Bohrsträngen
für übertiefe Bohrungen

P. Stoffels

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	221
2. Projektziele.....	221
3. Stand des Projektes.....	222
3.1 Bau und Erprobung der Rohrprüfanlage RP 5.....	222
3.1.1 Beschreibung der Rohrprüfanlage.....	222
3.1.1.1 Technische Daten.....	223
3.1.1.2 Aufbau der Rohrprüfanlage.....	223
3.1.2 Versuchsprogramm und Meßwerterfassung.....	225
3.1.3 Meßwerterfassung und Verarbeitung.....	226
3.1.4 Aufbringen der Belastungen Zug/Druck, Torsion und Temperatur.....	227
3.2 Bau und Erprobung der Heizanlage.....	229
3.3 Berechnung von Spannungen und Verschiebun- gen in außerschulternden, axialbelasteten Gewindeverbindern.....	230
3.3.1 Problemstellung.....	230
3.3.2 Bekannte Rechenverfahren zur Bestimmung der Lastverteilung in Schrauben-Mutter-Verbin- dern.....	231
3.3.3 Beschreibung eines neuen Rechenverfahrens für außerschulternde Gewindeverbinder.....	232
3.3.3.1 Axial-, Radial- und Tangentialspannungen in Muffe und Zapfen.....	234
3.3.3.2 Radialverschiebung von Muffe und Zapfen.....	235
3.3.3.3 Axialverschiebungen von Muffe und Zapfen.....	236
3.3.3.4 Bestimmung der Streckenlast.....	237
3.3.3.5 Berechnung der Restschulterkraft.....	239
4. Literaturverzeichnis.....	241
5. Symbolverzeichnis.....	242



1. EINLEITUNG

Für die Wirtschaftlichkeit der Bohrphase wird es von entscheidender Bedeutung sein, daß die Ein- und Ausbauarbeiten des Bohrstranges (Roundtrip) zum Meißelwechsel optimiert werden, was in diesem Fall bedeutet, möglichst kurze Zeiten für den Arbeitsprozeß anzustreben. Neben der weitgehenden Mechanisierung der Gestängehandhabung während des Ein- und Ausbaues kommt der eigentlichen Hebewerksleistung eine besondere Bedeutung zu. Da das Gestänge in Einheitslängen von 3 - 4 Normalgestängelängen, also 27 - 36 m, entschraubt und abgestellt werden muß, besteht die Hebewerksarbeit darin, die Masse des Bohrstranges beim Abfahren aus der Ruheposition in den Abfanggeräten (Keilen bzw. Elevatoren) auf eine maximale Ausbaugeschwindigkeit zu beschleunigen. Die Bestrebung im KTB-Projekt ist es, nach Möglichkeit Leichtgestänge einzusetzen, um die Masse des Bohrstranges auch bei extremen Teufen möglichst gering zu halten. Diese neuartigen Leichtgestänge können als Aluminium- oder Titanlegierungen oder als sogenannte Verbundrohrsysteme (Composite) ausgeführt sein. Während der Rohrkörper aus Leichtwerkstoffen besteht, ist es z.Zt. und in den nächsten Jahren mit Sicherheit nicht zu erwarten, daß auch der Rohrverbinder aus einem anderen Material als aus hochfestem Stahl bestehen wird, um die hohen Spannungen aus der Kraftverschraubung und den Betriebslasten zu beherrschen. Für die Ausführung der Bohrgestänge in Leichtbauweise besteht das besondere Problem darin, die Verbindung zwischen dem Rohrkörper und dem Gewindeverbinder so zu gestalten, daß dieser Bereich keine Schwachstelle des Systems bedeutet. Durch Bau und Betrieb einer speziellen Prüfanlage soll die Entwicklung von Leichtgestänge und Prüfung ihrer Zuverlässigkeit gefördert bzw. ermöglicht werden.

2. PROJEKTZIELE

Das gesamte Vorhaben gliedert sich in folgende Arbeitsschritte (AS).

AS 1 Bau und Erprobung einer Prüfanlage für Bohrgestänge und Bohrstrangelemente (Stabilisatoren, Packer, Zielbohrstangen usw.) mit einer Zug- bzw. Druckkapazität von 20 MN.

AS 2 Bau und Erprobung einer Heizanlage für die Rohrprüfanlage bis 350 °C.

- AS 3 Durchführung von Untersuchungen zur Belastbarkeit von Gestängerohren.
- AS 4 Berechnung von Verbinderfestigkeiten für verschraubbare Verbundrohrsysteme (Composite).
- AS 5 Verhalten von Gewindefetten unter hohen Temperaturen in hochbelasteten Gewindeverbindern.
- AS 6 Erfahrungsaustausch mit anderen internationalen Tiefbohrforschungsprojekten, wie Ocean Drilling Projekt (ODP), Hot Dry Rock (HDR), Internationales Lithosphärenprojekt (ILP) sowie Erfahrungsaustausch mit Bohr- und Zulieferfirmen der Erdölindustrie.
- AS 7 Berichtswesen und Dokumentation über Forschungsergebnisse.

Als Planungshilfe dient der Balkenplan in Abbildung 1.

3. STAND DES PROJEKTES

3.1 Bau und Erprobung der Rohrprüfanlage RP 5

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde die Konstruktion der Rohrprüfanlage vorgenommen, in einer weiteren die notwendigen Steuer- und Regelkreise zum automatischen Betrieb der Prüfanlage dargelegt und überarbeitet.

Die Firma ITAG in Celle ist mit dem Bau der Anlagenteile beauftragt worden. Die Steuer- und Regelanlage für die Rohrprüfanlage wird Firma Erismann/Bern ausführen. Die Montage der einzelnen Baugruppen im Prüfkeller sowie die elektrische und hydraulische Anbindung an die bereits vorhandenen Prüfanlagen erfolgt zur Zeit durch das ITE.

3.1.1 Beschreibung der Rohrprüfanlage

Die wesentliche Anforderung an die Rohrprüfanlage ist die Belastbarkeit der Prüfkörper unter betriebsnahen Bedingungen. Dazu gehören statische und dynamische Belastungen durch Zug, Druck und Torsion. Weiterhin sollen Belastungen durch Temperatureinflüsse untersucht werden können.

3.1.1.1 Technische Daten

Aus den obigen Forderungen resultiert die Entwicklung einer kompakten Rohrprüfanlage mit folgenden Betriebsdaten:

statische Belastungen:

max. statische Axialkraft	$F_{ax, stat}$:	20 MN
max. statische Torsionsmoment	M_{stat}	:	70 000 Nm
max. Temperaturbelastung	T	:	350 °C

kombinierte Belastungen:

statische Axialkraft +	$F_{ax, stat}$:	8 MN
statisches Torsionsmoment	M_{stat}	:	+ 70 000 Nm
statische Axialkraft +	$F_{ax, stat}$:	8 MN
schwellendes Torsionsmoment	M_{dyn}	:	+ 20 000 Nm

Zur Gewährleistung der technischen Daten der Rohrprüfanlage ist eine sorgfältige Auslegung der Einzelkomponenten erforderlich. Da die genauen Berechnungen zur Festigkeitsabschätzung /1/, die Berechnungen unter Berücksichtigung des Bruchereignisses sowie ein Hydraulikplan zur Steuerung des Hauptzylinders /2/ vorliegen, soll im folgenden Abschnitt ein Überblick über den Aufbau der Prüfanlage gegeben werden. Dabei wird auf die für die Steuerung und Regelung wichtigen Komponenten genauer eingegangen.

3.1.1.2 Aufbau der Rohrprüfanlage

Abbildung 2 zeigt schematisch einen axialen Schnitt durch die im Keller installierte Rohrprüfanlage. Sie besteht im Grundgerüst aus einer oberen und einer unteren Tragplatte, die durch vier Säulen miteinander verbunden sind. Die Säulen sind so dimensioniert, daß sie die Kräfte des Widerlagers gegenüber den in den Prüfkörper eingeleiteten Axialkräften aufnehmen können.

Die Verankerung der Säulen in den beiden Tragplatten erlaubt keine axiale Bewegung der Platten. Der Hochdruckzylinder für das Aufbringen der Zug- und Druckbelastungen ist in der unteren Tragplatte installiert, das Widerlager für diese Belastungen befindet sich in der oberen Tragplatte. Der Einbau eines Pendelrollenlagers ermöglicht durch die Drehbarkeit des Widerlagers, Zugversuche mit gleichzeitiger Torsionsbelastung zu realisieren. Die Verwendung dieses Lagers reduziert jedoch die Zugkraft auf 8 MN. Es wird bei reinen Zugversuchen bis 20 MN durch einen entsprechend dimensionierten Stützring ersetzt.

Das Maschinenelement besteht aus einer von vier Säulen getragenen oberen Platte, die durch schwere Träger versteift ist und auf der als Verbindungselemente zur unteren Trag-

platte des Prüfrahmens Gummielemente installiert sind. Diese Verbindungselemente müssen geeignet sein, Schwingungsanregungen durch die Hydraulikanlage zu dämpfen und beim Bruch eines Prüfkörpers einen Teil der freiwerdenden Energie aufzufangen. Zur zusätzlichen Stabilisierung werden die Säulen mit schweren Profilstählen verstärkt. Die Verbindungen dieser Säulen mit der oberen und der unteren Platte sind als Schweißverbindungen ausgeführt. An die untere Platte werden weitere Bleche angeschweißt, die im Fundament einbetoniert werden.

Zum Abfangen des Stoßes beim Bruchereignis reichen die Gummielemente allein nicht aus. Die Drosselung des Ölstromes, der durch die Bewegung des Kolbens aus der vorher unbelasteten Kammer des Prüfzylinders verdrängt wird, bewirkt den Aufbau eines Gegendruckes, der den Kolben sehr schnell nach dem Bruchereignis wieder abbremst und dadurch ein hartes Aufschlagen des Kolbens auf den Zylinderboden verhindert. Realisiert wird diese Dämpfung durch den Einbau von drosselnden Wegeventilen. Als weitere Maßnahme zur Dämpfung der freiwerdenden Energie beim Bruchereignis werden direkt unter dem Zylinder Kanthölzer im Kreuzverband gestapelt. Diese einfache und kostengünstige Lösung begrenzt das Einfedern der Anlage und bewirkt, daß ein großer Teil der übertragenen Energie in Verformungsenergie im Holz umgesetzt wird /2/.

Eine weitere Möglichkeit, die Bewegung des Kolbens zu dämpfen, hat sich bei der 100 MN Prüfanlage der Materialprüfanstalt (MPA) in Stuttgart bereits bewährt. Beim Bruchereignis verdrängt der Zugkolben das Öl auf der auf Dämpfungsdruck vorbelasteten Seite des Hauptkolbens in ein Dämpfungssystem. Es besteht aus 6 Zylindern, die mit Stickstoff auf 4 MPa vorgespannt sind und die durch die Kompressibilität des Gases den Druckstoß des Öls aufnehmen. Dieses System hat sich neben der mechanischen Dämpfung des Kolbens vor Erreichen des Zylinderbodens und dem Einsatz eines druckgesteuerten Öldrosselsystems für die untere Zylinderkammer als besonders wirkungsvoll erwiesen.

Die Prüfkörper werden zur Durchführung der Versuche für den Einbau in die Prüfanlage an beiden Enden in entsprechende Adapter eingeschraubt, die durch Klammerverschlüsse mit dem Widerlager und der Kolbenstange verbunden werden. Der Einbau der Prüfkörper erfolgt von oben durch die obere Grundplatte bei herausgenommenem Widerlager.

3.1.2 Versuchsprogramme und Meßwerterfassung

Die Versuchsbelastungen, die in verschiedenen Kombinationen mit der Prüfanlage gefahren werden sollen, sind in Abbildung 3 dargestellt:

1. Anfahren einer vorgegebenen Zug/Druckkraft F_x in einer bestimmten Zeit t_x und diese Kraft halten.
2. Anfahren einer vorgegebenen Zug/Druckkraft F_x in einer bestimmten Zeit t_x mit anschließender schwellender Beanspruchung.
3. Beanspruchungen durch Temperaturwechselbelastungen, wobei die Elongation bzw. Kompression des Prüfkörpers zu Null gehalten wird.

Die Versuchsbelastungen 1 und 2 können ebenfalls mit Temperaturbeanspruchung gefahren werden. Das zusätzliche Aufbringen von Torsionsmomenten ist bei allen drei Versuchen anwendbar.

Stell- und Regelgrößen für die Versuchsdurchführung sind:

P_1 , P_2 Kammerdrücke der Anlage,
T Temperatur,
M Torsionsmoment.

Bei der Rohrprüfanlage ist der Regler in Form einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgeführt und beinhaltet die Meß- und Korrekturereinrichtung. Bei dieser Steuerungsart wird das Steuerprogramm als eine Reihe von Anweisungen in einem Programmspeicher abgelegt. Die Anweisungen werden von einem Steuerwerk, dem Prozessor, zyklisch, das heißt in wiederholten Durchgängen, gelesen und zur Ausführung an die betreffende Stelle der Steuereinheit weitergeleitet. Die Struktur speicherprogrammierbarer Steuerungen ist der Struktur von Prozeßrechnern vergleichbar. Prozessor, Speichereinheit und die Ein- und Ausgabeperipherie sind über ein gemeinsames Bus-System miteinander verbunden /3/. Die Programmierung oder Änderung von Programmen erfolgt mit Hilfe einer externen Programmierereinrichtung, die das fertige Programm über eine RS 232 Standardcomputerschnittstelle in den Programmspeicher des Controllers überträgt.

Das Kernstück der Steuer- und Regeleinheit der Rohrprüfanlage bildet der Controller für die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Er wird von einem IBM kompatiblen Computer gespeist, dabei werden die Sollwerte über die Tastatur dieses Rechners eingegeben und das betreffende Programm wird in den Programmspeicher der SPS übertragen. Gleichzeitig mit den Sollwerten werden die Istwerte nach dem Auslesen aus dem Controller in einem auf dem Monitor dargestellten Blockschaltbild kontinuierlich angezeigt. Die Übertragung der Daten und Programme zwischen dem Computer und dem Controller erfolgt über eine digitale Input/Output Karte (Abb. 4).

3.1.3 Meßwerterfassung und Verarbeitung

Die Meßgrößen während der Versuchsdurchführung sind wie folgt:

P ₁ , P ₂	Kammerdrücke der Anlage,
T	Temperatur,
M	Torsionsmoment,
s	Kompression und Elongation.

Die Meßwerterfassung und Auswertung stellt den zweiten Block im Steuer- und Meßsystem der Rohrprüfanlage dar (Abb. 5). Über eine RS 232 Schnittstelle werden die Meßgrößen Kammerdruck, Temperatur, Torsionsmoment und Elongation bzw. Kompression von Controller auf einen Linienschreiber Linseis L 2100 übertragen und in Form eines Meßschriebes als Funktion der Zeit in Farbe aufgezeichnet. Der Schreiber ist mit einer Zeitkompensation für die Aufzeichnung mehrerer Kanäle ausgerüstet und besitzt eine V.24 Computerschnittstelle. Über die Schnittstelle erfolgt die gleichzeitige digitale Speicherung der Daten des Linienschreibers auf der Festplatte des angeschlossenen Personalcomputers.

Die Steuerung der Datenerfassung sowie die Speicherung der Meßdaten erfolgt in der Einfahrphase mit dem angepaßten Meßwerterfassungsprogramm V-Term III. Um die Daten der weiteren Verarbeitung durch andere Programme zugänglich zu machen, werden sie als eine sequentielle Datei im ASCII-Format auf der Festplatte des Computers gespeichert. Für die anschließende Versuchsdurchführung ist ein auf die Versuchsanlage abgestimmtes Meßwerterfassungsprogramm zu entwickeln. Bei der Programmierung des Meßwerterfassungsprogrammes ist aufgrund der Menge von Meßwerten darauf zu achten, daß der Speicherplatz möglichst optimal genutzt wird. Daher muß das Programm selbstständig eine Versuchspause erkennen, die Aufzeichnung von Meßwerten unterbrechen und bei Versuchsführung die Meßwerterfassung wieder aufnehmen. Die für diese Steuerung notwendigen Informationen erhält das Programm über den Papiervorschub des Linienschreibers, der dem zeitlichen Ablauf des Versuches entspricht /4/.

Die Auswertung und Darstellung der Versuchsdaten in Form von farbigen Meßschrieben ist auf zwei Arten möglich. Die erste Möglichkeit ist die Reproduktion der Meßwerte vom Rechner auf den Linienschreiber. Hierbei simuliert der Rechner die Versuchsanlage. Man erhält so eine genaue Kopie des Originalschriebes. Da diese Form der Darstellung jedoch einer weiteren Bearbeitung durch Beschriftungen mit Etiketten bedarf, sollte sie nur auf besonderen Wunsch gewählt werden /4/.

Die zweite Form der Darstellung nutzt die Möglichkeit der Selektion bestimmter Daten, die zur Darstellung gebracht werden sollen. Auch von der Möglichkeit, nur Teilbereiche des ganzen Versuchs auszuwerten, kann Gebrauch gemacht werden. Die Darstellung der Meßergebnisse in Farbe wird durch die Ausgabe auf einem HP 7475 Plotter ermöglicht. Meßwertlisten sowie Ergebnistabellen können über einen NEC P6 Drucker ausgegeben werden.

Die Auswertung der Meßwerte bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten. So können einzelne Meßgrößen als Funktion der Zeit oder in Abhängigkeit anderer Parameter dargestellt werden. Dazu eignet sich zunächst mit entsprechender Anpassung die Verwendung des Programmes Lotus-Symphonie. Als Beispiel soll hier das bekannte Spannungs-Dehnungsdiagramm des Prüfkörperwerkstoffes genannt werden, bei dem die Zugkraft über die Dehnung aufgetragen wird. Besonders die Veränderung der Materialeigenschaften nach thermischer Belastung lassen sich an der Diagrammform erkennen. Die Berücksichtigung der Geometrie des Prüfkörpers ermöglicht eine Ermittlung der Spannungsverteilung und liefert Informationen über weitere Materialkennwerte.

Andere Darstellungen sind das Kraft-Temperatur Diagramm, das Rückschlüsse auf die im Prüfkörper auftretenden Spannungen zuläßt und deren Auswertung in /5/ detaillierter beschrieben wird, oder das Kraft-Zeit Diagramm, das Aussagen über das Relaxationsverhalten des eingesetzten Materials liefert.

Die eingesetzten Auswertungsmöglichkeiten hängen von den geforderten Untersuchungen ab. Wie umfangreich die Ergebnisse ausgewertet werden können, zeigt sich bei der MPA in Stuttgart in Form einer eigenen Abteilung, die sich nur mit der Auswertung der Versuchsdaten beschäftigt.

3.1.4 Aufbringen der Belastungen Zug/Druck, Torsion und Temperatur

Die Realisierung der auf den Prüfkörper wirkenden Belastungen wird im folgenden vorgestellt.

Die Zugkraft wird hydraulisch aufgebracht. Dazu steht ein Hydraulikaggregat mit einem maximalen Druck von 150 MPa und einer Leistung von 10 kW zur Verfügung. Der Hauptzylinder der Prüfanlage ist doppelt wirkend ausgeführt und erlaubt dadurch ein Verfahren des Kolbens und damit der unteren Prüfkörperhalterung nach oben und unten. Aus der geforderten Zugkraft der Prüfanlage und dem verfügbaren Hydraulikdruck resultiert unter Berücksichtigung der Materialfestigkeiten /6/ ein Kolbendurchmesser von 500 mm und ein Schaftdurchmesser von 280 mm. Der maximale Druck bei Zugbelastung in der oberen Zylinderkammer beträgt 150 MPa, für die untere Kammer ist

wegen der größeren wirksamen Kolbenfläche nur ein Druck von 105 MPa zum Aufbringen der 20 MN erforderlich.

Da für den Betrieb der Rohrprüfanlage, besonders für die Steuerung, der alleinige Einsatz von Hochdruckhydraulik nicht wirtschaftlich ist, wird mit einem Hoch- und einem Niederdruckkreis gearbeitet /7/. Für den Hochdruckkreis, der zum Aufbringen der hohen Zug- und Druckbelastungen benötigt wird, ergibt sich beim maximalem Druck von 150 MPa ein Volumenstrom von 4 l/min. Dieser geringe Volumenstrom hat den Nachteil der großen Zeitdauer für die Bewegung des Prüfkolbens. Daher hat sich der Einsatz eines Niederdruckkreises mit nur 15 MPa, aber dem zehnfachen Volumenstrom von 40 l/min als sinnvoll erwiesen. Beim Betrieb fördert die Niederdruckpumpe in die jeweilige Kammer bis zum Erreichen des maximalen Druckes und schaltet dann auf drucklosen Umlauf. Gleichzeitig beginnt die Förderung der Hochdruckpumpe bis zum gewünschten Enddruck /7/. Da für den Hochdruckbereich nur Drosseln, Rückschlagventile und Ventile in den Stellungen auf/zu verfügbar sind, treten besonders bei der Steuerung für diesen Druckbereich Schwierigkeiten auf.

Der Niederdruckteil hat nicht nur die Aufgabe, den Prüfzylinder beim Hochfahren auf Belastung mit Öl zu versorgen, er dient auch zum Spannen und Lösen der Rohrhalteköpfe. Die Klammerverschlüsse bestehen aus zwei Segmenten, die mit zwei Hydraulikzylindern geöffnet und geschlossen werden können. Um einen möglichst gleichmäßigen Hub zu erreichen, sind die Zylinder parallel geschaltet und werden über einen Stromteiler gesteuert. Der Betriebsdruck wird auf 10 MPa begrenzt und bewirkt eine Anpreßkraft der Klammern von 75,4 kN.

Das Aufbringen der Torsionsbelastung erfolgt ebenfalls durch die Druckversorgung aus dem Niederdruckbereich. Der Formschluß zwischen Widerlager und oberem Rohrhaltekopf wird durch das Einlegen einer Passfeder gewährleistet. Die Torsionsbelastung wird durch das Drehen des Widerlagers erreicht. Dazu ist auf dem Widerlager eine Verdrehvorrichtung montiert, bei der über Hebelarme und zwei Hydraulikzylinder ein dem Zylinderdruck proportionales Torsionsmoment eingeleitet wird. Die Zylinder der Verdrehvorrichtungen sind so dimensioniert, daß bei dem verfügbaren Druck das benötigte Torsionsmoment auf den Prüfkörper aufgebracht werden kann. Das Gegenlager für die Torsionsbelastung wird durch eine formschlüssig mit dem unteren Haltekopf verbundene Verdrehvorrichtung, zwei Hebelarmen mit Hydraulikzylindern, die an zwei Fixpunkten in der Versuchsgrube angeschlagen sind, gewährleistet. Die unteren Zylinder sind durch Hydraulikleitungen in der Form miteinander verbunden, daß an beiden Fixpunkten die gleichen Kräfte auftreten, um Biegebeanspruchungen des Prüfkörpers auszuschließen /1/.

3.2 Bau und Erprobung der Heizanlage

Zum Aufbringen von Temperaturwechselbelastungen auf den eingebauten Prüfkörper wird ein Heiz- und Kühlsystem installiert.

Das Heizsystem ist in Form einer Induktionsheizung ausgeführt. Der Induktionsgenerator wird von einem Motorteil, das über eine Dreieckschaltung aus dem vorhandenen Kraftstromnetz gespeist wird, betrieben. Der Generator liefert bei einer Spannung von 500 Volt und einer Frequenz von 9735 Hz eine Heizleistung von 100 kW. Die Erwärmung des Prüfkörpers erfolgt über eine Induktionsspirale, die vor dem Aufschrauben der Adapter über den Prüfkörper geschoben wird. Sie ist als dünnes Kupferrohr ausgeführt, das zur Kühlung von Wasser durchströmt wird. Der Durchmesser der einzusetzenden Kupferspule ist von den Prüfkörperabmessungen abhängig und wird zur Optimierung des Wirkungsgrades der Heizung entsprechend ausgewählt.

Die Induktionsheizung ist bereits installiert und wird zur Zeit in Kombination mit einer Kühleinrichtung zur Gewährleistung schneller Temperaturwechsel getestet.

Das Kühlsystem (Abb. 6) besteht aus einem zylindrischen Behälter, der um den Prüfkörper und die Induktionsspirale gelegt und abgedichtet wird. Im Boden des Zylinders befindet sich der Einlaß für das Kühlwasser, das mit einer Pumpe aus dem Kühltank durch den Zylinder und über den Überlauf in einen Zwischentank gelangt. Dieser Tank dient als Sammelbecken für das aus dem Zylinder ausfließende Kühlwasser und wird über eine schwimmergesteuerte Tauchpumpe in den Kühltank entleert. Um den Prüfkörper nach dem Aufheizen auf maximal 350°C in kurzer Zeit wieder Abkühlen zu können, ist eine hohe Pumprate von 300 - 500 l/min erforderlich. Für einen erneuten Heizvorgang nach dem Kühlen ist im Boden des Zylinders ein Ventil installiert, das das Ablassen des Wassers vor dem Einschalten der Induktionsheizung ermöglicht.

Versuche am Institut mit dieser Induktionsheizung haben gezeigt, daß die Abkühlung des Prüfkörpers bei Einsatz der Pumpe sehr schnell vor sich geht. Um jedoch auch längere Abkühlphasen zu realisieren, wurde das Kühlsystem um eine Bedüsungseinrichtung erweitert. Sie erlaubt, den Abkühlvorgang mit gleichen Temperaturschritten wie den Aufheizvorgang zu fahren. Dem Abkühlverhalten des Prüfkörpers folgend wird zunächst die Bedüsung zur Kühlung herangezogen, da zu Beginn ein großes Kühlgefälle vorliegt. Erst wenn die Abkühltemperatur bei der Bedüsung von dem vorgegebenen Wert abweicht, wird die Pumpe eingeschaltet und der Prüfkörper auf die untere Temperaturgrenze abgekühlt.

Die Steuerung der Temperaturzyklen erfolgt über einen programmierbaren Prozessor, der durch eine entsprechende Pro-

grammvorgabe sowohl in der Aufheizphase als auch beim Kühlvorgang das Durchfahren definierter Temperaturkurven erlaubt. Neben der manuellen Programmierung besteht die Möglichkeit, diesen Prozessor über eine Rechnerschnittstelle extern mit Steuerinformationen zu versorgen.

3.3 Berechnung von Spannungen und Verschiebungen in außerschulternden, axialbelasteten Gewindeverbindern

3.3.1 Problemstellung

Zur Ermittlung der Belastungs- und Spannungsverteilung in schulternden Gewindeverbindern können generell entweder experimentelle oder theoretische Untersuchungsmethoden angewendet werden. Experimentelle Untersuchungen lassen sich in zwei Gruppen aufteilen:

- Dehnungsmessungen
- spannungsoptische Untersuchungen an Modellgewinden.

Dehnungsmessungen weisen gegenüber der Spannungsoptik den wesentlichen Nachteil auf, daß mit ihnen nicht der gesamte Spannungszustand auch im Innern eines Bauteils erfaßt werden kann. Zusätzlich erfordert der komplexe Spannungszustand in Gewindeverbindern eine große Anzahl von Meßstellen, so daß Dehnungsmessungen für eine detaillierte Untersuchung kaum geeignet sind.

Bei spannungsoptischen Untersuchungen wird ein Modell des Verbinders aus einem durchsichtigen, optisch isotropen Material hergestellt. Dieses Modell wird erwärmt und dann mit dem vorgesehenen Verschraubmoment verschraubt. Je nach Problemstellung können zusätzliche Beanspruchungen aufgebracht werden. Durch langsames Abkühlen wird der Spannungszustand eingefroren, und das Modell wird in Schnitte zerlegt. Bei den anschließenden spannungsoptischen Untersuchungen wird einfarbiges, polarisiertes Licht verwendet, das durch Doppelbrechung helle und dunkle Zonen erzeugt. Der Verlauf dieser Isochromaten liefert qualitativ die Belastungsverteilung im Gewindeverbinder und den Ort von Spannungskonzentrationen.

Im Rahmen der theoretischen Spannungsanalyse hat die Methode der finiten Elemente (FEM) in den letzten Jahren weite Verbreitung gefunden.

Bei der Anwendung dieses Rechenverfahrens auf Gewindeverbindungen lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen mit entsprechend unterschiedlicher Zielsetzung unterscheiden:

- Diskretisierung des gesamten Gewindeverbindermodells in finite Elemente
- Modellbildung von Teilausschnitten besonders hoch beanspruchter Verbinderbereiche.

Finite-Elemente Analysen kompletter Gewindeverbindungen sind aufgrund der hohen Element-Knotenpunktzahl, die für die Berechnung der gesamten Struktur erforderlich ist, entsprechend aufwendig. Trotzdem können die kritischen Stellen der Verbindung, z.B. die Gewindegänge und der Schulterbereich nur grob dargestellt werden. Eine derartige Modellstudie kann daher nur den allgemeinen Belastungs- und Spannungszustand einer Verbindung erfassen, jedoch keine realistischen Aussagen über die Spannungskonzentration in den kritischen Bereichen liefern.

Im Gegensatz dazu wird in anderen Modellstudien auf die Darstellung des gesamten Verbinders verzichtet und statt dessen nur bestimmte Ausschnitte der Verbindung sehr feinmaschig unterteilt. Als Eingangsdaten werden für solche Untersuchungen allerdings die Nennspannung im Kernquerschnitt und der Traganteil des Gewindeganges benötigt, da die Kerbwirkung durch die Gewindegänge nicht nur eine Funktion der Kerbgeometrie ist.

Die Gesamtspannungsverteilung in einem Verbinder, die als Eingangsgröße für eine detaillierte Untersuchung kritischer Bereiche notwendig ist, kann durch analytische Berechnungsverfahren erfolgen, wie sie für Schrauben-Mutter-Verbindungen bereits bekannt sind. Analytische Verfahren weisen gegenüber FEM-Untersuchungen den Vorteil wesentlich geringeren Rechenaufwandes auf, was sie insbesondere für Parameterstudien geeignet erscheinen läßt.

3.3.2 Bekannte Rechenverfahren zur Bestimmung der Lastverteilung in Schrauben-Mutter-Verbindungen

In der Vergangenheit haben sich zahlreiche Autoren mit der Lastverteilung in Schrauben-Mutter-Verbindungen befaßt. Jaquet /7/ hat als erster darauf hingewiesen, daß infolge der elastischen Eigenschaften von Schraube und Mutter die einzelnen Gewindegänge nicht gleichmäßig belastet werden.

In den dreißiger Jahren gelang Maduschka /8/ erstmals die Berechnung der Lastverteilung über der Gewindelänge mit Hilfe der Differenzenrechnung. Da sich im belasteten Zustand die Steigung von Schraube und Mutter unterschiedlich ändert, greift die Verbindung nur noch unter Zwang ineineinander. Die Dehnungsdifferenzen von Schraube und Mutter können nur durch eine Verformung der Gewindegänge ausgeglichen werden. Diese Überlegung liefert den Ansatz für das Berechnungsverfahren nach Maduschka, der die relative axiale Verschiebung der Ge-

windegänge gegeneinander mit der elastischen Verformung der Gewindegänge gleichsetzt.

Birger benutzt zwar auch den Ansatz von Maduschka zur Berechnung der Lastverteilung über der Gewindelänge, er beschreibt jedoch die Zahnflankenbelastung nicht als diskrete Einzelkräfte, sondern legt eine am Kernzylinder angreifend gedachte, axial wirkende Streckenlast zugrunde. Sein Berechnungsverfahren bietet den Vorteil, daß es zu einer geschlossenen Lösung führt und damit eine einfache und schnelle Bestimmung der Lastverteilung und der daraus resultierenden Spannungsverteilung ermöglicht.

Schulternde Rohrgewinde werden durch das Verschrauben gegen einen Stoß ungleichartig belastet. Dabei wird bei einem außerschulternden Verbinder der Zapfen gedehnt und die Muffe gestaucht. Axiale Betriebskräfte führen zu einer gleichsinnigen Dehnung von Muffe und Zapfen, so daß die Gesamtbelastung durch Verschrauben und axiale Betriebskräfte als Superposition beider Belastungsfälle gefunden werden kann. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Schulterkraft, die durch das Verschraubmoment am Stoß erzeugt wird, nicht konstant bleibt, sondern eine Funktion der axialen Betriebskraft ist.

In den nachfolgenden Betrachtungen werden die Berechnungen von Birger erweitert und auf schulternde Gewindeverbinder übertragen. Zusätzlich wird die aus Vorspannung und Betriebsbeanspruchung resultierende Restschulterkraft am Stoß unter der ungleichförmigen Gewindebelastung berechnet.

3.3.3 Beschreibung eines neuen Rechenverfahrens für außerschulternde Gewindeverbinder

Im folgenden wird ein Lösungsweg aufgezeigt, der es gestattet, Aussagen über die Beanspruchung schulternder Gewindeverbinder an beliebigen Querschnitten der Gewindelänge zu treffen. Das Verfahren führt zu einer geschlossenen Lösung und ermöglicht somit eine einfache und schnelle Bestimmung der Spannungen, der Verschiebungen und der Lastverteilung /9/.

Die Beschreibung der Methode erfolgt hier am Beispiel des außerschulternden Gewindeverbinders, für den Verbinder mit Innenschulter verläuft die Überlegung analog.

Die zentrale Idee der Methode besteht in einer Formulierung der Aufgabenstellung, die nur eine einzige, zunächst unbekannte Funktion enthält und mit deren Kenntnis sich die interessierenden Spannungen und Verschiebungen ermitteln lassen. Als diese zu bestimmende Funktion erweist sich nachfolgend die als Streckenlast formulierte Zahnflankenbelastung. Der Lösungsweg beginnt mit der Einführung der zunächst unbekanntesten Streckenlast und der Formulierung der Axial-, Radial-

und Tangentialspannungen in Muffe und Zapfen. Hier erweist sich, daß diese Spannungen bis auf die geometrischen Größen des Verbinders ausschließlich durch die angreifende Streckenlast bestimmt sind. Die Ermittlung des räumlichen Spannungszustandes ist somit bereits auf die Bestimmung der Streckenlast reduziert.

Unter Verwendung des Hookeschen Gesetzes ergeben sich im nächsten Schritt aus den Spannungen die Dehnungen. Durch anschließende Integration werden die Verschiebungen formuliert, die sich im wesentlichen ebenfalls als nur von der Streckenlast abhängig erweisen. Damit sind mit Kenntnis der Streckenlast auch die Verschiebungen bestimmbar.

Der dritte Schritt der Überlegungen führt über ein Verschiebungsgleichgewicht schließlich zur Bestimmung der gesuchten Streckenlast. Weil die durch die Axialkraft bedingte relative Axialverschiebung zwischen Muffe und Zapfen durch Gleiten auf den Zahnflanken und durch die Durchbiegung der Zähne ausgeglichen wird, entsteht eine Integralrechnung, deren Lösung die gesuchte Streckenlast darstellt. Damit sind dann zunächst Spannungen und Verschiebungen berechenbar.

Abschließend wird unter Zugrundelegung der aus dem Vorhergehenden resultierenden Gewindebelastung noch die Restschulterkraft bestimmt. Abweichend von dem sonst üblichen Verfahren wird diese hier nicht aus einem Verspannungsdiagramm entnommen, sondern es wird die ungleichförmige Axiallängung im Bereich der tragenden Gewindelänge berücksichtigt.

Abb. 7a zeigt die Geometrie des betrachteten, außenschulternen Verbindersmodells und die hier verwendeten Bezeichnungen der Bemaßungen. Es wird angenommen, daß Muffe und Zapfen aus dem gleichen linear-elastischen Material bestehen, also Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν für beide Bauteile gleich sind. Zwar ist das nachfolgend beschriebene Berechnungsverfahren auch auf unterschiedliche Materialeigenschaften von Muffe und Zapfen problemlos zu erweitern, in der getroffenen Annahme ist jedoch keine einschneidende Einschränkung der Darstellung zu sehen.

Durch den Innenradius R_1 des Zapfens, den Außenradius R_a der Muffe und den Pitchradius R_p des Gewindes sind die benötigten radialen Abmessungen des Modellbauteiles gegeben. Man beachte, daß diese drei Größen von der Axialkoordinate abhängig sein können.

Es erweist sich als günstig, statt der Radien die Querschnittsflächen von Muffe und Zapfen zu verwenden, die für die Muffe durch

$$(3.3.3-1) \quad A_m = (R_a^2 - R_p^2) \Pi$$

und für den Zapfen durch

$$(3.3.3-2) \quad A_z = (R_p^2 - R_i^2) \Pi$$

gegeben sind.

Mit der Steigung h , der tragenden Gewindelänge L und der Länge L_D des Dichtsitzes sind die hier erforderlichen axialen Bemaßungen genannt, so daß zunächst die wesentlichen Informationen über die Längenabmessung des Bauteils vorliegen. Zusätzliche Informationen, die von der Zahngeometrie benötigt werden, sind Abb. 7b zu entnehmen.

Der Belastungszustand des Modellverbinders wird durch äußere Kräfte charakterisiert. Hier sind mit F_T die axiale Zugkraft, mit F_V die durch Verschrauben hervorgerufene Vorspannkraft und mit F_S die noch von Axialzug und Vorspannung abhängige Restschulterkraft zu nennen. Diese Angaben über die aufgebrachte Last bilden zusammen mit den genannten Materialeigenschaften und den Bemaßungen des Modellverbinders die Eingangsdaten des nun beschriebenen Berechnungsverfahrens.

3.3.3.1 Axial-, Radial- und Tangentialspannungen in Muffe und Zapfen

Zunächst wird ein Koordinatensystem gemäß Abb. 7a definiert, dessen x -Achse mit der Symetrieachse des Verbinders identisch und dessen Nullpunkt mit dem Gewindeeinlauf des Zapfens ($x=0$) zusammenfällt. Ausgehend von Birgers Modellvorstellung wird die Zahnflankenbelastung als eine an dem Zapfen angreifend gedachte, axial wirkende Streckenlast $q(x)$ zugrundegelegt, die im Zuge der folgenden Rechnungen bestimmt wird.

Da der Gewindeeinlauf des Zapfens ($x=0$) frei von Axialspannungen ist, liefert dieser Ansatz für die Axialspannung in dem Zapfen

$$(3.3.3.1-1) \quad \sigma_x^z = \frac{\int_0^x q(\tilde{x}) d\tilde{x}}{A_z}$$

Durch Schnittführung an der Axialkoordinate x ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht die folgende Beziehung für die Axialspannung der Muffe:

$$(3.3.3.1-2) \quad \sigma_x^m = \frac{- \int_0^x q(\tilde{x}) d\tilde{x} + F_T}{A_m}$$

Die Berechnung der Radial- und Tangentialspannungen erfolgt mittels der Modellvorstellung von zwei Hohlzylindern, die durch radiale Überdeckung miteinander verbunden sind. Dadurch entsteht an der Kontaktstelle von Radius R_P eine Flächenpressung. Zu ihrer Ermittlung wird im Hinblick auf Abb. 7b die Streckenlast $q(x)$ an der tragenden Zahnflanke in Normal- und Radialkomponente zerlegt. Man findet für die Radialkomponente $q(x) \tan \beta$, so daß sich an der Berührungsfläche die Radialspannungen in Muffe und Zapfen als

$$(3.3.3.1-3) \quad \sigma_{R^m} = \sigma_{R^z} = - \frac{\tan \beta}{2 \pi R_P} q(x)$$

ergeben.

Die Flächenpressung wird für den äußeren Zylinder, die Muffe, als Innendruck und für den inneren Zylinder, den Zapfen, als Außendruck aufgefaßt. Für Muffe und Zapfen werden dann die Tangentialspannungen an der Berührfläche nach der Formel für dickwandige Zylinder berechnet. Man erhält für die Tangentialspannung in der Muffe

$$(3.3.3.1-4) \quad \sigma_{\theta^m} = \frac{\tan \beta}{2 \pi R_P} \frac{R_a^2 + R_P^2}{R_a^2 - R_P^2} q(x)$$

und für die Tangentialspannung im Zapfen

$$(3.3.3.1-5) \quad \sigma_{\theta^z} = - \frac{\tan \beta}{2 \pi R_P} \frac{R_P^2 + R_1^2}{R_P^2 - R_1^2} q(x)$$

Damit sind für Muffe und Zapfen die Axial-, Radial- und Tangentialspannungen bereits formuliert. Sie hängen bis auf geometrische Größen des Modellverbinders nur von der zunächst noch unbekanntem Streckenlast $q(x)$ ab und sind mit deren Kenntnis vollständig bestimmbar.

3.3.3.2 Radialverschiebung von Muffe und Zapfen

Die Radialkomponente der Streckenlast bewirkt durch die Flächenpressung eine Aufweitung der Muffe sowie eine Kontraktion des Zapfens und damit eine radiale Relativverformung von Muffe und Zapfen. Ihre Ermittlung aus den bereits formulierten Spannungen ist typisch für die gewählte Vorgehensweise. Bei dem hier vorliegenden rotationssymmetrischen Spannungszustand erhält man unter Verwendung des Hookschen Gesetzes als Zusammenhang zwischen der Tangentialdehnung ϵ_{θ} , der Radialverschiebung I_R und den Spannungen σ_x , σ_R , σ_{θ} die Beziehung

$$(3.3.3.2-1) \quad \varepsilon_{\varphi} = \frac{I_R}{R_P} = \frac{1}{E} (\sigma_{\varphi} - \nu \sigma_{R^z} - \nu \sigma_{x^m}) .$$

Löst man nach der Radialverschiebung auf, so ergibt sich für die Muffe

$$(3.3.3.2-2) \quad I_{R^m} = \frac{R_P}{E} (\sigma_{\varphi^m} - \nu \sigma_{R^m} - \nu \sigma_{x^m})$$

und analog für den Zapfen

$$(3.3.3.2-3) \quad I_{R^z} = \frac{R_P}{E} (\sigma_{\varphi^z} - \nu \sigma_{R^z} - \nu \sigma_{x^z})$$

Setzt man die in Abschnitt 3.8.3.1 bereits formulierten Spannungen ein, so ergibt sich nach geeigneter Zusammenfassung der geometrischen Größen die relative Radialverschiebung I_R zwischen Muffe und Zapfen als

(3.3.3.2-4)

$$I_R = I_{R^m} - I_{R^z} = \frac{R_P}{E} \left\{ R_P \tan \beta \left(\frac{1}{A_m} + \frac{1}{A_z} \right) q(x) - \nu \left(\frac{1}{A_m} + \frac{1}{A_z} \right) \int_0^x q(\tilde{x}) d\tilde{x} + \nu \frac{F_T}{A_z} \right\}$$

Bis auf vorgegebene Eingangsgrößen tritt in diesem Ausdruck wiederum nur die Streckenlast $q(x)$ auf.

3.3.3.3 Axialverschiebungen von Muffe und Zapfen

Zur Ermittlung des Gesamtbetrages der Axialverschiebung zwischen Zapfen- und Muffenteil der schulternden Verbindung müssen drei Anteile berücksichtigt werden:

1. Axialverschiebung aufgrund der axialen Komponente der Zahnflankenbelastung Δu
2. Axialverschiebung aufgrund der radialen Verschiebung von Zapfen und Muffe Δv und
3. Axialverschiebung durch Verformung der Gewindegänge Δw .

Diese drei Verschiebungsbeiträge lassen sich durch Überlegungen gewinnen, die denen in Abschnitt 3.3.1 ähnlich sind.

3.3.3.4 Bestimmung der Streckenlast

Im belasteten Zustand unterscheiden sich die Steigung von Zapfen und Muffe, so daß die Verbindung nur noch unter Zwang ineinandergreift. Die Verschiebungsdifferenzen von Muffe und Zapfen können durch eine Verformung der Gewindegänge ausgeglichen werden. Diese Überlegung liefert den Ansatz für das Berechnungsverfahren nach Maduschka /8/ und wird hier ebenfalls benutzt.

Die Axialkraft führt zu der Relativverschiebung Δu zwischen Muffe und Zapfen. Da die Gewindeflanken bei der Verformung in Kontakt bleiben, wird diese Längenänderung ausgeglichen durch die Axialverschiebung Δv bedingt durch das Gleiten auf der Zahnflanke und zum anderen durch die Durchbiegung Δw der Zähne.

Das Verschiebungsgleichgewicht lautet daher

$$(3.3.3.4-1) \quad \Delta u = \Delta v + \Delta w$$

Diese Beziehung bildet die wesentliche Grundlage der folgenden Überlegungen. Sie führen zur Bestimmung der Streckenlast, mit deren Kenntnis dann die Belastung der einzelnen Gewindegänge und die interessierenden Spannungen und Verschiebungen ermittelt werden.

Setzt man die in den vorherigen Abschnitten gewonnenen relativen Axialverschiebungen Δu , Δv und Δw in das Verschiebungsgleichgewicht (3.3.3.4-1) ein, so entsteht eine Integralgleichung, welche die Bestimmung der gesuchten Streckenlast $q(x)$ ermöglicht. Um die Darstellung nicht mit den Details der Rechnung zu belasten, sei der Lösungsgang lediglich kurz skizziert. Unter der Annahme, daß die Querschnitte A_m und A_z und der Pitchradius R_p in erster Näherung als konstant angesehen werden können, entsteht eine Volterrasche Integralgleichung zweiter Art, die durch Differentiation in eine gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung überführt wird. Unter Verwendung der beiden Geometriekonstanten

$$(3.3.3.4-2) \quad \tau = \sqrt{\frac{1}{A_m} + \frac{1}{A_z}},$$

$$(3.3.3.4-3) \quad \mu = \sqrt{\left(\frac{1}{A_m} + \frac{1}{A_z}\right) R_p^2 \tan^2 \beta + c h}$$

und unter Vorgabe einer am Gewindeauslauf des Zapfens, also bei $x=L$, für die einzelnen Belastungsfälle noch zu spezifizierenden Kraft $F_L = \int_0^L q(x) dx$ ergibt sich schließlich für die gesuchte Streckenlast

(3.3.3.4-4)

$$q(x) = \frac{1}{\tau \mu} \frac{1}{\sinh \frac{\tau}{\mu} L} \left[\frac{F_T}{A_m} \cosh \frac{\tau}{\mu} (L-x) + \left(-\frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \cosh \frac{\tau}{\mu} x \right]$$

An dieser Stelle wird der Vorteil der gewählten Vorgehensweise offensichtlich, weil alle interessierenden Größen nun unmittelbar zu ermitteln sind. Zunächst erhält man durch Integration der Streckenlast $q(x)$ über die Steigung h des Gewindes die Kraft $Q(x)$ auf die einzelnen Gewindegänge.

(3.3.3.4-5)

$$Q(x) = \int_x^{x+h} p(\tilde{x}) d\tilde{x} =$$

$$= \frac{2}{\tau^2} \frac{\sinh \frac{\tau h}{\mu}}{\mu} \left[\frac{F_T}{A_m} \cosh \frac{\tau}{\mu} \left(L-x - \frac{h}{2} \right) + \left(-\frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \cosh \frac{\tau}{\mu} \left(x + \frac{h}{2} \right) \right]$$

Zur Beurteilung des Verbinders unter Betriebsbeanspruchung werden weiterhin die Axialspannungen σ_x^m , σ_x^z in Muffe und Zapfen und die radiale Aufweitung I_R herangezogen. Diese sind mit Kenntnis der Streckenlast $q(x)$ explizit bestimmbar und seien an dieser Stelle genannt. Man findet für die Axialspannung in der Muffe

(3.3.3.4-6)

$$\sigma_x^m = \frac{-1}{A_m} \frac{2}{\tau^2} \frac{\sinh \frac{\tau h}{\mu}}{\mu} \left[\frac{F_T}{A_m} \cosh \frac{\tau}{\mu} \left(L - \frac{x}{2} \right) + \left(-\frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \cosh \frac{\tau}{\mu} \frac{x}{2} \right] + \frac{F_T}{A_m}$$

für die Axialspannung σ_x^z im Zapfen

(3.3.3.4-7)

$$\sigma_x^z = \frac{-1}{A_z} \frac{2}{\tau^2} \frac{\sinh \frac{\tau h}{\mu}}{\mu} \left[\frac{F_T}{A_m} \cosh \frac{\tau}{\mu} \left(L - \frac{x}{2} \right) + \left(-\frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \cosh \frac{\tau}{\mu} \frac{x}{2} \right]$$

und für die radiale Aufweitung

(3.3.3.4-8)

$$I_R = \frac{R_P}{E} \frac{1}{\sinh \frac{\tau}{\mu} L} \left\{ R_P \tan \beta \frac{\tau}{\mu} \frac{F_T}{A_m} \cosh \frac{\tau}{\mu} (L-x) + \left(- \frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \cosh \frac{\tau}{\mu} x \right\} - \left[\frac{F_T}{A_m} \sinh \frac{\tau}{\mu} (L-x) - \left(- \frac{F_T}{A_m} + \tau^2 F_L \right) \sinh \frac{\tau}{\mu} x \right] \nu$$

Nun ist noch die am Gewindeauslauf der Muffe herrschende Kraft F_L zu ermitteln. Für die beiden einfachen Belastungsfälle »reiner Axialzug« und »reine Vorspannung« kann sie direkt angegeben werden.

Im Fall »reiner Axialzug« ist das Gewinde lediglich handverschraubt und auf Zug belastet. Daher herrscht am Gewindeauslauf des Zapfens lediglich die axiale Zugkraft F_T , d.h. an der Stelle $x=L$ gilt $F_L = F_T$.

Im Fall »reine Vorspannung« ist das Gewinde kraftverschraubt, aber nicht auf Zug belastet. In diesem Fall gilt $F_T = 0$, und am Gewindeauslauf des Zapfens, also bei $x=L$, herrscht die Vorspannkraft $F_L = F_v$. Auf eine Umrechnung des Verschraubmomentes in die Vorspannkraft wird an dieser Stelle verzichtet, da hier von verschiedenen Autoren und Rohrherstellern unterschiedliche Gleichungen verwendet werden. Wird das Gewinde gegen die Schulter kraftverschraubt und anschließend auf Axialzug belastet, so ist der Einfluß der noch vom Axialzug abhängigen Restkraft am Stoß auf die Kraft am Gewindeauslauf zu berücksichtigen. Auf diese Situation wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

3.3.3.5 Berechnung der Restschulterkraft

Die praktische Berechnung der Restschulterkraft erfolgt im allgemeinen mit Hilfe eines Vorspannungsdiagramms. Muffe und Zapfen werden dabei als ein System linearer Federn betrachtet, so daß sich für die Restschulterkraft

$$(3.3.3.5-1) \quad F_s = F_v - \frac{A_z}{A_z + A_m} F_T$$

ergibt.

Dieses Rechenverfahren weist allerdings den Nachteil auf, daß die Kräfte, die in Muffe und Zapfen die entsprechenden Dehnungen verursachen, als von außen auf das Gewinde wirkende Kräfte betrachtet und die Axialdehnungen und -stauchungen über die Ortskoordinate x als konstant angesehen werden.

Berücksichtigt man zusätzlich die ungleichförmige Axialverschiebung im Bereich der tragenden Gewindelänge, wie das mit dem zuvor beschriebenen Verfahren möglich ist, so ergibt sich für die Restschulterkraft ein ähnlich gebauter Ausdruck, in dem jedoch die Geometrie des Verbinders detaillierter Berücksichtigung findet.

(3.3.3.5-2)

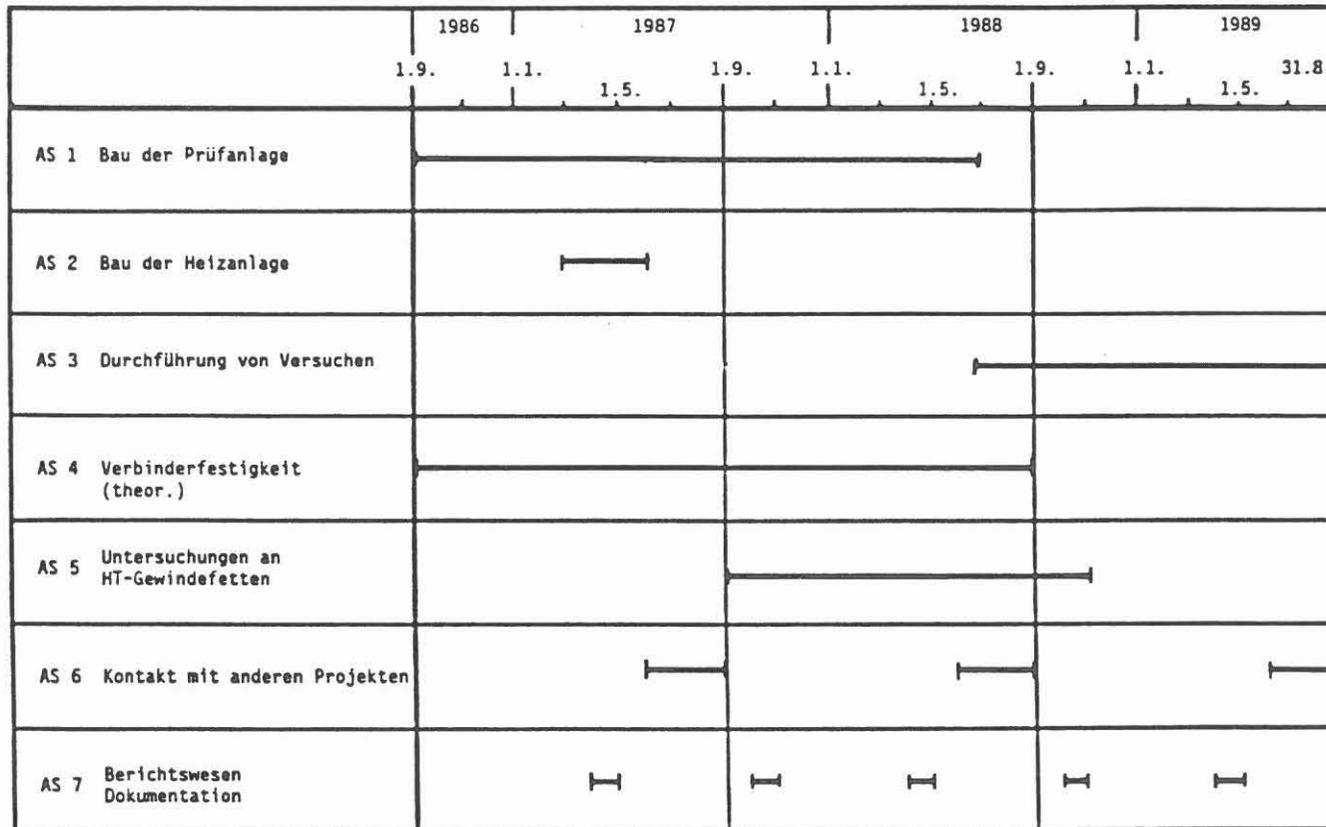
$$F_s = F_v - F_T \frac{\frac{\mu}{\tau} \frac{1}{A_z} \coth \frac{\tau}{\mu} L + \frac{\mu}{\tau} \frac{1}{A_m} \frac{1}{\sinh \tau/\mu L} + \tan \beta \frac{R_p}{A_z} + \frac{L_D}{A_z}}{\frac{\tau}{\mu} \coth \frac{\tau}{\mu} L + \tan \beta \frac{R_p}{\tau^2} + \frac{L_D}{\tau^2}}$$

4. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ BLECHSCHMIDT, J. : Bericht zur Festigkeitsabschätzung einer Rohrprüfeinrichtung des Instituts für Tiefbohrtechnik der TU Clausthal, Inst. f. Maschinenwesen der TU Clausthal, 8.11.1985
- /2/ Schinkel, L. : Konstruktion einer Rohrprüfanlage, Dipl. Arb., Inst. f. Tiefbohrtechnik der TU Clausthal, Oktober 1986
- /3/ Hengstenberg, J., Sturm, B., Winkler, O. : Messen, Steuern und Regeln in der chemischen Technik, Band IV, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York 1983
- /4/ KLEIN, R. : Auswertung von Untersuchungen an Ölfeldrohren sowie Erarbeitung von Vorschlägen für eine verbesserte Datenerfassung, Dokumentation und Berichtswesen auf diesem Gebiet Diplomarbeit ITE, Dez. 1986
- /5/ GÖTZEN, P. : Zur Beanspruchung von Futterrohren in Dampf-injektionsbohrungen, Dissertation ITE, 1986
- /6/ HAUKE, V. : Gasdichtheitsprüfungen an Ölfeldrohrverbindungen unter praxisnahen Bedingungen; Erdöl-Zeitschrift 75, 1959, 12, S.498-504
- /7/ JACQUET, E. : Über eine neuartige Schraubenverbindung; Schweiz, Bauzeitung 98, 1931, 17, S.207-210
- /8/ MADUSCHKA, L. : Beanspruchung von Schraubenverbindungen und zweckmäßige Gestaltung der Gewindeträger; Forsch. Ing. Wes. 7, 1936, 6, S.299-305
- /9/ SAGER, J. : Beitrag zur Ermittlung der Spannungsverteilung in schulternden, axial belasteten Gewindeverbindern; Diplomarbeit am Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung der TU Clausthal, November 1985

5. SYMBOLVERZEICHNIS

Variable	Wert / Dimension	Erklärung
A_m	mm ²	Querschnittsfläche der Muffe
$A_{s ch}$	mm ²	Querschnittsfläche der Schulter
A_z	mm ²	Querschnittsfläche des Zapfen
c	0,003048	Geometriekonstante
C_{ver}	--	Verbinderkonstante
d_i	mm	Innendurchmesser
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E_7	mm	Pitchdurchmesser
E_7	mm	Gewindeüberdeckung
F_l	N	Kraft im Gewindeauslauf
F_s	N	Restschulterkraft
F_t	N	Axialkraft
F_v	N	Vorspannkraft
$F_{v max}$	N	maximale Vorspannkraft
$F_{v min}$	N	minimale Vorspannkraft
F_y	N	errechnete minimale Streckgrenze
g	9,81 m/s ²	Erdbeschleunigung
l_{gew}	mm	Gewindelänge
l_{str}	m	Länge des Rohrstranges
m_g	kg/m	Massengradient
p	--	Gewindesteigung
p_y	bar	errechneter maximaler Innendruck
p'	N/mm ²	Geometriekonstante
T_{ges}	Nm	Verschraubmoment
T_{gew}	Nm	Gewindemoment
T_{sto}	Nm	Stoßmoment
R_a	mm	Außenradius der Muffe
R_i	mm	Innenradius des Zapfen
R_p	mm	Pitchdurchmesser des Gewindes
$R_{r m}$	mm	Referenzradius der Muffe
$R_{r z}$	mm	Referenzradius des Zapfen
$R_{s ch}$	mm	Schulterradius
s	mm	Verschraubweg in axialer Richtung
W	mm	Außendurchmesser der Muffe
α	°	Drehwinkel
β	°	Flankenwinkel
Π	3,14159	
ν	--	Querkontraktionszahl
$\sigma_{0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze
r	1/mm	Geometriekonstante
μ	--	Geometriekonstante
μ_{gew}	--	Reibbeiwert im Gewinde
μ_{sto}	--	Reibbeiwert am Stoß

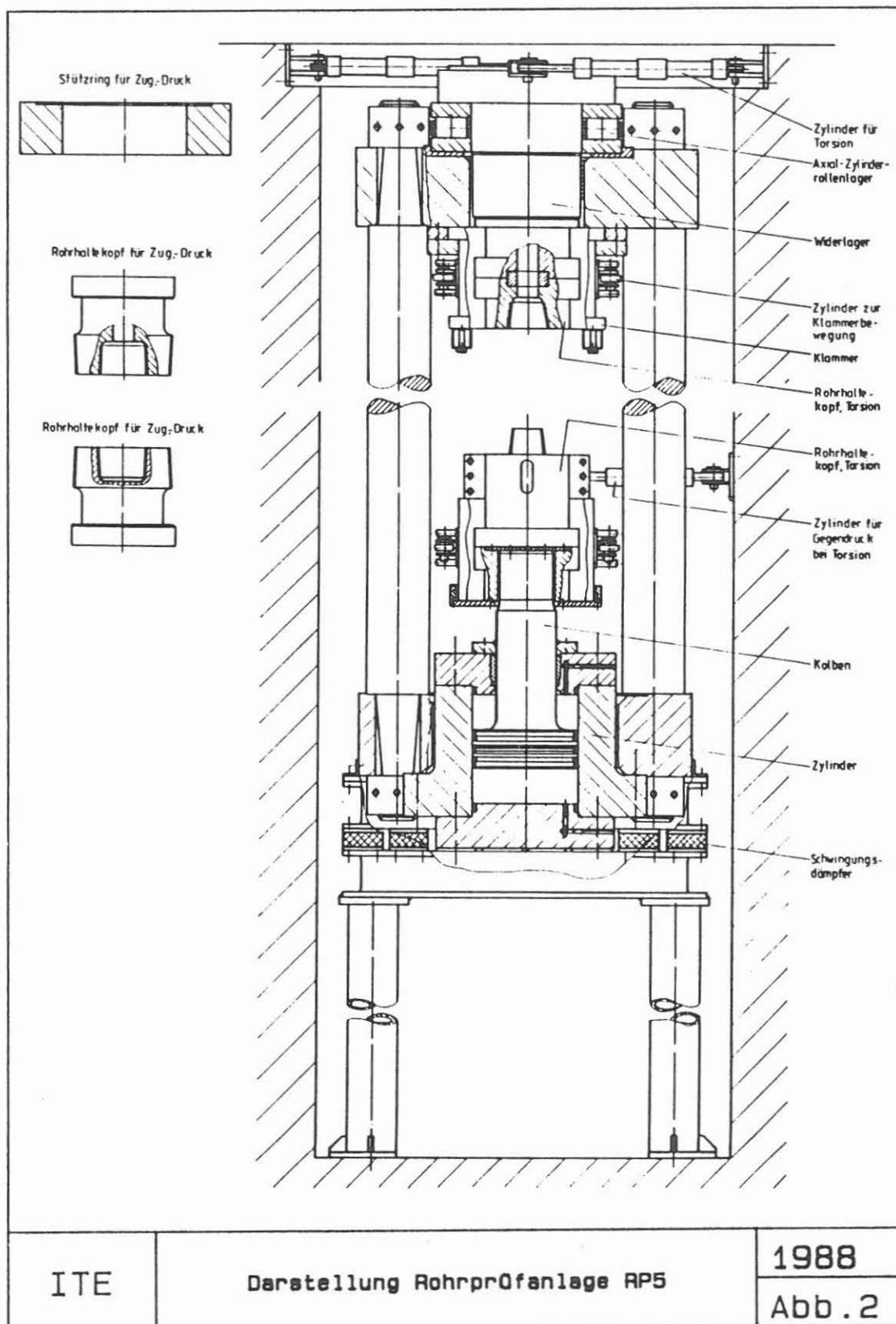


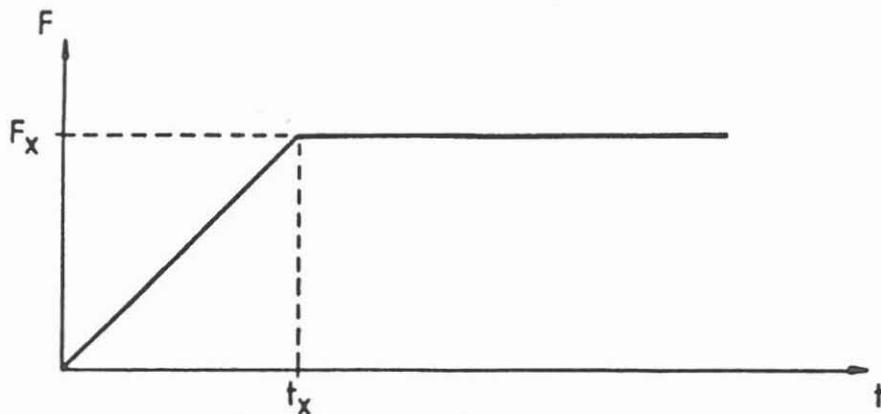
ITE

Projekttablauf im Balkendiagramm

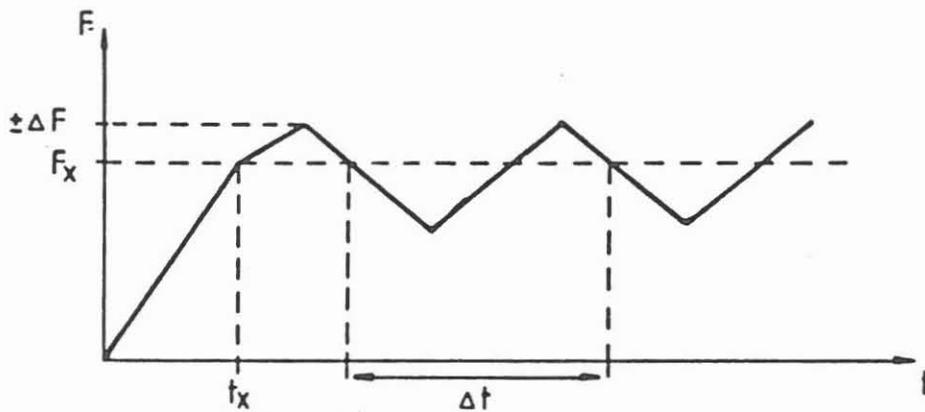
1988

Abb. 1

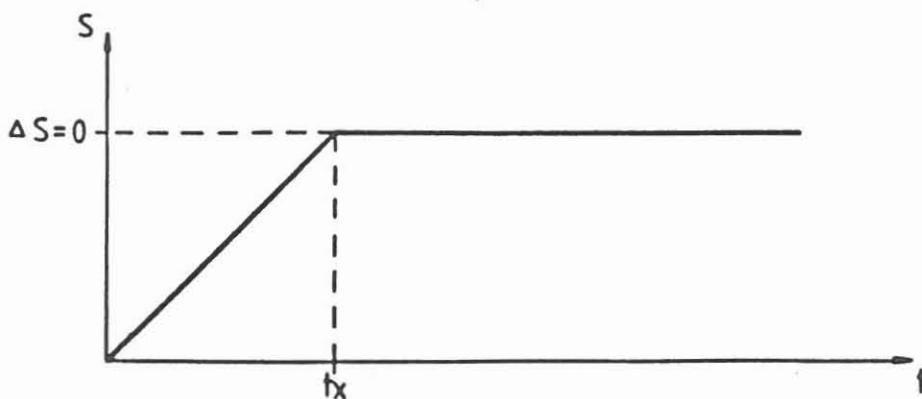




anfahrend einer Zug / Druckkraft

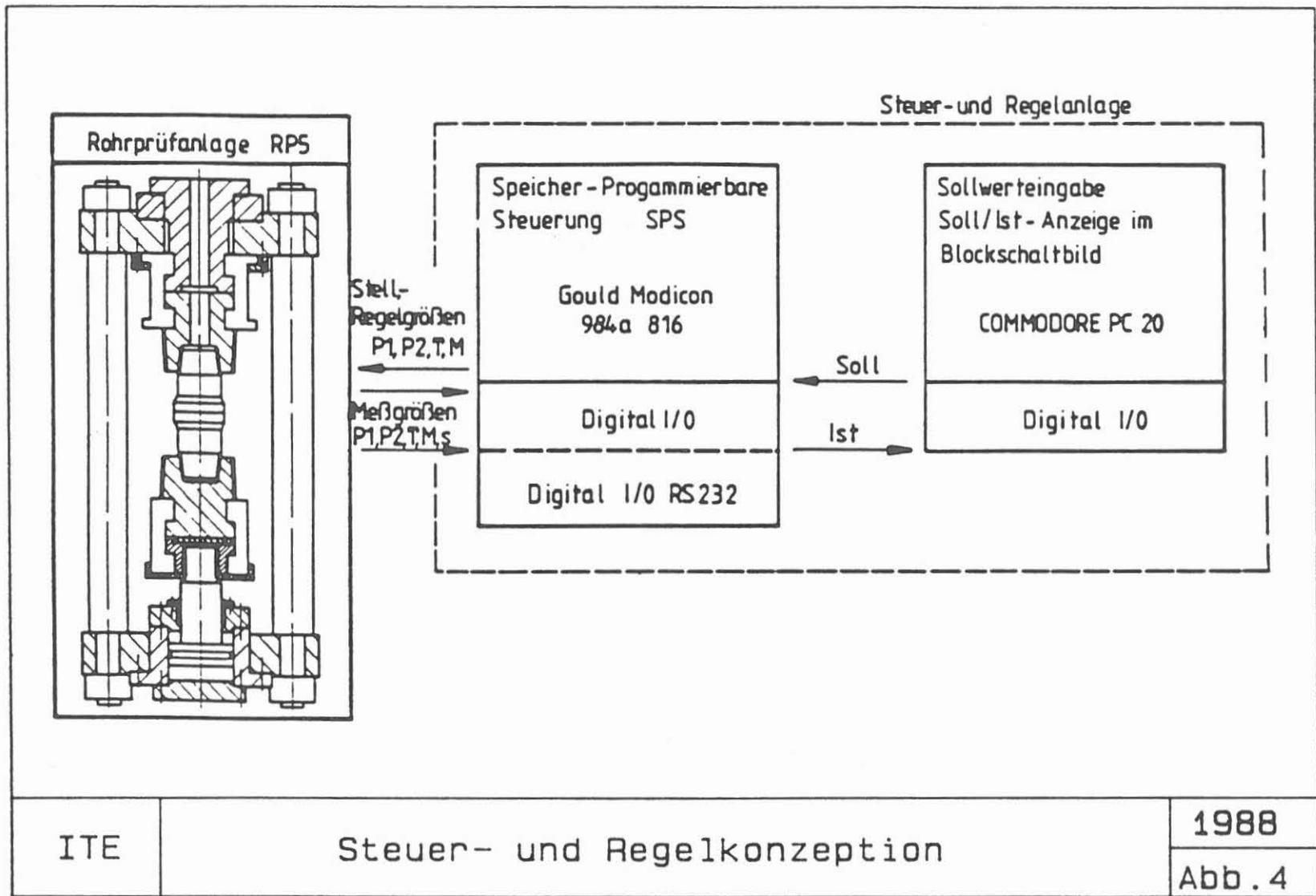


anfahrend einer Zug / Druckkraft mit anschließender
schwelliger Beanspruchung



bei Temperaturwechseln Elongation / Kompression $S = 0$

ITE	Prüfbelastungen	1988
		Abb. 3

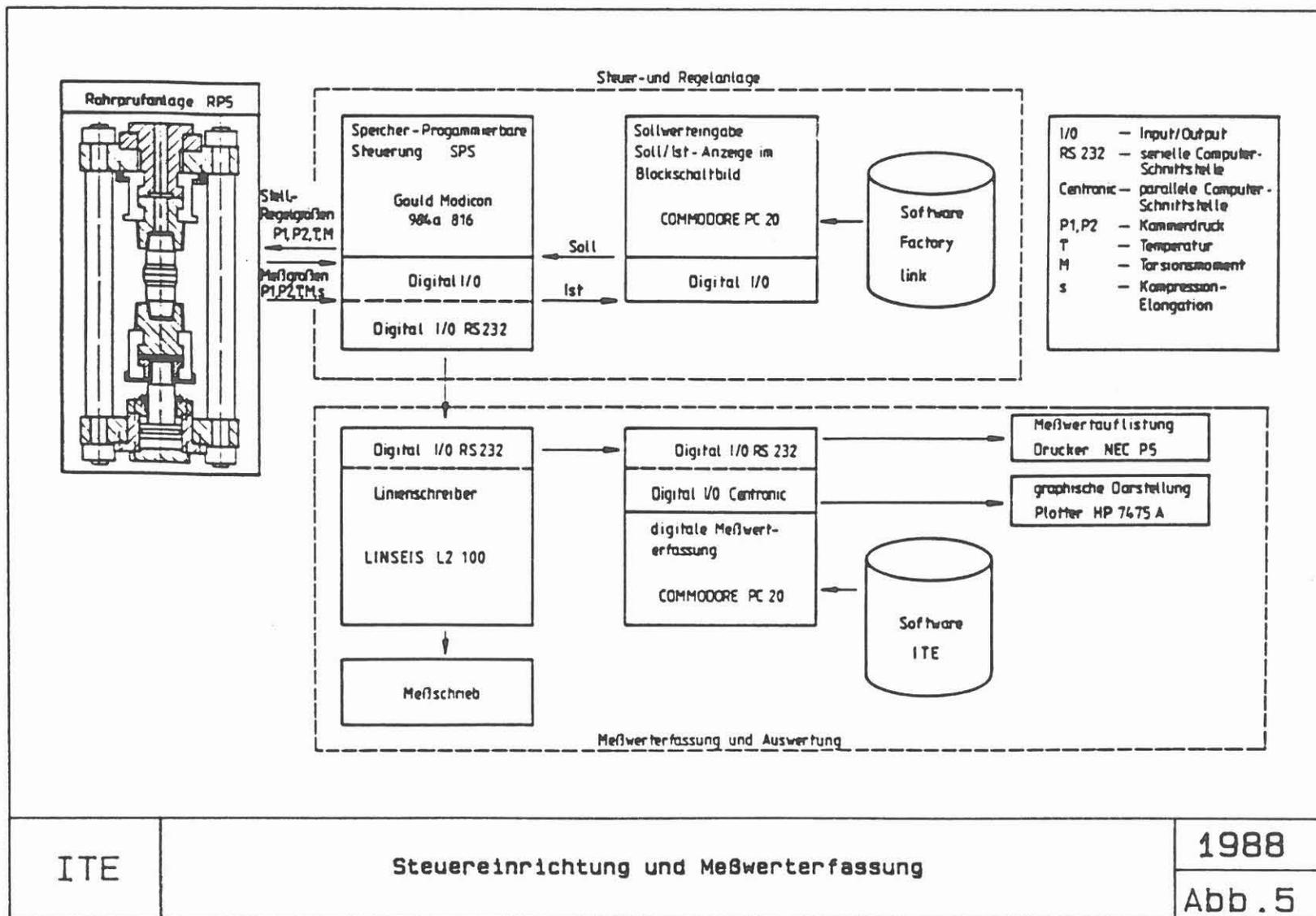


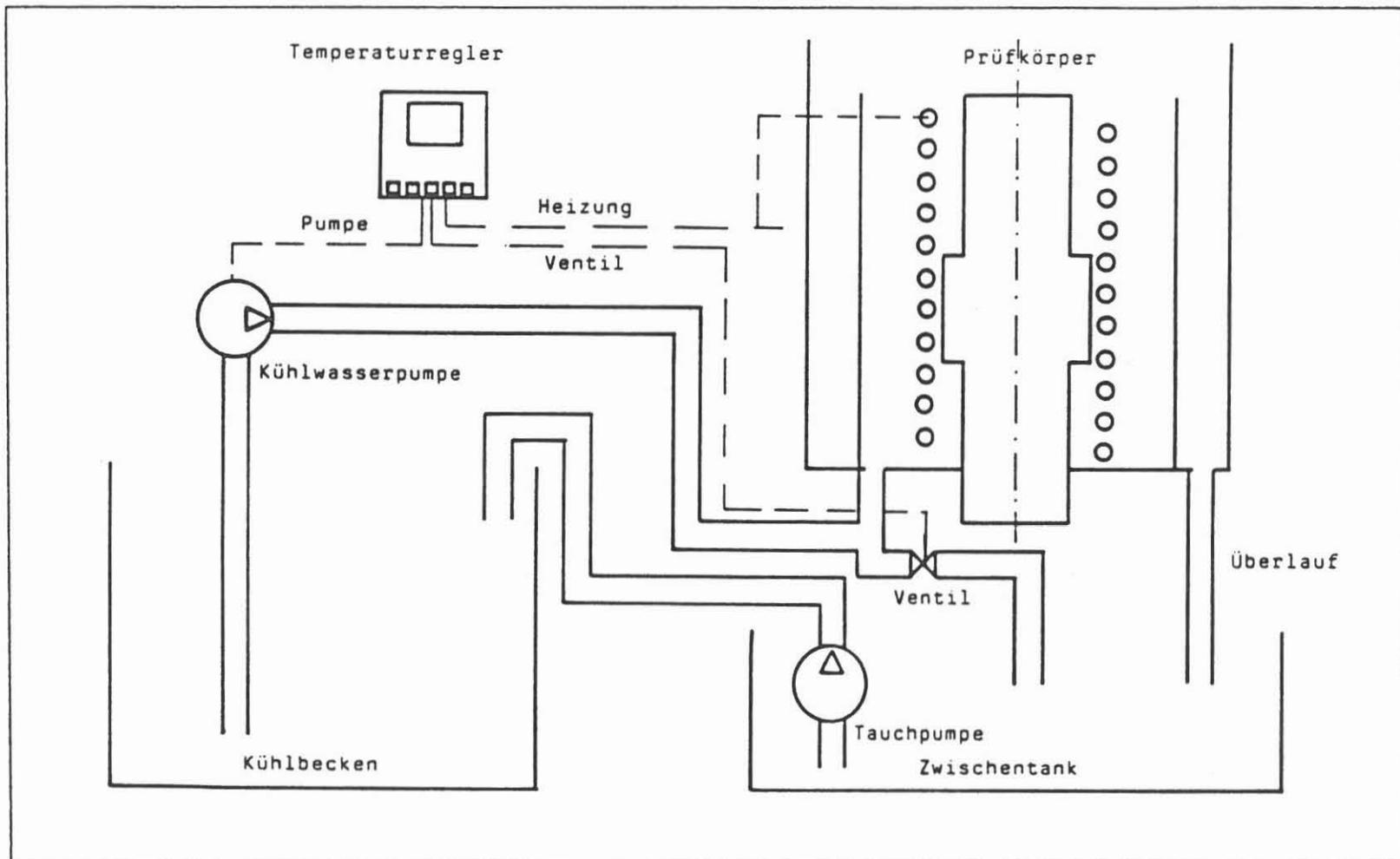
ITE

Steuer- und Regelkonzeption

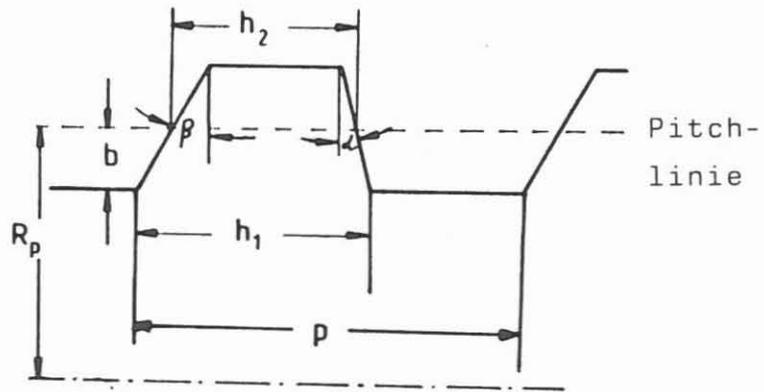
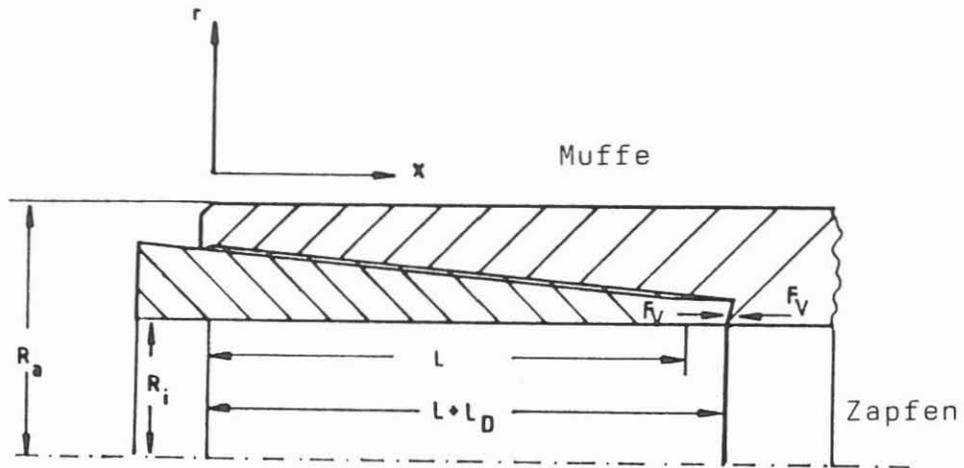
1988

Abb. 4



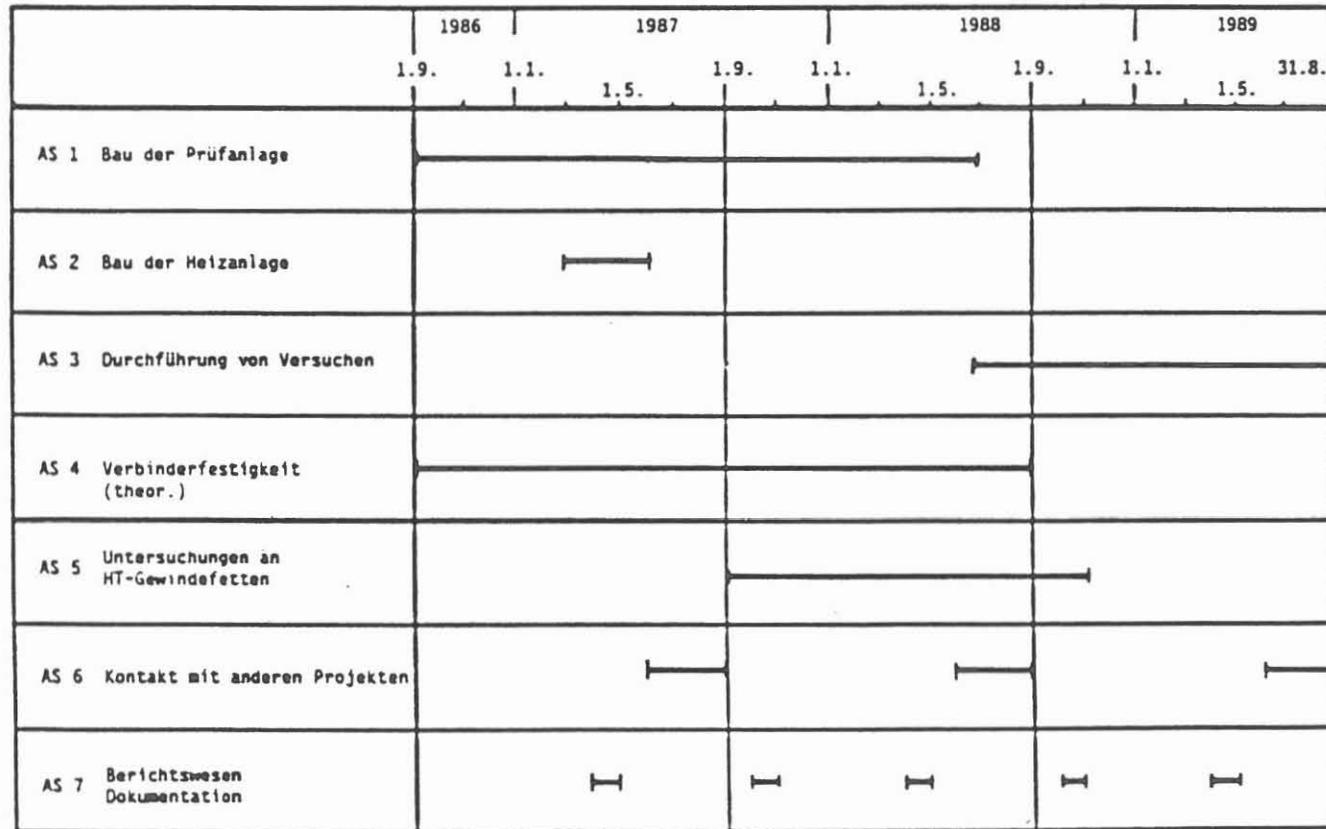


ITE	Heiz- und Kühlsystem der Rohrprüfanlage RP5	1988 Abb. 6
-----	---	----------------



Zahnmodell

ITE	Verbindergeometrie	1988
		Abb. 7

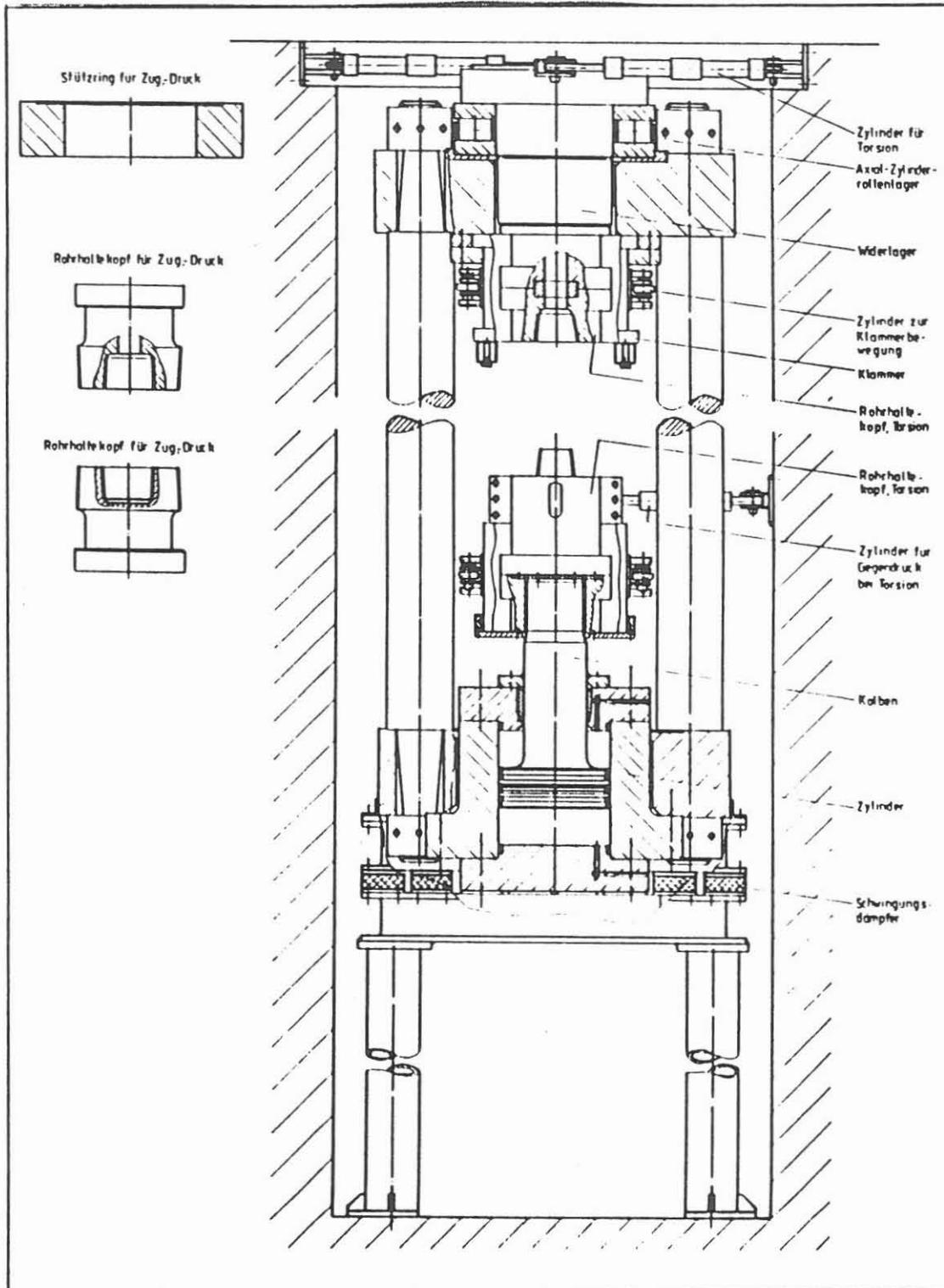


ITE

Projekttablauf im Balkendiagramm

1988

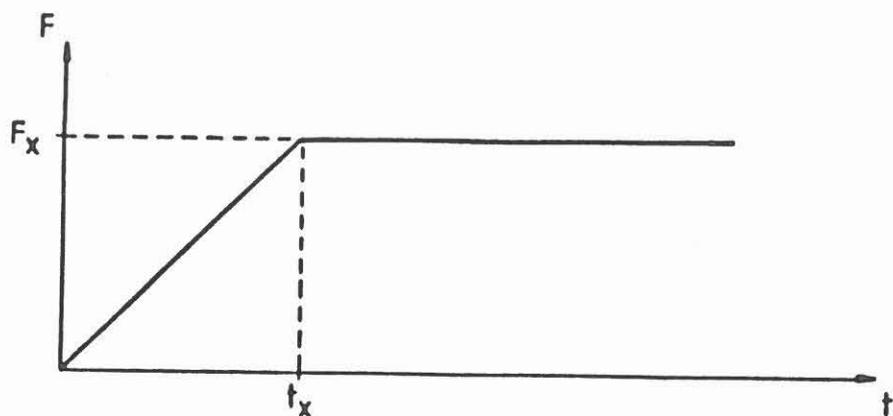
Abb. 1



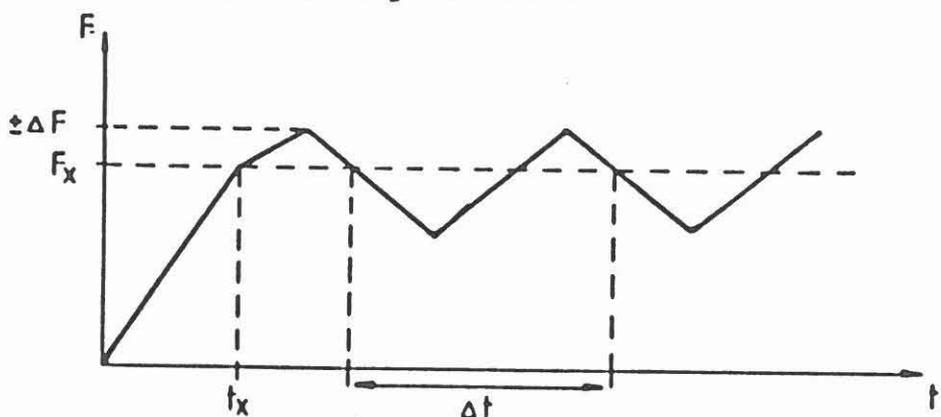
ITE

Darstellung Rohrprüfanlage RP5

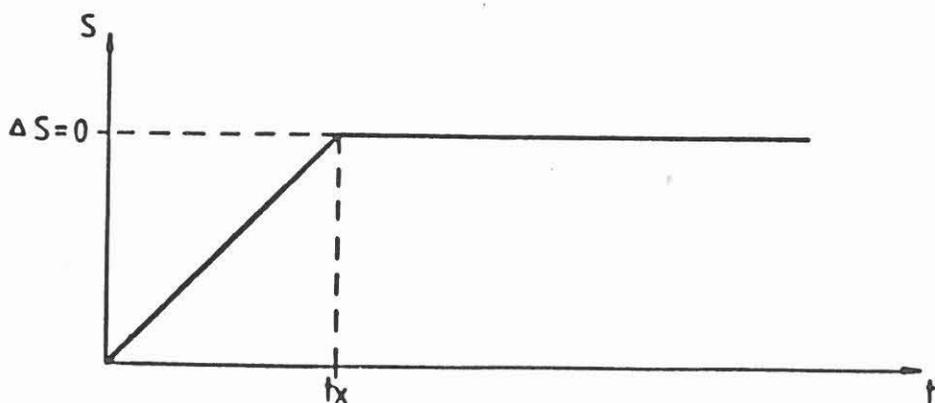
1988
Abb. 2



anfahrend einer Zug / Druckkraft

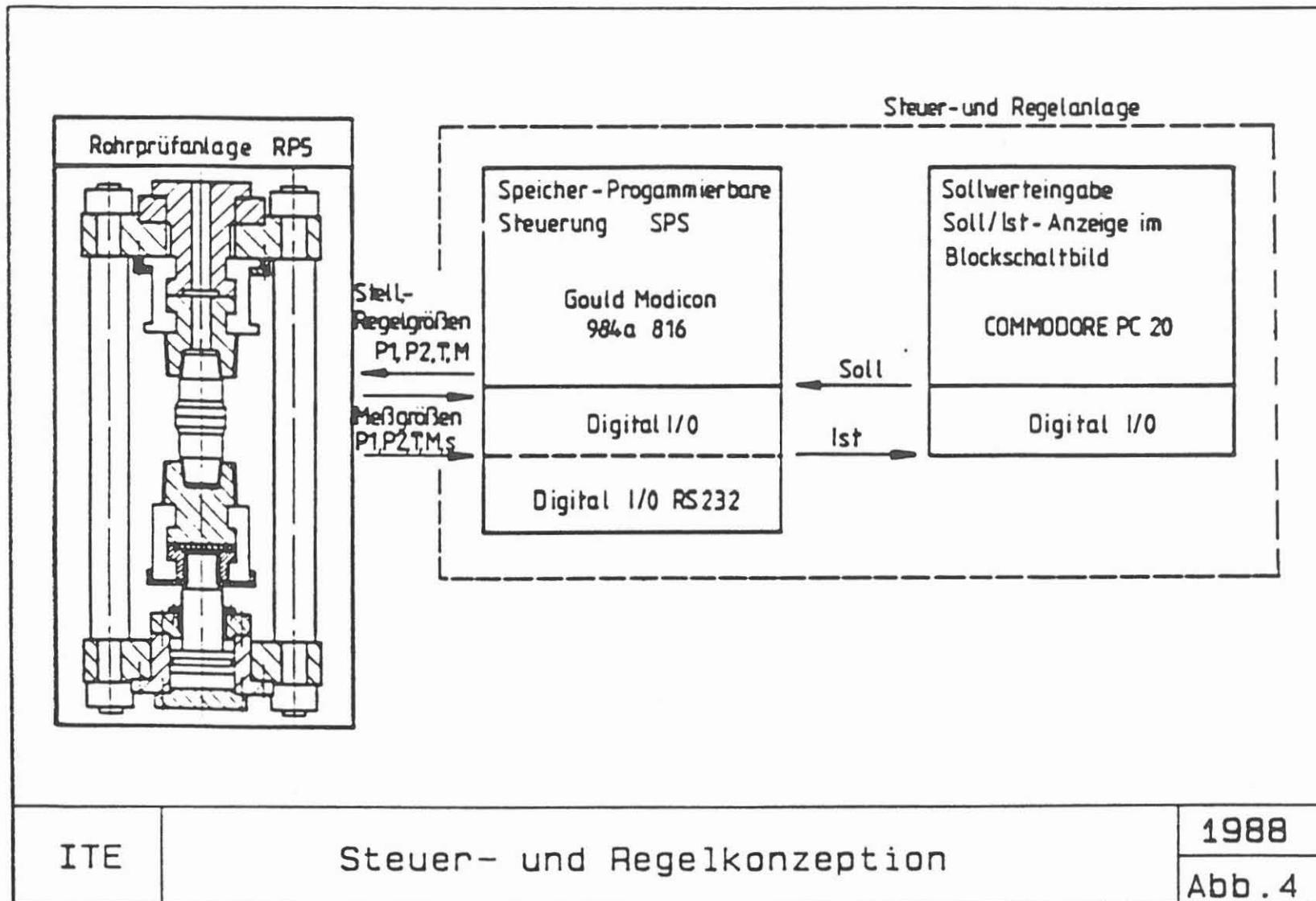


anfahrend einer Zug / Druckkraft mit anschließender schwelliger Beanspruchung



bei Temperaturwechseln Elongation / Kompression $S=0$

ITE	Prüfbelastungen	1988
		Abb. 3

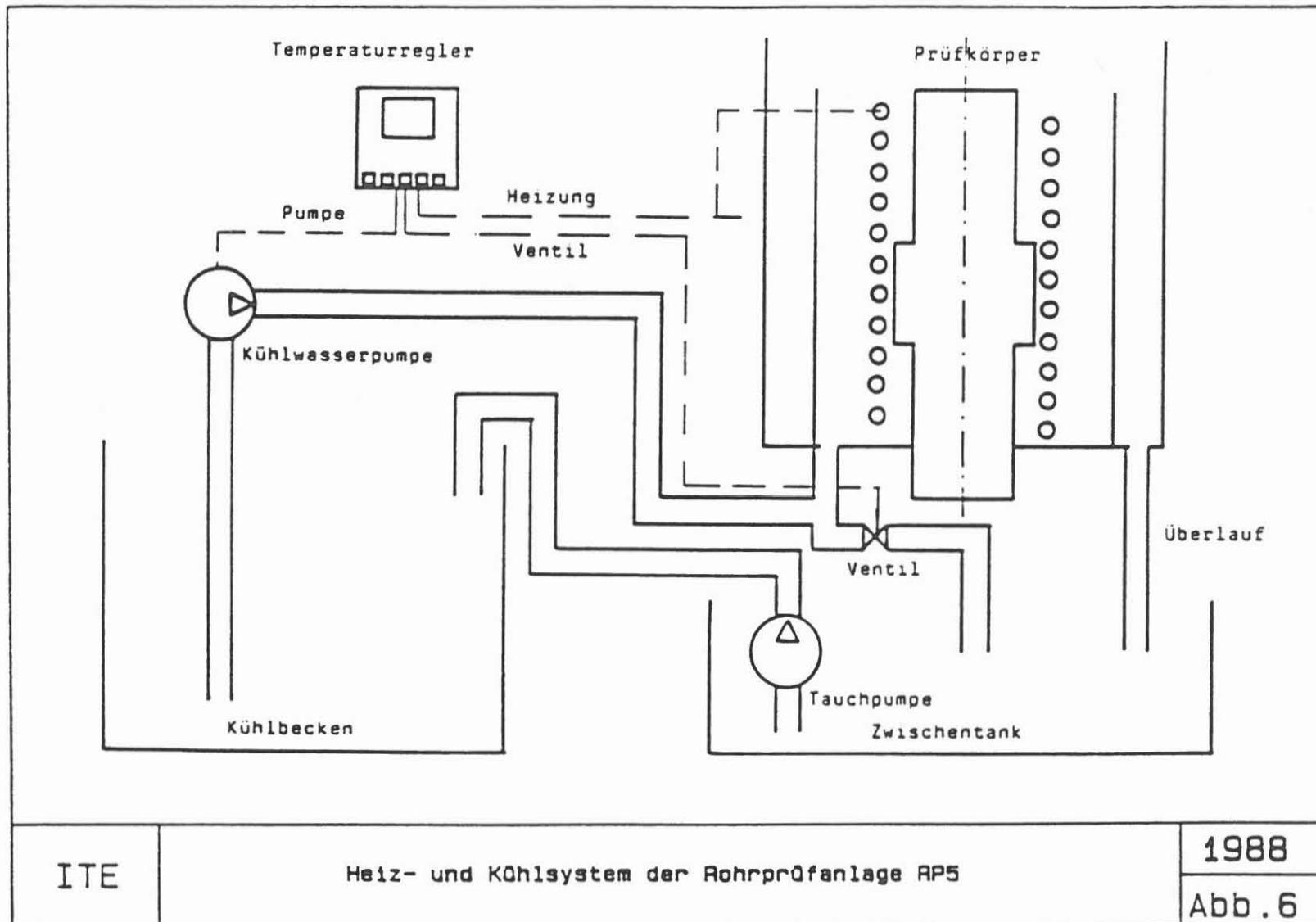


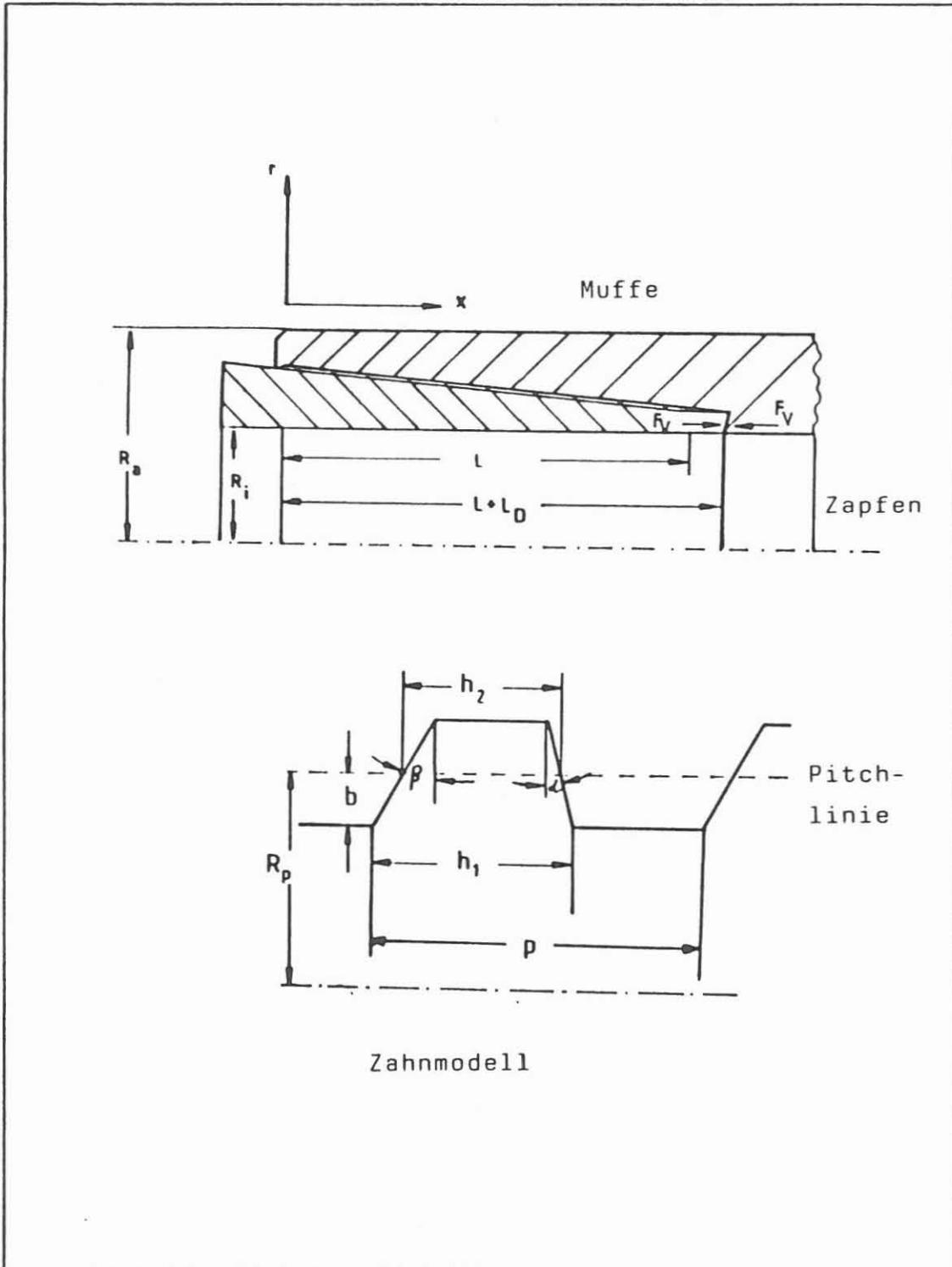
ITE

Steuer- und Regelkonzeption

1988

Abb. 4





ITE	Verbindergeometrie	1988
		Abb. 7

Mannesmannröhren-Werke AG
Mannesmann Forschungsinstitut GmbH

Ehinger Straße 200
4100 Duisburg-Huckingen

Werkstoffauswahl und Konzept
für das Bohrgestänge im
Rahmen des kontinentalen
Tiefbohrprogramms der
Bundesrepublik Deutschland

Auf der Grundlage der nach heutigem Stand verfügbaren Angaben über die KTB-Bohrung, wie das Temperaturprofil, die aufgrund oberflächennaher Vorbohrungen zu erwartenden korrosiven Medien, das vorgesehene Spülungs-System sowie die von KTB festgelegten allgemeinen Eckdaten für das Bohrgestänge, wurden acht als aussichtsreich angesehene Werkstoff-Gruppen gebildet und die Auswertung von Veröffentlichungen sowie die Verwendung interner Untersuchungsergebnisse zur Darstellung des Kenntnisstandes auf diese Werkstoff-Gruppen konzentriert.

Die Eigenschaften der Werkstoffe wurden in Eigenschaftsmerkmale gegliedert, die sowohl mechanisch-technologische Eigenschaften umfassen, wie auch Korrosion, Verschleiß sowie die Herstellbarkeit von Rohren und deren Verhalten beim häufigen Wiederverschrauben berücksichtigen.

Diese Werkstoff-Gruppen umfassen hochfeste Stähle und Leichtmetallwerkstoffe, wobei Veröffentlichungen über geplante oder durchgeführte Tiefbohrungen (Mohole, Kola) besondere Beachtung fanden, ebenso wie hochfeste, korrosionsbeständige Werkstoffe im Hinblick auf eine möglichst geringe Kontamination des Bohraustrages durch Korrosionsprodukte.

Für jede Gruppe wurden möglichst mehrere charakteristische Werkstoffe ausgewählt.

I.	Niedriglegierte hochfeste Stähle	36 CrNiMo 4-135* 30 CrNiMo 8-170
II.	Martensitaushärtender Stahl	X 2 NiCoMoTi 18 12 4
III.	Nichtrostende Stähle mit Cr-Gehalten > 13 %	X 20 Cr 13-95 X 4 CrNiMo 16 5 X 3 CrNiMoAl 13 8 2
IV.	Hochlegierte Stähle mit Cr-Gehalten > 20 %	X 2 CrNiMoN 22 5-130 X 1 NiCrMoCu 31 27-130
V.	Nickelbasislegierungen	Hastelloy G 2-130 Hastelloy C 276-190
VI.	Titanlegierungen	Ti 3Al 8V 6Cr 4Zr 4Mo (β-Titan) Ti 6Al 4V (α + β-Titan)

* Werkstoff mit Mindeststreckgrenze 135 ksi (1 ksi = 6,895 N/mm²)

VII. Aluminiumlegierungen	AlCuSiMn AlZnMgCu 1,5
VIII. Magnesiumlegierung	MgZn 6 Zr

Als erstes Eigenschaftsmerkmal wurde das mechanisch-technologische Verhalten insbesondere im Hinblick auf eine zu erwartende Bohrlochtemperatur von etwa 300°C untersucht. Der Abfall der Dehngrenze mit zunehmender Temperatur ist für verschiedene Stähle, Nickel-Basis-Legierungen sowie für Titan- und Aluminiumlegierungen in den Bildern 1 bis 4 dargestellt.

Ein weiteres für die Werkstoffauswahl entscheidendes Merkmal sind die Korrosionseigenschaften im Hinblick auf die Forderung der Geowissenschaften, den Bohraustrag in möglichst originärem, d. h. von Fremdstoffen unbeeinflusstem Zustand zu gewinnen. Am Beispiel unlegierter martensitischer Stähle ist das Korrosionsverhalten in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Kennzeichnend für einen Bohrstrang-Werkstoff ist auch das Dauerfestigkeitsverhalten, insbesondere in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein charakteristisches Beispiel ist der Steilabfall bei Al-Legierungen oberhalb 150°C (Bild 7).

Schließlich bilden die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der Werkstoffgruppen die erforderliche Berechnungsgrundlage (Tabelle 1) für die Strangauslegung.

Die einzelnen Eigenschaftsmerkmale wurden für jede Werkstoffgruppe untersucht und ausführlich dokumentiert.

Bezüglich der verwendeten Literaturzitate sei auf die KTB-Studie verwiesen. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anforderungen wurden die Eigenschaftsmerkmale je Werkstoffgruppe qualitativ bewertet und die Ergebnisse getrennt für Rohr- und Verbinder-Werkstoff in Matrixform dargestellt (Tabelle 2). Aus einer Gesamtbeurteilung der bewerteten Eigenschaftsmerkmale einer Werkstoffgruppe wurde die Eignung bzw. Nichteignung einer Werkstoffgruppe als Bohrstrangwerkstoff abgeleitet. Für das Ausscheiden einer Werkstoffgruppe war ausschlaggebend, daß mindestens eine Werkstoffeigenschaft die Verwendung ausschloß.

Für die Auslegung des Bohrstranges wurden zwei Grundkonzepte in Betracht gezogen. Im ersten Fall wurde die Frage untersucht, aus welchem Werkstoff der Bohrstrang durchgängig hergestellt werden könnte. Im zweiten Fall wurden die Werkstoffe danach beurteilt, ob der Gesamtstrang aus 2 oder mehr Teilsträngen mit unterschiedlichen Werkstoffen zusammengesetzt werden kann.

...

Für das Konzept eines Bohrstranges aus einem einheitlichen Bohrrohr-Werkstoff eignen sich folgende Werkstoff-Alternativen:

- Niedriglegierter, hochfester Stahl 30 CrNiMo 8-170 (Drillpipe) und 36 CrNiMo 4-120 (Tooljoint)
- Nickel-Basis-Legierung Hastelloy C276-190 (Drillpipe) und Hastelloy C276-120 (Tooljoint)

Die untersuchten Aluminium- und Magnesiumlegierungen scheiden wegen ihrer nicht ausreichenden Festigkeit bei der vorgegebenen Zugreserve und dem Zirkulationsdruck aus. Titanlegierungen können wegen der sehr großen Kriechneigung oberhalb 200°C nicht eingesetzt werden.

Das Konzept eines aus Teilsträngen unterschiedlicher Werkstoffe kombinierten Bohrstranges ergab, daß mit Titanlegierungen im oberen Bohrlochbereich, d. h. bei einer Temperatur von weniger als 200°C, folgende Alternativen möglich erscheinen:

- Kombination von Teilsträngen aus niedriglegiertem, hochfestem Stahl 30 CrNiMo 8-170 (Drillpipe) und 36 CrNiMo 4-120 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)
- Kombination von Teilsträngen aus Hastelloy C 276-190 (Drillpipe) und Hastelloy C 276-120 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)
- Kombination von Teilsträngen aus hochlegiertem Stahl X 1 NiCrMoCu 31 27-130 (Drillpipe) und X 1 NiCrMoCu 31 27-130 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)

In den folgenden Ausführungen sollen die Besonderheiten, Vorzüge und Einschränkungen der für die beiden Konzepte genannten Werkstoffe erläutert werden, die sich aus der Einzelbewertung der Eigenschaftsmerkmale ergeben.

Alle Werkstoffgruppen sind mit Blick auf die Dauerbeanspruchbarkeit bei Biegewechsel-Bbeanspruchung unter korrosiven Bedingungen durch Schwingungsrißkorrosion gefährdet - insbesondere der niedriglegierte, hochfeste Stahl. Von besonderem Einfluß sind die Sauerstoffkonzentration in der Spülung, weshalb entsprechende Maßnahmen zur Absenkung des Sauerstoffgehaltes vorzusehen sind, und die Lage und Höhe der Bohrlochabweichung. Bei einer Abweichung von mehr als 1°/100 ft im oberen Bohrlochabschnitt sind bei Zugbelastung durch das volle Stranggewicht Dauerbrüche nicht auszuschließen.

...

Mit abnehmender Zuglast, z. B. bei Bohrlochabweichungen in größerer Teufe, ist dieser Einfluß weniger kritisch.

Diese Gefährdung ist keine spezifische Eigenschaft der hier behandelten Stähle, diese liegen unter normalen Bohrbedingungen ebenfalls sicher im Dauerfestigkeitsbereich.

Der Verschleißbeanspruchung an Rohr und Verbinder unterliegen alle Varianten, die bei den Alternativen aus niedriglegiertem Stahl durch die abtragende Korrosion verstärkt wird.

Da Schwingungskorrosion und abtragende Korrosion wesentlich vom Sauerstoffgehalt in der Spülung abhängen, ist eine entsprechende Aufbereitung der Spülung zur Einhaltung möglichst niedriger Sauerstoffkonzentrationen von besonderer Bedeutung. Zur frühzeitigen Erkennung von Anrissen sowie von Wanddickenschwächungen sind deshalb insbesondere mit zunehmender Bohrteufe Inspektionen und zerstörungsfreie Prüfungen besonders für die stärker belasteten Strangabschnitte in kurzen Zeitabständen erforderlich.

Ein von der Werkstoffauswahl unabhängiges Problem ist die Auswahl eines geeigneten Schmierstoffes. Die gebräuchlichen Fette sind auf Mineralölbasis aufgebaut, so daß die Entstehung unerwünschter kurzkettiger Kohlenwasserstoffe durch thermische Zersetzung nicht auszuschließen ist. Die Fette "Geothermal grade lube" und "Esgard" sollen bis 260 bzw. 300°C beständig sein. Die auf Fluorkohlenwasserstoffen aufgebauten Fette "Barrierta" und "Ontropeen" sollen ihre Eigenschaften bis 300°C behalten.

Zur Abschätzung der max. Wärmebelastung ist die Ermittlung des Temperaturprofils für den Bohrstrang unter Berücksichtigung der Kühlwirkung bei umlaufender Spülung erforderlich. Stoffe mit ausreichender Schmierwirkung nach Auslagerung bei der max. Wärmebelastung sind darauf zu untersuchen, ob sie bei den verschiedenen Werkstoff-Varianten unter Anwendung bekannter Oberflächenbehandlungen die erforderliche Wiederverschraub-Häufigkeit gewährleisten.

Im Hinblick auf ihr Korrosionsverhalten unterscheiden sich die Werkstoff-Varianten grundsätzlich insofern, als ein Bohrstrang aus niedriglegiertem Stahl sowie kombinierte Teilstränge aus Titan und niedriglegiertem Stahl Korrosionsprodukte bilden, die die Spülung kontaminieren, während die Varianten aus hochlegierten Stählen und Titan nicht korrodieren. Wenn im Spülungssystem Korrosionsprodukte nicht zugelassen werden können, ist auch die vorgesehene Schutz-Casing-Tour aus niedriglegiertem Stahl in Frage zu stellen.

Im einzelnen ergeben sich noch folgende Hinweise zu den Werkstoff-Alternativen:

1. Hochfester niedriglegierter Stahl

Die konstruktive Auslegung (Design Nr. 111/211, Tabelle 3 und 4; bezüglich der weiteren Design-Nrn. sei auf die KTB-Studie verwiesen) beruht auf innen- und außengestauchten Rohrenden für vorgeschweißte Verbinder mit Rotary-Anschlüssen nach API Spec. 7 unter Annahme unterschiedlicher Sicherheitsbeiwerte. Als Verbinderwerkstoff ist ein gebräuchlicher API-Werkstoff mit 120 ksi Streckgrenze vorgesehen. Das Reibschweißen beider Werkstoffe ist erprobt. Das Verschraubverhalten des Verbinderwerkstoffes ist als unproblematisch bekannt.

Im Hinblick auf die Korrosionsbelastung insbesondere die Spannungsrißkorrosion bei Biegewechselbeanspruchung unter hoher Zugbeanspruchung wurde auf die besondere Bedeutung der Sauerstoffkonzentration in der Spülung bereits hingewiesen.

Für eine Beschwerung der Spülung sollte Na_2CO_3 nicht, als Pufferung nur max. 3 % zugelassen werden. Eine schwere Spülung aus CaCl_2 sollte mit CaO gepuffert werden.

Bohrstränge aus niedriglegiertem Stahl sollten insbesondere nach Einsatz unter hoher Zuglast bereits nach kurzen Verweilzeiten im Bohrloch inspiziert werden, auch bei evtl. Stillstandzeiten ohne dynamische Belastung.

2. Kombinierte Teilstränge aus niedriglegiertem Stahl und Titanlegierung (Ti 6Al 4V)

Die Auslegung eines kombinierten Stranges sieht den Einsatz der Titanlegierung bis zu einer Teufe vor, die im Temperaturprofil der Bohrung unter 200°C entspricht, um eine Gefährdung des Stranges durch den Abfall der Kriechbeständigkeit der Titanlegierung bei höheren Temperaturen zu vermeiden.

Für den Gesamtstrang gelten hinsichtlich der Korrosionsbelastung die gleichen Hinweise wie beim niedriglegierten Stahl. Außerdem gibt es Hinweise in der Literatur auf eine Wasserstoffversprödung der Titanlegierung oberhalb etwa 90°C bei Kontakt mit Stahl. Da diese Hinweise nur in wenigen Literaturstellen erwähnt werden, bedürfen sie der Nachprüfung.

Diese Frage ist nicht nur für die Kombination von Teilsträngen von Bedeutung, sondern ebenso für die Frage, ob Stahl-Verbinder an Titan-Rohre vorgeschweißt werden können, mit dem Ziel, Titanverbinder mit bisher unbekanntem Wiederverschraubverhalten durch Stahlverbinder zu ersetzen.

...

Allerdings liegen nur geringe Kenntnisse über das Reibschweißen von Stahl mit Titanlegierungen vor. Das Reibschweißen von Titan mit Titan ist nach Literaturhinweisen wie auch im eigenen Versuch erfolgreich verlaufen.

Ein weiterer Hinweis gilt der relativ geringen Zähigkeit von Titanlegierungen mit der Gefahr geringer Reserven für rißartiges Versagen. In diesem Zusammenhang erfolgte die Empfehlung eines Herstellers, für die Verwendung als Drillpipe nur die Legierung Ti 6Al 4V vorzusehen.

Schließlich sei erwähnt, daß der Prozeß des Richtens von Titanrohren in dem hier angesprochenen Abmessungsbereich z. Zt. noch nicht fertigungssicher beherrscht wird.

3. Nickel-Basis-Legierung Hastelloy C 276

Die Legierung gehört zur Gruppe der kaltverfestigten Werkstoffe und kann deshalb nicht warm gestaucht werden. Aufgrund der hohen Festigkeit kommt auch eine Kaltstauchung nicht in Betracht. Hieraus leiten sich Besonderheiten hinsichtlich der Fertigung und Konstruktion ab. Die Konstruktion sieht eine deutliche Verdickung der Rohrenden auf etwa 200 % des Rohrquerschnittes vor, um den zu erwartenden Festigkeitsabfall durch die Reibschweiße mit dem Verbinder auszugleichen. Allerdings liegen keine Angaben über den Grad des Festigkeitsabfalles in der wärmebeeinflussten Zone der Reibschweißnaht sowie über Besonderheiten beim Reibschweißen selbst vor.

Die Verdickung der Rohrenden kann durch spanende Bearbeitung des Rohrkörpers mit entsprechend hohem Aufwand erreicht werden. Eine Aufschraub-Verbinder-Konstruktion wurde wegen der hohen Freßneigung des Werkstoffes und der Unsicherheit auch einer einmaligen Verschraubung bei hoher Flächenpressung nicht in Betracht gezogen.

Zum Wiederverschraubverhalten von Tooljoint-Verbindern aus diesem Werkstoff liegen keine Aussagen vor. Aufgrund der Erfahrung mit den anders gestalteten und weniger beanspruchten Tubing-Verbindungen ist eine geeignete Oberflächenbehandlung erforderlich, die unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden muß. Wie die Frage des Fressens durch Vorschweißen von niedriglegierten Stahl-Tooljoints zu lösen ist, wäre durch Schweißversuche sowie Festigkeits- und Korrosionsuntersuchungen abzusichern.

Zur Vermeidung der Gefährdung des Stranges durch Spannungsrißkorrosion sollte beim Einsatz einer schweren CaCl_2 -Spülung mit CaO gepuffert werden.

...

Schließlich sollte darauf hingewiesen sein, daß der Strang aus Hastelloy C 276 wegen der hohen Dichte dieses Werkstoffes mit einem Stranggewicht in Spülung von ca. 5 400 kN die Hakenregellast von 5 500 kN nahezu vollständig in Anspruch nimmt.

4. Kombinierte Teilstränge aus Hastelloy C 276 und Titanlegierung (Ti 6AL 4V)

Hinsichtlich der Korrosionsbelastbarkeit ist der kombinierte Strang demjenigen aus Hastelloy gleichwertig. Durch die Kombination wird das Stranggewicht um ca. 28 % vermindert und liegt deutlich unterhalb der Hakenregellast.

Für den kombinierten Strang gelten die gleichen Hinweise hinsichtlich Reibschweißverhalten und Wiederverschraubbarkeit sowie Zähigkeit und Fertigungssicherheit, wie sie für diese Werkstoffe im einzelnen bereits beschrieben wurden.

Bei der Kombination Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V ist es allerdings auch denkbar, daß der Werkstoff Hastelloy durch das unedlere Titan kathodisch polarisiert wird. Dies könnte zu einer Schädigung des Hastelloy-Werkstoffes durch H-induzierte Korrosion führen. Ob und inwieweit dies der Fall ist, ist derzeit noch unbekannt und müßte durch Untersuchungen geklärt werden.

Bei Verwendung einer CaCl_2 -Spülung müßte auch bei dieser Werkstoff - Kombination CaO als Puffer zugesetzt werden.

5. Kombinierte Teilstränge aus hochlegiertem Stahl X1 NiCrMoCu 31 27-130 und Titanlegierung (Ti 6AL 4V)

Wegen der vergleichsweise niedrigen Streckgrenze war der Werkstoff X1 NiCrMoCu 31 27 für einen einheitlichen Bohrstrang ausgeschieden. Für einen Teilstrang in Kombination mit der Titanlegierung Ti 6AL 4V ist die Streckgrenze ausreichend.

Hinsichtlich der Korrosionsbelastbarkeit verhält sich diese Kombination vergleichbar der aus Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V.

Da der hochlegierte Stahl ebenfalls zur Gruppe der kaltverfestigten Werkstoffe gehört, gelten die Hinweise hinsichtlich der konstruktiven Auslegung und der Fertigung entsprechend Hastelloy C 276. Darüberhinaus gelten die gleichen Einschränkungen hinsichtlich des Reibschweißverhaltens und der Wiederverschraubbarkeit sowie der Zähigkeit und Fertigungssicherheit bei der Titanlegierung wie bei der Kombination Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V.

...

Auch bei der vorliegenden Werkstoff-Kombination sollte eine CaCl_2 -Spülung mit CaO gepuffert werden.

In der folgenden Übersicht wurden zur Ergänzung der technischen Gesichtspunkte aus der Literatur und derzeitigen Marktinformationen Preisfaktoren für die betrachteten Werkstoffe im Vergleich zum niedriglegierten hochfesten Stahl für glattendige Rohre vergleichbarer Abmessungen zusammengestellt. Diese Faktoren sind nur als Anhaltswerte zu betrachten.

- Faktor 1 : Niedriglegierter Stahl
- Faktor 13 : Hochlegierter Stahl X1 NiCrMoCu 31 27
- Faktor 30 : Hastelloy C 276
- Faktor 30 : Titanlegierung Ti 6Al 4V

Bei den beiden hochlegierten, kaltverfestigten Werkstoffen X1 NiCrMoCu 31 27 und Hastelloy C 276 ist zu berücksichtigen, daß Rohre mit größerem Metergewicht hergestellt werden müssen, um durch aufwendige spanende Bearbeitung die verdickten Anschweißenden zu erhalten. Dieser Aufwand ist in den Faktoren nicht enthalten.

Mit den vorgestellten Alternativen können die hohen Anforderungen an den Bohrstrangwerkstoff erfüllt werden, wobei der Grad der durch zusätzliche Untersuchungen noch abzusichernden Eigenschaften unterschiedlich hoch ist.

Tabelle 1 : Physikalische Eigenschaften (Richtwerte)
Werkstoff: X 2 CrNiMoN 22 5 (AF 22)

Physikalische Eigenschaften	Temperatur in °C				
	20	100	200	300	400
Dichte in Mg/m ³	7,83	7,80	7,77	7,73	7,70
Dynamischer E-Modul in GN/m ²	203	197	189	180	170
Dynamischer G-Modul in GN/m ²	77	74	71	68	64
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (Bezugstemperatur: 20°C) in 10 ⁻⁶ /K	13,1	13,5	14,2	14,6	15,0
Differentieller linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in 10 ⁻⁶ /K	13,1	13,9	14,6	15,2	15,8
Mittlere spezifische Wärmekapazität (Bezugstemperatur: 20°C) in kJ/(kg.K)	0,45	0,47	0,50	0,52	0,53
Wahre spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg.K)	0,45	0,49	0,53	0,56	0,59
Wärmeleitfähigkeit in W/(m.K)	17	18	19	20	20
Spezifischer elektrischer Widerstand in µΩm	0,78	0,84	0,91	0,96	1,02
Magnetisierbarkeit	vorhanden				

Tabelle 2 : Beurteilungs-Matrix für Drillpipe-Werkstoffe

- + : Einsatzfähig; beständig
- (+): Begrenzt einsatzfähig; eingeschränkt beständig
- (-): Kaum einsatzfähig; wenig beständig
- : Nicht einsatzfähig; nicht beständig
- o : Nicht relevant
- ? : Nicht bekannt

- Werkstoffgruppe I : Niedriglegierte, hochfeste Stähle:
30 CrNiMo 8 (Drillpipe), 36 CrNiMo 4 (Verbinder)
- Werkstoffgruppe II : Martensitgehärtender Stahl: X 2 NiCoMoTi 18 12 4
- Werkstoffgruppe III : Nichtrostender Stahl mit > 13 % Cr:
X 3 CrNiMoAl 13 8 2
- Werkstoffgruppe IV : Hochlegierter Stahl mit > 20 % Cr:
X 1 NiCrMoCu 31 27-130
- Werkstoffgruppe V : Nickel-Basis-Legierung: Hastelloy C 276
- Werkstoffgruppe VI : Titan-Legierung: Ti 6Al 4V
- Werkstoffgruppe VII : Aluminium-Legierung
- Werkstoffgruppe VIII: Magnesium-Legierung

Eigenschaften	Werkstoffgruppe							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Festigkeit	+	+	+	+	+	+	-	-
Zähigkeit	+	-	(+)	+	+	(-)	(-)	?
Kriechbeständigkeit	+	+	+	+	+	-	-	-
Dauerfestigkeit	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	-
Korrosion	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	(-)	-
Verschleiß	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-
Fertigung	+	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	?
Verschraubbarkeit	o	o	o	o	o	o	o	o
Hakenregellast	+	+	+	-	+	+	-	-
Gesamtbeurteilung	(+)	-	(+)	-	(+)	-	-	-

Tabelle 11.2: Beurteilungs-Matrix für Verbinder-Werkstoffe

Eigenschaften	Werkstoffgruppe							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Festigkeit	+	*)	+	+	+	+	-	-
Zähigkeit	+		(+)	+	+	(-)	(-)	?
Kriechbeständigkeit	+		+	+	+	-	-	-
Dauerfestigkeit	+		+	+	+	(-)	(-)	-
Korrosion	(+)		(+)	+	+	(+)	(-)	-
Verschleiß	+		(+)	(+)	(+)	(+)	-	-
Fertigung	+		+	(+)	+	+	+	?
Verschraubbarkeit	+		?	?	?	?	o	?
Fett	?		?	?	?	?	?	?
Gesamtbeurteilung	(+)		(+)	(+)?	+ ?	-	-	-

*)nicht betrachtet

Tabelle 3

DRILL PIPE DESIGN NR.: 111

(Zusammenfassung)

	Rohr			Verbinder			Gewicht
	Material	U-170 (30 Cr Ni Mo 8)		36 Cr Ni Mo 4 - 120			
Sicherheitsfaktor	1,1			1,6			
Teufe	Außendurchmesser		Wand	Größe	ä. Ø	i. Ø	
a	Zoll	mm	mm	-	mm	mm	kN
0 - 2 550	5-1/2	139,7	13,5	6-5/8" FH	203,2	108,0	1063
2 550 - 4 350	5-1/2	139,7	10,54	5-1/2" IF	187,3	108,0	598
4 350 - 7 500	5-1/2	139,7	9,17	5-1/2" IF	187,3	112,0	936
7 500 - 13 750	5	127,0	7,52	5-1/2" FH	177,8	103,0	1439
13 750 - 14 000	Schwerstangen						218
					Stranglast *)		4254
					Zugreserve		500
					500 bar Innendruck		499
					Gesamtlast		5252

*) Stranglast unter Berücksichtigung des Auftriebs bei Spüldichte 1,0 (Wasser)

Tabelle 4

DRILL PIPE DESIGN NR.: 211

(Zusammenfassung)

Material	Rohr			Verbinder			Gewicht
	U - 170 (30 Cr Ni Mo 4)			36 Cr Ni Mo 4			
Sicherheitsfaktor	1,25			1,6			
Teufe	Außendurchmesser		Wand	Größe	ä. Ø	i. Ø	kN
	m	Zoll	mm		mm	mm	
0 - 600	5-1/2	139,7	16,5	6-5/8" FH	203,2	101,6	292
600 - 2 500	5-1/2	139,7	15	6-5/8" FH	203,2	108,0	854
2 500 - 4 650	5-1/2	139,7	12,7	5-1/2" IF	187,3	105,0	825
4 650 - 6 900	5-1/2	139,7	10,54	5-1/2" IF	187,3	112,0	740
6 900 - 8 950	5	127,0	9,19	5-1/2" FH	177,8	101,6	550
8 950 - 13 750	5	127,0	7,52	5-1/2" FH	177,8	108,0	1092
13 750 - 14 000	Schwerstangen						218
Stranglast *)							4571
Zugreserve							500
500 bar Innendruck							417
Gesamtlast							5517

*) Stranglast unter Berücksichtigung des Auftriebs bei Spüldichte 1,0 (Wasser)

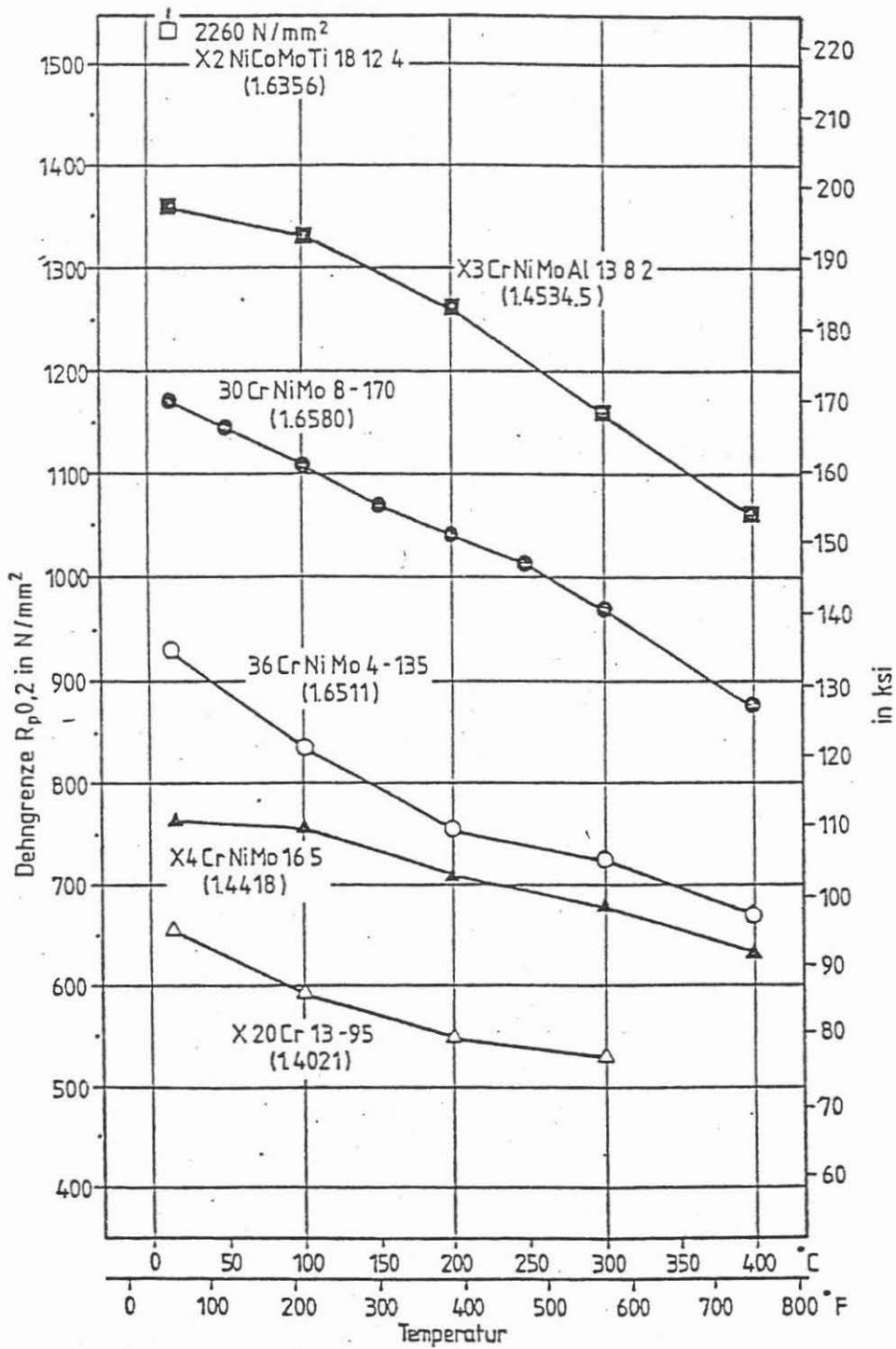


Bild 1: Dehngrenze $R_{p0,2}$ von verschiedenen Stählen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

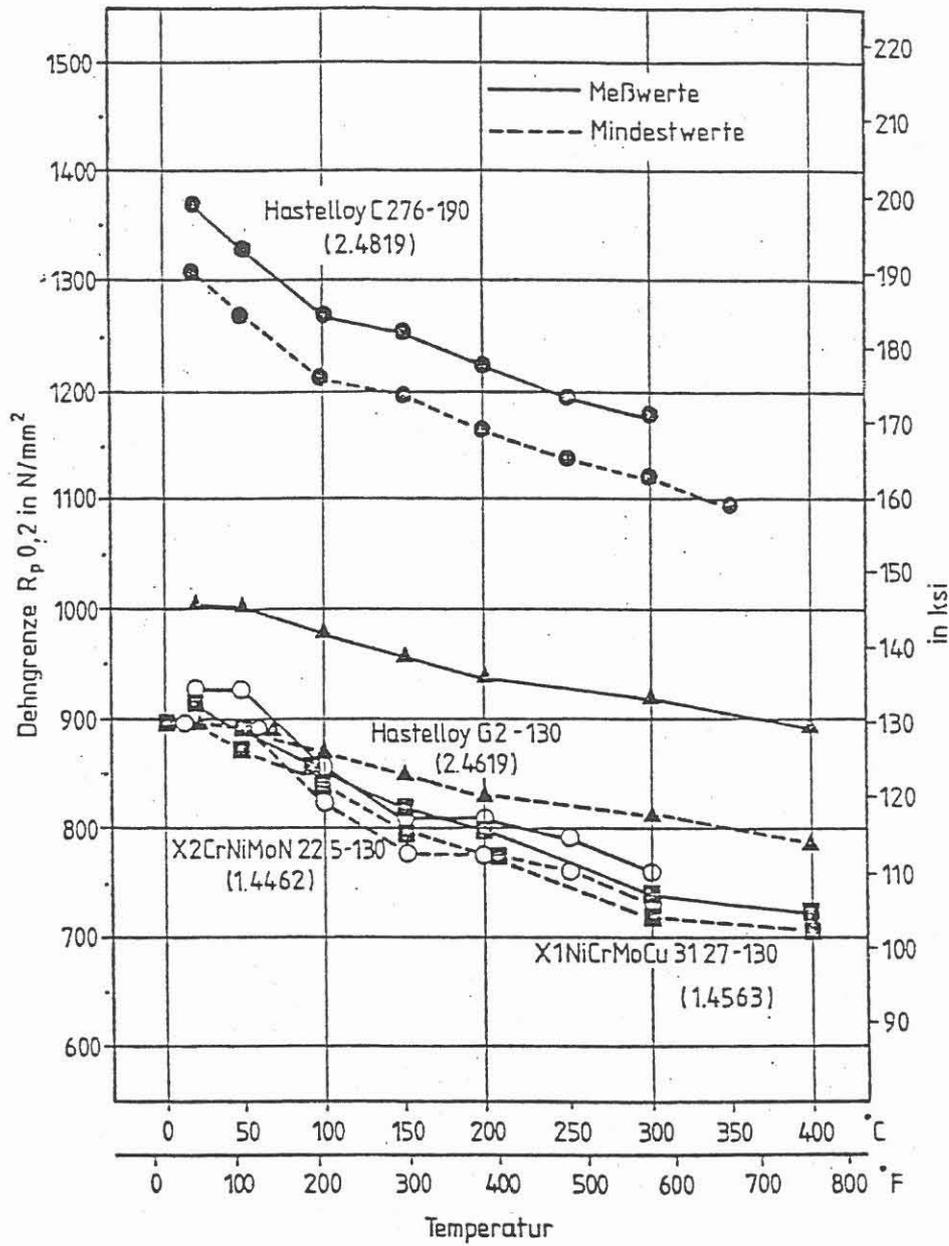


Bild 2 : Dehngrenze $R_p 0,2$ von hochlegierten Stählen und Nickelbasislegierungen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

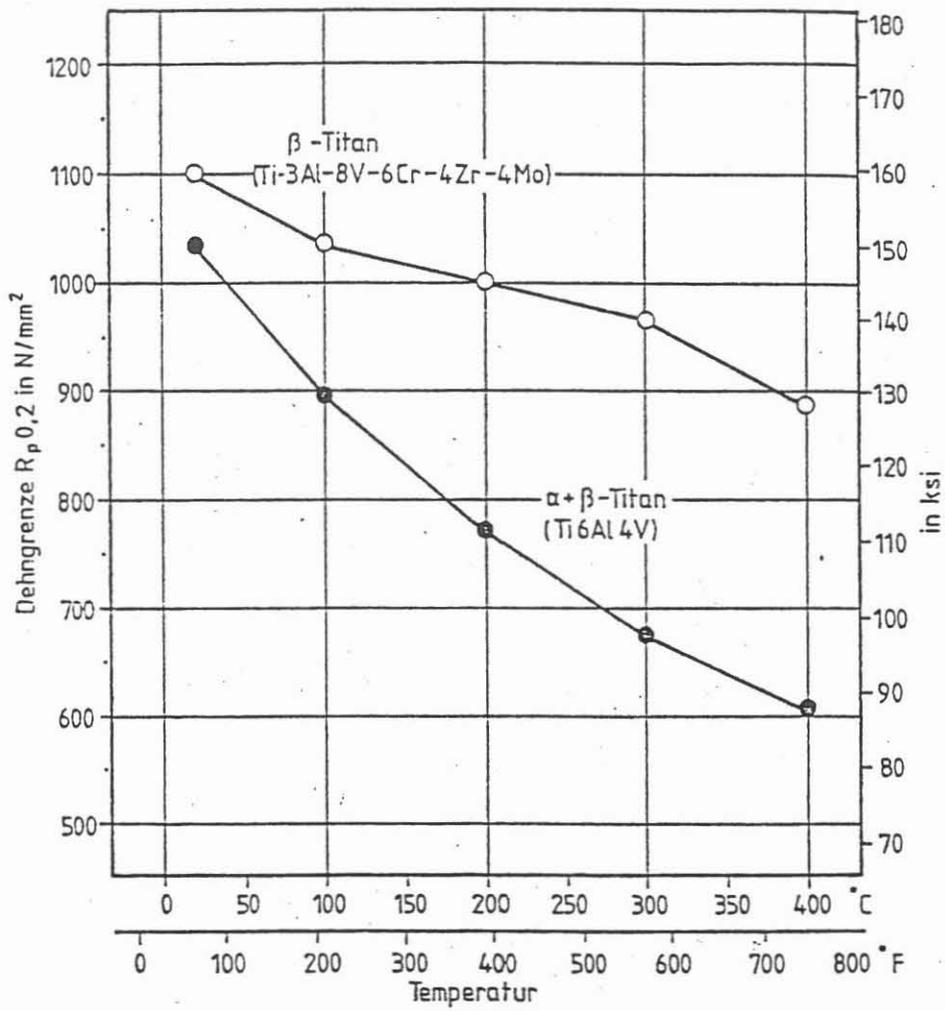


Bild 3: Dehngrenze $R_{p0,2}$ von einer β - und $\alpha + \beta$ -Titanlegierung in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

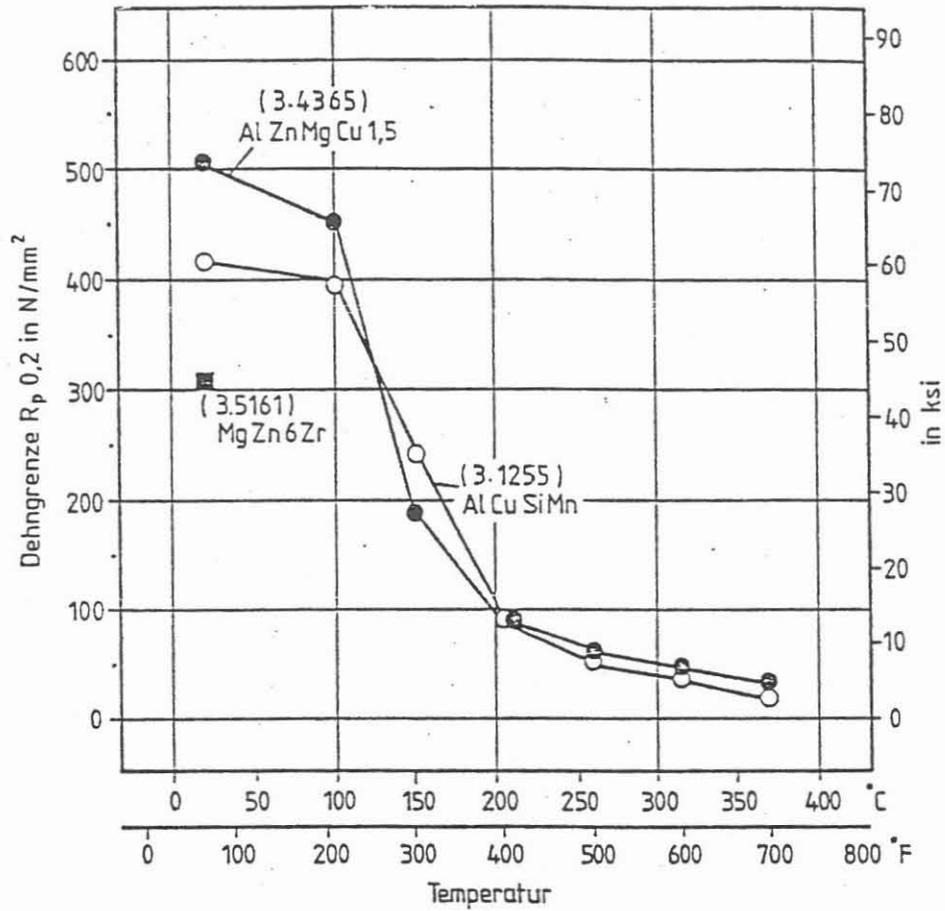


Bild 4 : Dehngrenze $R_p 0,2$ von zwei Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und einer Magnesiumlegierung bei Raumtemperatur

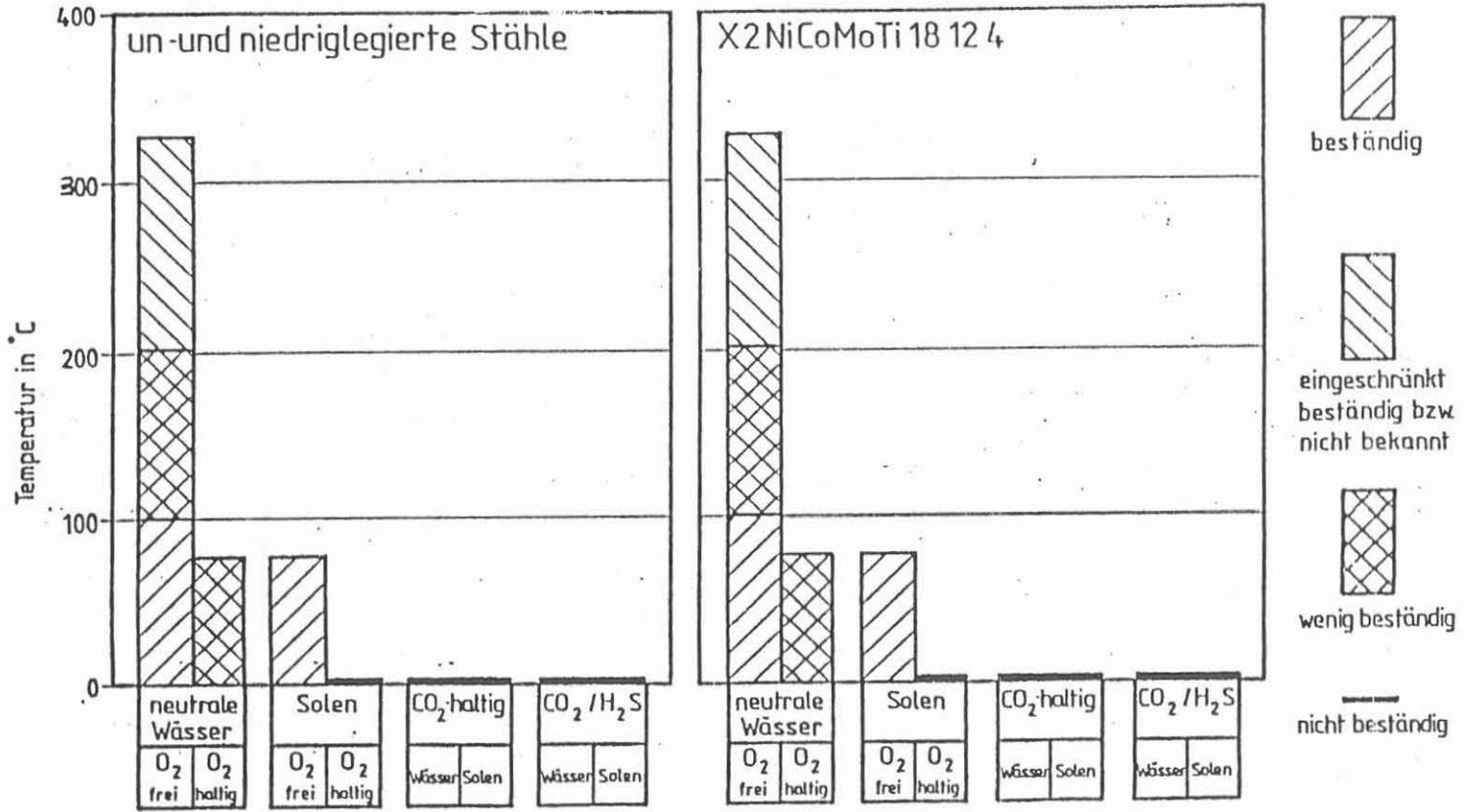


Bild 5 : Korrosionsbeständigkeit un- und niedriglegierter sowie Cr-freier martensitischer Stähle

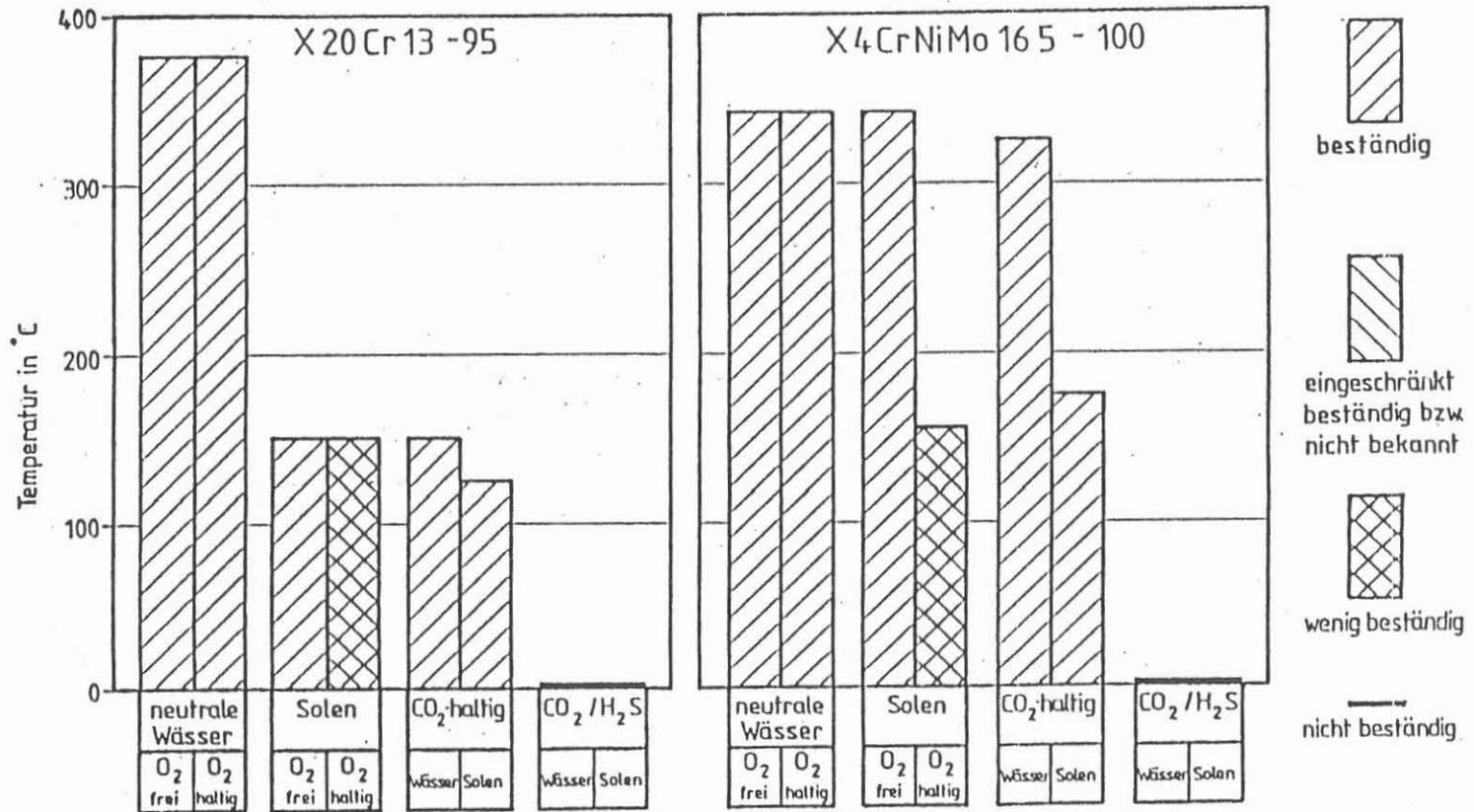


Bild 6 : Korrosionsbeständigkeit Cr- und CrNi-haltiger martensitischer Stähle

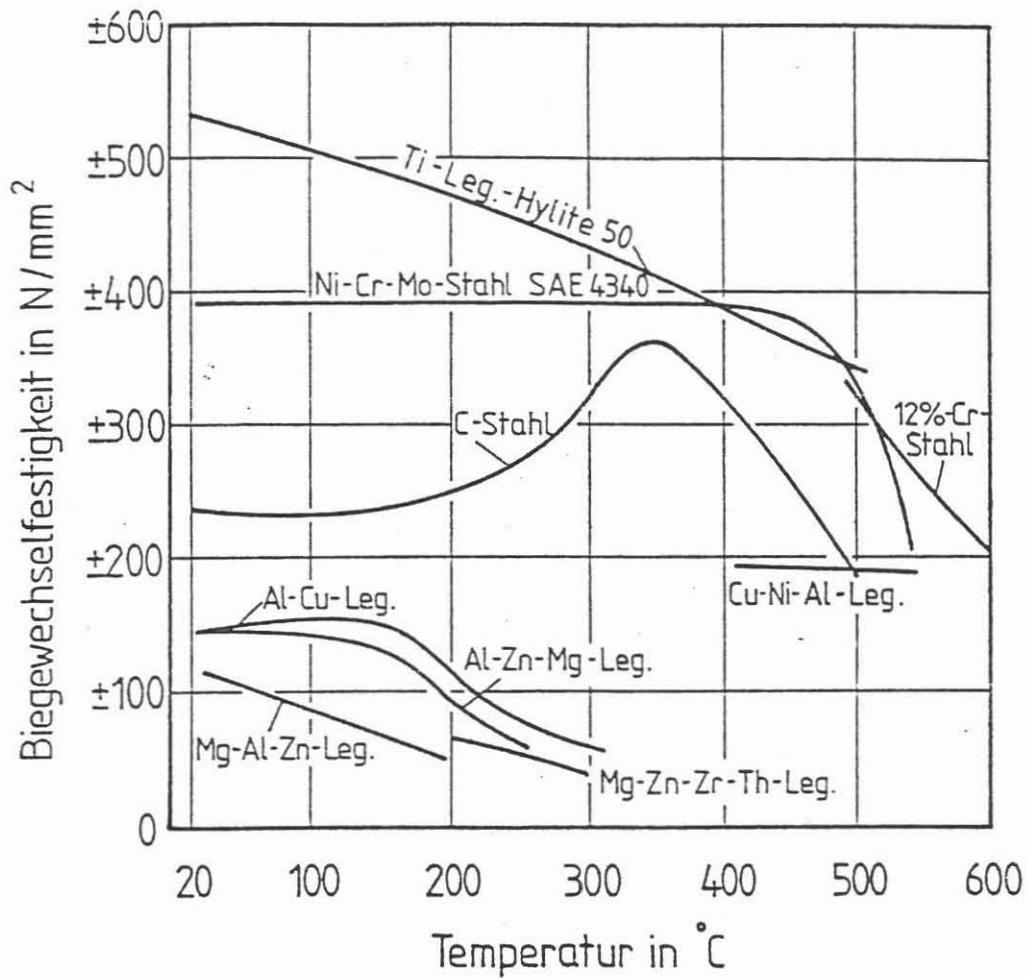


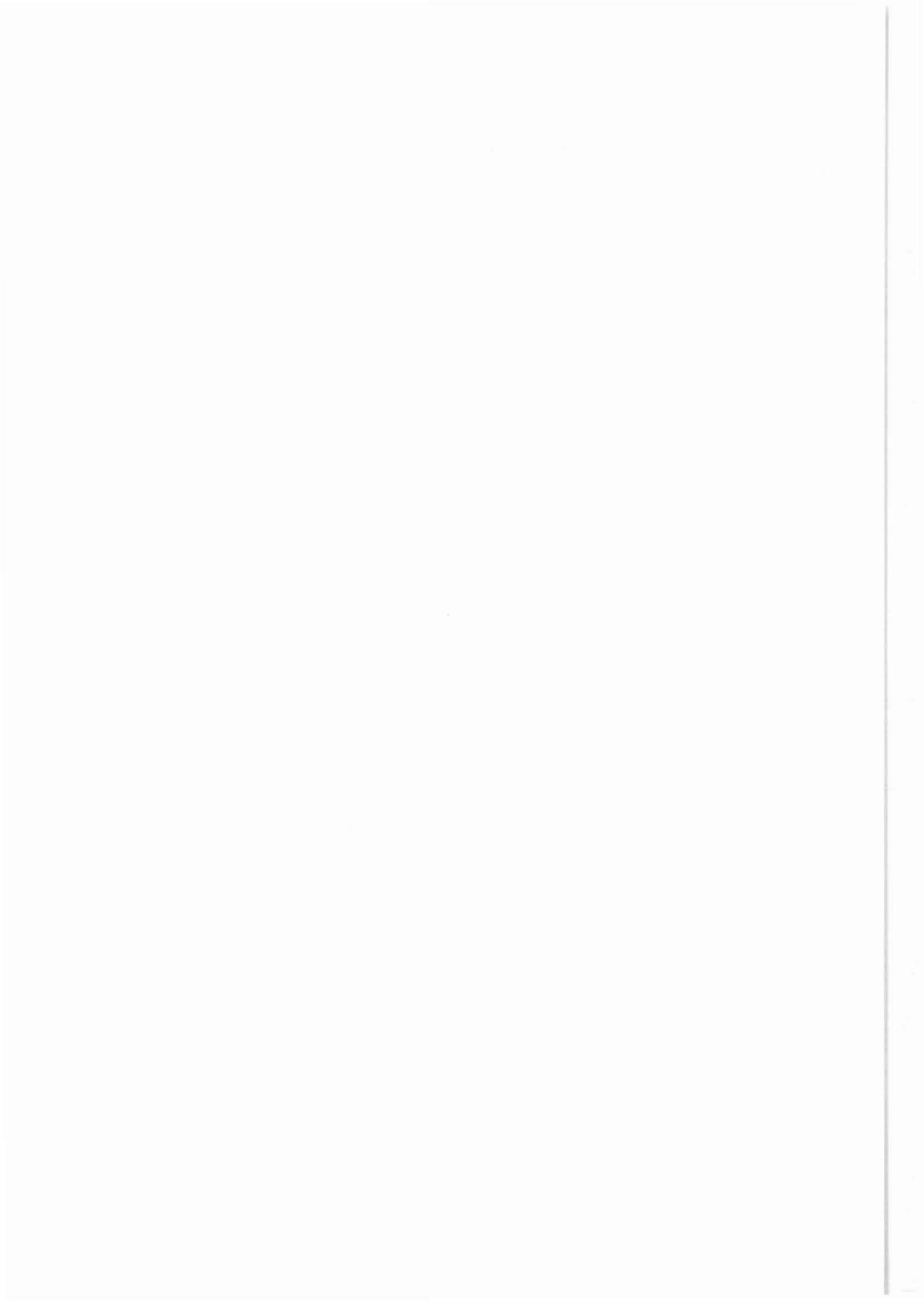
Bild 7 : Temperaturabhängigkeit der Biegeechselfestigkeit von Metallen nach Forrest / 5.4/

Eastman Christensen GmbH

Christensenstraße 1
3100 Celle

Erarbeitung eines Konzepts für die weitere Entwicklung von
Untertageantrieben, insbesondere Verdrängermotoren
und Turbinen, zum Einsatz
in der Kontinentalen Tiefbohrung

Dipl.-Ing. H. Daenicke
Dr.-Ing. V. Krüger



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung und Aufgabenstellung.....	282
2. Status Untertageantriebe, Anforderungen.....	283
2.1 Geschichtliche Entwicklung Untertageantriebe...	283
2.2 Gründe für den Einsatz von Bohrlochsohlen- motoren.....	285
2.3 Arten von Untertageantrieben.....	286
2.4 Aufbau von Untertageantrieben.....	288
2.5 Stand der Technik.....	290
2.6 Festlegung der Anforderungen an den Unter- tageantrieb bei der KTB.....	290
2.6.1 Vorgaben seitens KTB.....	290
2.6.2 Festlegen des Werkzeugdurchmessers.....	290
2.6.3 Leistungsbedarf von Meißeln.....	290
2.6.3.1 Leistungsbedarf von Rollenbohr- und Dia- mantwerkzeugen im kristallinen Hartgestein.....	291
2.6.4 Erforderliche Leistungsdaten der Motoren.....	296
2.6.4.1 Schnellaufende Motoren für Diamantmeißel.....	296
2.6.4.2 Langsamlaufende Motoren für Rollenmeißel.....	298
3. Lösungsmöglichkeiten.....	302
3.1 Übersicht.....	302
3.2 Lösungsmöglichkeit für schnellaufende Motoren..	302
3.3 Lösungsmöglichkeit für langsamlaufende Motoren.	305
3.3.1 Verdrängermotoren.....	305
3.3.1.1 Moinaeu Motor.....	305
3.3.1.2 Flügelzellenmotor.....	306
3.3.2 Turbinen.....	308
3.3.2.1 Einsatz von Bremsstufen.....	308
3.3.2.2 Verwendung eines Drehzahlbegrenzers.....	313
3.3.3 Schnellaufende Turbine mit Untersetzungs- getrieben.....	316
4. Planung des erforderlichen Entwicklungs- projektes.....	320
4.1 Diskussion der Lösungsmöglichkeiten.....	320
4.2 Vorschlag für den Einsatz von Bohrloch- sohlenmotoren in der KTB Hauptbohrung.....	323

Kurzfassung KTB Studie

1. Einführung und Aufgabenstellung

Im geowissenschaftlichen Projekt "kontinentale Tiefbohrung" sollen Erkenntnisse über die Zusammensetzung und Entstehung der Erdkruste gewonnen werden. Um die geplante über-tiefe Bohrung unter wirtschaftlich und technisch optimalen Voraussetzungen durchführen zu können, müssen geeignete Bohrwerkzeuge zur Verfügung stehen. Dazu gehören ganz besonders Untertageantriebe, deren Einsatz als Meißeldirektantrieb besonders in sehr tiefen Bohrungen günstiger ist als die Anwendung des Rotarybohrverfahrens. Darüber hinaus können bestimmte Bohrarbeiten, wie beispielsweise das gezielte Ablenken, sinnvoll nur mit Meißeldirektantrieben durchgeführt werden. Eine sachgerechte Entwicklung von Untertageantrieben für extreme Bedingungen stellt eine Voraussetzung für das Gelingen der Bohrung dar. Vor Beginn der eigentlichen Entwicklung von Antrieben sollte eine detailliert durchzuführende Studie zur Festlegung des Entwicklungsprogramms stehen.

Das Gesamtziel der Studie besteht darin, durch Bewertung der zu erwartenden Anforderungen an die Untertageantriebe für die kontinentale Tiefbohrung und durch realistische Abschätzung des Entwicklungspotentials die Grundlage für anschließend durchzuführende Entwicklungsarbeiten zu schaffen.

Insbesondere sollen die prinzipiellen Vorzüge und Nachteile von Verdrängermotoren und Turbinen in Relation zu den Bohrbedingungen im kristallinen Hartgestein klar herausgestellt werden. Für den jeweiligen Antriebstyp sollten die Umgebungs- und Betriebsbedingungen eingegrenzt werden, unter denen der Einsatz sinnvoll ist und für die eine Weiterentwicklung der Antriebe mit großer Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führt.

Im Rahmen der Studie wurde zunächst ein allgemeiner Überblick über die grundsätzlichen Arten von Bohrlochsahlenmotoren gegeben, sowie die geschichtliche Entwicklung von Meißeldirektantrieben aufgezeigt. Das Kapitel Stand der Technik befaßt sich bezogen auf die KTB-Erfordernisse mit den in der westlichen Welt verfügbaren Bohrlochsahlantrieben und gibt auch einen Überblick über die in der UdSSR verfügbaren Antriebe.

2. Status Untertageantriebe, Anforderungen

Es wurden verschiedene Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt, die auf den speziellen Anforderungen der KTB an die Bohrlochsohlenmotoren basieren. Die Möglichkeiten wurden bewertet und darauf aufbauend ein detaillierter Vorschlag zur Durchführung eines Entwicklungsvorhabens einschließlich einer Zeit- und Kostenabschätzung ausgearbeitet.

2.1 Geschichtliche Entwicklung Untertageantriebe

Die "Rotary"- oder Drehbohrtechnik kann grundsätzlich in zwei Klassen unterschieden werden, und zwar danach, ob sich der Motor, mit dem der Bohrmeißel angetrieben wird, übertage oder untertage in Nähe der Bohrlochsohle befindet. Der Gedanke, den Bohrmeißel mit einem Bohrlochsohlenmotor direkt anzutreiben, anstatt das Bohrgestänge als lange Antriebswelle zu benutzen, ist so alt wie das Rotaryverfahren selbst.

Theoretisch eignen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Motortypen für den Antrieb, durchgesetzt haben sich aber aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und wegen ihrer Einfachheit nur solche Motoren, die ihre Antriebsenergie aus der ohnehin nötigen Bohrspülung beziehen. Diese sind hydrodynamische Antriebe oder Turbinen und hydrostatische Antriebe oder Verdrängermotoren.

Hydrostatische Motoren fanden Eingang in die Bohrtechnik erst in den sechziger Jahren, die frühesten Patente für Turbinen wurden dagegen bereits in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts ausgestellt. Dabei handelte es sich allerdings noch um die Turbine als integralen Bestandteil des Bohrmeißels.

Die erste Bohrturbine, aufgebaut mit nur einer schnelllaufenden Stufe und Untersetzungsgetriebe, beruht auf einem russischen Patent von 1923 und wird 1924 zum ersten Mal im Feld in Baku eingesetzt. Fast gleichzeitig, 1924 in den USA und 1925 in Frankreich, werden die ersten mehrstufigen Turbinen patentiert, kurze Zeit später auch gebaut und im Feld eingesetzt. Bemerkenswert ist die von Lachamp und Perret patentierte Turbine, die durch den Bohrstrang eingelassen werden konnte und mit einem durch Fliehkraft radial ausfahrenden Rollenmeißel ausgerüstet war. Aus verschiedenen, aber meist technischen Gründen, konnten sich diese Turbinen nicht durchsetzen. Während in der westlichen Welt mit Turbinen lange Zeit überhaupt nicht gearbeitet wurde, wurden die Turbinen in der Sowjetunion seit 1934 konsequent weiterentwickelt. Alle heute - auch die im Westen - verwendeten Turbinen stammen im Prinzip von diesen Entwicklungen ab. Der Anteil des Turbinenbohrens lag in der UdSSR in den sech-

ziger Jahren bei fast 90%, ist aber vermutlich aufgrund von verbesserten Rotary-Techniken inzwischen zurückgegangen. Als Bohrmeißel werden beim Turbinenbohren in der UdSSR überwiegend Rollenmeißel eingesetzt. Der Einsatz von Rollenmeißeln ist auch der wesentliche Grund für das Bestreben, Turbinen mit niedriger Drehzahl und hohen Drehmomenten zu entwickeln. Der Einsatz von Diamantmeißeln in der UdSSR mit Turbinen ist für den insgesamt hohen Anteil des Turbobohrens überraschend gering.

In Deutschland wurden die ersten Bohrturbinen 1938 - 1940 von der Firma Voith gebaut. Erste Erfolge im Turbinenbohren in Westeuropa wurden jedoch erst 1956 nach erfolgreichen Testläufen in Südfrankreich in St. Bauville mit den ersten zwei von Neyrpic in Grenoble gebauten 10" Turbinen erzielt. Für Richtbohrarbeiten wurden in der westlichen Welt nach 1960 neben Neyrpic-Antrieben überwiegend Turbinen eingesetzt, die in Lizenz nach russischen Konstruktionsunterlagen gebaut wurden. Für das Leistungsbohren finden hauptsächlich Neyrpic-Turbinen und die von ehemals Christensen Diamond Products entwickelten Antriebe Verwendung.

Die Entwicklung von Meißeldirektantrieben mit hydrostatischer Kennlinie begann 1957 mit der Patentanmeldung von W. Clark für einen 1/2-gängigen Motor.

1962 bis 1964 führte das "Institut für Entwicklung von Bohrtechniken der Sowjetunion" (VNIIBT) Grundsatzuntersuchungen an Moineau-Motoren durch, die 1966 zur Fertigung von 9/10 gängigen Prototypen führten, die als D-Motoren bekannt geworden sind.

Die Erfolge, die Dyna Drill mit den Motoren beim Richtbohren erzielte, weckte das allgemeine Interesse an Moineau Motoren, besonders an mehrgängigen Motoren.

1975 erwarb Schlumberger eine Lizenz und begann die Fertigung eines 5/6 gängigen Motors, der mit dem Namen "Georotor" von BCT patentiert wurde. Etwa zur gleichen Zeit begann Baker mit der Entwicklung eines 3/4 gängigen Motors.

1977 wurde von Christensen der Navi Drill als zweiter 1/2 gängiger Moineau Motor im Markt eingeführt.

Für die 9/10 gängigen Motoren aus der UdSSR wurden Lizenzen für Vertrieb und Fertigung an die Firma Drilex vergeben.

Weitere Firmen, die hydrostatische Motoren nach dem Moineau Prinzip vertreiben, sind Teleco/Magna Drill, Neyrfor, Maxi Torque, Baker/Hughes.

In den letzten Jahren hat sich ein starker Trend hin zu Multilobmotoren mit hohem Drehmoment und niedriger Drehzahl abgezeichnet, um besonders Compact Meißel, aber auch Rollenmeißel antreiben zu können.

2.2 Gründe für den Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren

Beim Rotary-Bohrverfahren ist der Bohrmeißel mit einem Strang aus Stahlrohren verbunden, dessen unterer Bereich schwerer ausgeführt ist, um die Meißellast aufzubringen und den größten Teil des Strangs unter Zugspannung zu halten. Dadurch werden ein Ausknicken des Gestänges und damit gleichzeitig hohe Beanspruchung und hoher Verschleiß verhindert. Über ein im Drehtisch axial verschiebbares Rohr mit äußerem Vielkantprofil, die Mitnehmerstange, wird der Bohrstrang gedreht.

Bei Einsatz von durch die Bohrspülung angetriebenen Bohrlochsohlenmotoren hat der Bohrstrang theoretisch nur noch die Aufgabe, den Spülungs- und damit Energietransport zu übernehmen und außerdem das Reaktionsmoment des Motors abzustützen. Dieses könnte auch direkt zwischen Motor und Bohrlochwand geschehen, ebenso wie die Meißelbelastung auch direkt von einem mit dem Motor verbundenen Vorschubelement übernommen werden könnte.

Der wesentliche Unterschied für den Einsatz liegt aber darin, daß der Bohrstrang zwar mitgedreht werden kann, aber zum reinen Antrieb des Meißels nicht gedreht werden muß. Dadurch ergeben sich zwei sehr bedeutende Vorteile. Durch Einsatz von Knickstücken oberhalb des Motors oder als integralem Bestandteil des Motors kann der Motor relativ zur Bohrlochachse gekippt werden und zur Änderung von Bohrlochneigung oder -richtung ausgerichtet werden. Dieses ist die heute ausschließlich angewandte Methode, vertikale Bohrungen abzulenken oder im bereits geneigten Bohrloch schnelle Rich-

tungsänderungen des bereits geneigten Bohrlochs zu bewirken. Der zweite Vorteil liegt darin, daß bei stehendem oder nur langsam mitgedrehtem Bohrstrang kein oder nur niedriger abrasiver Verschleiß bei der Berührung des Strangs mit der Bohrlochwand auftritt. Der Verschleiß des Bohrstrangs wird zusätzlich dadurch niedrig gehalten, daß das vom Bohrstrang aufzunehmende Reaktionsmoment des Motors im allgemeinen deutlich niedriger ist, als das Moment, das beim Rotary-Bohren zum Antrieb des Meißels benötigt wird.

Die höhere Leistung, die der Bohrlochsohlenmotor an den Meißel abgibt, entsteht durch die üblicherweise deutlich höhere Drehzahl. Auch ergibt sich durch die höhere Drehzahl, die mit dem Bohrgestänge nicht erreicht werden kann, die Möglichkeit, Diamantbohrmeißel sinnvoll einzusetzen, um gleichzeitig hohe Bohrfortschritte und höhere Meißelstandzeiten als mit Rollenmeißeln zu verwirklichen.

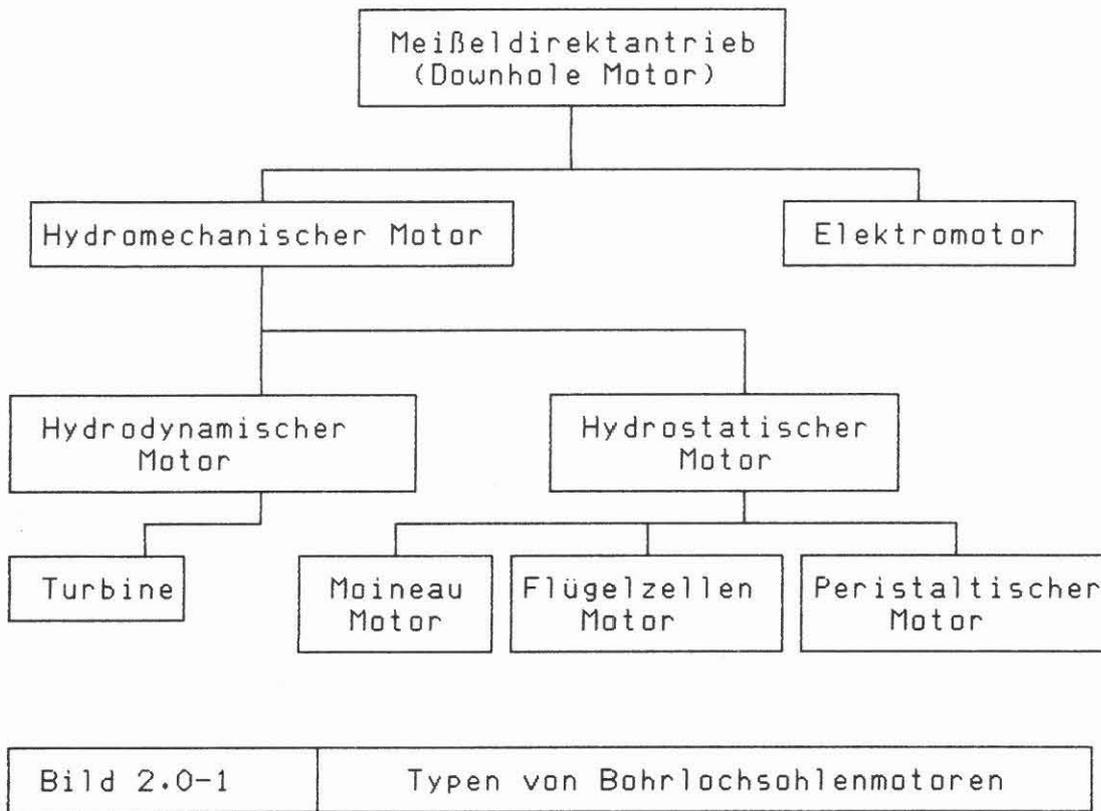
Als Nachteil ist aber festzustellen, daß Rollenmeißel entweder gar nicht oder nur mit Abstrichen hinsichtlich ihrer Lebensdauer betrieben werden können. Hier setzen die wirtschaftlichen Überlegungen an, die dazu führen, daß Bohrlochsohlenmotoren mit Diamantbohrmeißeln nur dann verwendet werden, wenn entweder bei reinen Richtbohrarbeiten keine technisch sinnvolle Alternative besteht, oder wenn in tiefen Bohrungen niedrigere Bohrfortschritte und kürzere Lebensdauer von Rollenmeißeln zu unverträglich hohen Kosten durch lange Stillstandszeiten der Bohranlage führen.

2.3 Arten von Bohrlochsohlenmotoren

Theoretisch eignen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Motortypen für den Antrieb, durchgesetzt haben sich aber aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und wegen ihrer Einfachheit solche Motoren, die ihre Antriebsenergie aus der ohnehin nötigen Bohrspülung beziehen. Diese sind hydrodynamische Antriebe oder Turbinen und hydrostatische Antriebe oder Verdrängermotoren nach dem Moineau Prinzip.

Vorgeschlagen und zum Teil auch im Feld eingesetzt wurden neben anderen hydromechanischen Motoren auch Elektromotoren, die aber über das Prototypenstadium nur in der UdSSR kommerzielle Verwendung gefunden haben.

Bild 2.0-1 gibt einen prinzipiellen Überblick über die unterschiedlichen Systeme.



Turbinen sind hydrodynamische Antriebe, die die Bewegungsenergie der strömenden Flüssigkeit in mechanische Arbeit umsetzen. Die Drehmoment-Drehzahlabhängigkeit hat grundsätzlich anderen Charakter als die der Verdrängermotoren. Bei konstantem Volumenstrom stellt sich die Drehzahl abhängig vom geforderten Moment ein. Druck und damit zugeführte Leistung sind unabhängig von der wirklich benötigten Leistung und nahezu konstant. Aufgrund der fast ausschließlichen Verwendung von Metallen für die Turbinenbauelemente und dem berührungsfreien Arbeiten der Turbinenräder ist auch eine allgemein höhere Lebensdauer von Turbinen im Vergleich zu Moineau-Motoren zu erwarten.

Die nach dem Verdrängerprinzip arbeitenden Motoren halten bei konstantem Volumenstrom eine nahezu feste Drehzahl ein. Leistung und Drehmoment werden durch den technisch möglichen Druckabbau bestimmt. Die Tatsache, daß der Druckabbau dem abgeforderten Drehmoment proportional ist, bedeutet eine dem wirklichen Bedarf angepaßte Energiezufuhr durch die Spülungsflüssigkeit.

Der nach dem Moineau Prinzip arbeitende Verdrängermotor ist der einzige kommerziell verfügbare hydrostatische Antrieb in der Bohrtechnik. Nach diesem Prinzip arbeitende Pumpen haben in vielen Bereichen der Industrie Anwendung gefunden, besonders dann, wenn Medien mit hohem Anteil an Feststoffen oder abrasiven Bestandteilen gefördert werden müssen. Diese Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen der Spülflüssigkeit und weiterhin die bereits genannte günstige Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik sind Gründe für die fast ausschließliche Verwendung von Moineau-Motoren in der Bohrtechnik.

Bedingt durch die Auskleidung des Stators der Moineau-Motore mit Elastomeren ergibt sich jedoch eine Limitation hinsichtlich der Temperatur, die für zur Zeit verfügbare Motoren bei ca. 150° C liegt, was die Anwendung bei der KTB deutlich einschränkt.

2.5 Stand der Technik

Stand der Technik für das Niederbringen von Bohrungen im kristallinen Hartgestein ist die Verwendung von Rollenmeißeln. Der Einsatz von Diamantmeißeln hat sich bisher nicht bewährt, da sich im Zentrum des Meißels zu geringe Schnittgeschwindigkeiten ergeben.

Aus der Verwendung von Rollenmeißeln ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach einer sehr niedrigen Drehzahl, um akzeptable Standzeiten zu erzielen. Für Rollenmeißel günstige Drehzahlen lassen sich neben dem Rotaryverfahren in erster Linie mit hydrostatischen Antrieben realisieren, die jedoch zur Zeit keine ausreichende Temperaturbeständigkeit aufweisen, so daß der Einsatz von Turbinen, die sich relativ einfach auf hohe Temperaturbeständigkeit ausrüsten lassen, zur Zeit die einzige brauchbare Lösung zum Antrieb vorort anbieten. Allerdings weisen Turbinen systembedingt hohe Drehzahlen auf und erfordern daher für den Einsatz von Rollenmeißeln Maßnahmen zur Drehzahlreduzierung.

In der Sowjetunion, wo das Turbinenbohren weiter verbreitet ist als das Rotaryverfahren, werden zur Drehzahlreduzierung überwiegend Bremsstufen und Untersetzungsgetriebe verwendet. Einen Eindruck über den Stand der Technik in der UdSSR läßt sich aus dem Bericht von A. Kozlovsky über die Kola Bohrung gewinnen. Der im Vergleich zur westlichen Welt extrem hohe Anteil des Turbinenbohrens in der UdSSR läßt prinzipiell einen hohen Standard vermuten. Allein ein Werk im Ural soll pro Jahr 8000 Turbinen fertigen, was für westliche Verhältnisse eine nahezu unvorstellbare Größenordnung bedeutet. Betrachtet man allerdings die von Kozlovsky aufgeführten

Daten aus der Kola Bohrung (Tab 2.5-1), so läßt sich feststellen, daß die dort erzielten Ergebnisse hinsichtlich Meißelstandzeit und Turbinenerwartungsintervalle allerdings unakzeptabel niedrig sind. Das wesentliche Problem scheint hier neben den sehr niedrigen Meißelstandzeiten von max. 10 m auch die sehr kurzen Wartungsintervalle der Turbinen zu sein, was in erster Linie auf die nicht ausreichende Temperaturbeständigkeit der Motorkomponenten zurückzuführen ist. Den Ausführungen von Kozlovsky zufolge konnte bei den in der Kola Bohrung eingesetzten Turbinen die Temperaturgrenze bis auf 200° C erhöht werden.

Deutliche Erhöhungen der Meißelstandzeiten konnten offensichtlich durch Verringerung der Drehzahl und durch die Verwendung von Dämpfern zur Reduzierung der im Betrieb auftretenden Schwingungen erzielt werden. Durch die Verwendung von Bremsstufen konnte die Nenndrehzahl von 520 min⁻¹ auf ca. 200 min⁻¹ abgesenkt werden. Diese Maßnahme erfordert allerdings eine relativ hohe Stufenzahl und bedingt einen niedrigen Gesamtwirkungsgrad von unter 20%. Ein derartig schlechter Wirkungsgrad kann gerade in sehr großen Teufen zu Problemen hinsichtlich der erforderlichen Pumpenleistung führen. Untersetzungsgetriebe ermöglichen dagegen niedrige Drehzahlen unter 200 min⁻¹ bei gleichzeitig gutem Gesamtwirkungsgrad.

Im Gegensatz zur westlichen Welt, wo das Turbinenbohren zugunsten des Verdrängermotors rückläufig ist, hat sich der hydrostatische Motor in der Sowjetunion offensichtlich noch nicht durchgesetzt. Der mit dem 9/10 gängigen Moineau Motor D2-172M abgeteufte Anteil lag lediglich bei 4%. Aufgrund der sehr niedrigen Drehzahl konnten mit diesem Motor zwar die Bohrmeter pro Meißelmarsch erhöht werden, Schwächen der Gelenkwelle verursachen jedoch sehr kurze Wartungsintervalle. Die Elastomerauskleidung des Stators versagte bei statischen Temperaturen von 140 - 150° C und auch hochtemperaturbeständige Elastomere konnten nicht über 160° C eingesetzt werden.

Grundsätzlich anders stellt sich die Situation in der westlichen Welt dar. Für den mittleren Drehzahlbereich bieten mehrere Hersteller technisch ausgereifte Moineau-Motoren an. Gleiche Zuverlässigkeit lassen die mehrgängigen Motoren erwarten, die zunehmend im Markt eingeführt werden. Mit diesen mehrgängigen Systemen lassen sich problemlos Drehzahlen unter 150 min⁻¹ realisieren. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, daß selbst durch intensive Weiterentwicklung der Elastomere in den nächsten Jahren Moineau Motoren für Temperaturen von deutlich über 200° C zur Verfügung stehen werden.

Bezüglich der Turbinen sind in der westlichen Welt zur Zeit keine Werkzeuge verfügbar, die bei Temperaturen von

2.6 Festlegung der Anforderungen an den Untertageantrieb

Neben den von der KTB vorgegebenen Parametern wie Temperatur, Teufe, Bohrlochdurchmesser und Volumenstrom sind die Werkzeugdurchmesser sowie die Leistungsdaten der Untertageantriebe festzulegen.

2.6.1 Vorgaben seitens KTB

Temperatur: Erwartung bei Endteufe 270 \pm 50 C

Bohrloch-
Durchmesser,
Teufen:

10 5/8"	5000 - 10000 m
8 1/2"	10000 - Endteufe

Volumenstrom: 10 5/8" Bohrloch ca. 1000 l/min
8 1/2" Bohrloch max. 1000 l/min

Bohrspülung:

Spülungstyp: wasserbasisches anorganisches Spülungssystem,
feststofffrei

Dichte: 1,05 kg/dm³

YP : 2,5 Pa
PV : 22 m Pas Fließmodell Bingham

2.6.2 Festlegen des Werkzeugdurchmessers

Um eventuell notwendig werdende Fangarbeiten zu ermöglichen, werden folgende max. Werkzeugdurchmesser festgelegt:

8 1/2" Bohrloch	Werkzeugdurchmesser 6 3/4"
10 5/8" Bohrloch	Werkzeugdurchmesser 8 1/2"

2.6.3 Leistungsbedarf von Meißeln

Für die Festlegung der Leistungsdaten der Untertageantriebe insbesondere der langsamlaufenden Turbinen ist es erforderlich, den Leistungsbedarf der Meißel zu berechnen.

Da neben dem Einsatz von Rollenmeißeln auch die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden sollte, schnellaufende Diamantmeißel einzusetzen, werden Leistungsabschätzungen auch für diese Meißeltype durchgeführt.

2.6.3.1 Leistungsbedarf von Rollenbohr- und Diamantwerkzeugen im kristallinen Hartgestein

1. Rollenmeißel

Allgemein stehen nur wenig ausführliche und detaillierte Daten über das Bohren im kristallinen Hartgestein zur Verfügung. Trotzdem wird hier der Versuch unternommen, den Leistungsbedarf von Vollbohrwerkzeugen abzuschätzen, die gegenüber den Kernbohrwerkzeugen höhere Leistungen benötigen.

Rollenbohrwerkzeuge wurden bisher wohl am weitestgehenden von T.M. Warren untersucht, der eine Beziehung zwischen Drehmoment bezogen auf Meißellast und Meißelgröße gegenüber dem Bohrfortschritt bezogen auf Drehzahl und Meißelgröße ermittelte. Dabei war der Einfluß des Bohrlochdruckes offensichtlich zu vernachlässigen. Für Hartgestein ermittelte er die folgende Beziehung.

$$M \text{ (Nm)} = (1,3 + 8,1 \sqrt{\frac{\text{ROP (ft/hr)}}{n \text{ (1/min)} \cdot d \text{ (in)}}}) \cdot d \cdot \text{WOB (lbf)} \cdot 1,36 \text{ (lbf} \rightarrow \text{Nm)}$$

Für Vollbohrwerkzeuge der Größen 8 1/2" und 10 5/8" ergeben sich hiermit für eine angenommene Belastung von 200 kN die in Bild 2.6-1 dargestellten Drehmomente in Abhängigkeit von der Drehzahl. Dabei ist zu beachten, daß das Drehmoment linear von der Meißellast abhängt. Bei den Bohrungen im Granit im Rahmen des Hot Dry Rock Projekts in Cornwall konnte beobachtet werden, daß zum Zerstören der Feldspatkristalle ein hoher Andruck benötigt wurde (Beswick). Auch in anderen Bohrungen wurde der Zusammenhang von hohem Andruck, niedriger Drehzahl und hohem spezifischem Drehmoment (T/WOB) ermittelt.

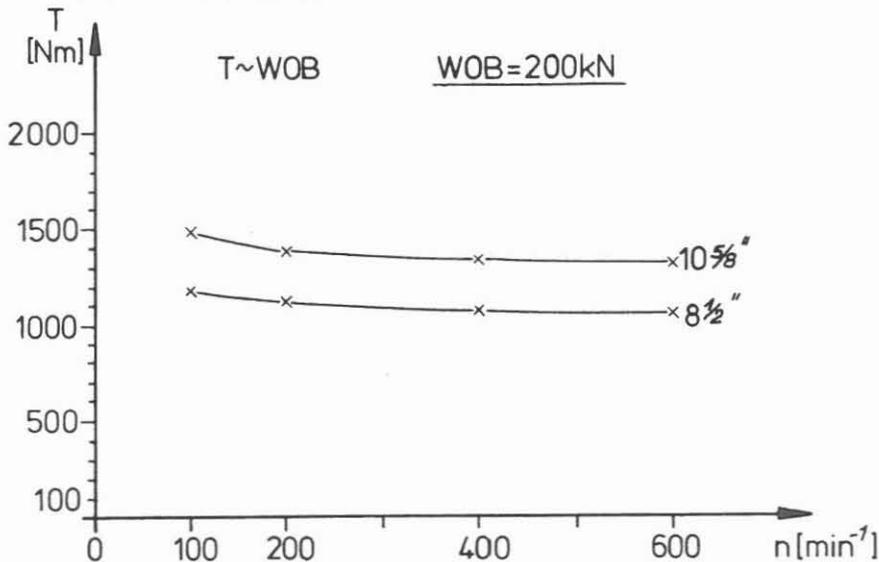


Bild 2.6-1 Drehmomente für Rollenbohrmeißel in Hartgestein nach T.M. Warren

Tiraspolsky z.B. gibt für 7 - 12" Rollenmeißel folgende spez. Drehmomente an:

harte Formationen	5 < 8,5	Nm/kN
mittelharte Formationen	9 < 12,5	Nm/kN
weiche Formationen	13 < 16,5	Nm/kN

Daraus lassen sich folgende Kopplungswerte μ_k bestimmen:

harte Formationen	$\mu_k = 0,11$
mittelharte Formationen	$\mu_k = 0,20$
weiche Formationen	$\mu_k = 0,29$

Unter Berücksichtigung der von den Rollenmeißelherstellern angegebenen max. spez. Meißellasten Wsp von bis zu 1400 N/mm für extra harte Formationen ergeben sich damit folgende max. Meißellasten und die daraus resultierenden erforderlichen Drehmomente.

Bohrloch 8 1/2" :	WOB = 300 kN,	$T_{\text{erf}} = 1782$ Nm
Bohrloch 10 5/8" :	WOB = 380 kN,	$T_{\text{erf}} = 2820$ Nm

Bei den Angaben bezüglich einer für Rollenmeißel im Hartgestein günstigen Drehzahl ergeben sich recht unterschiedliche Werte. Als für Rollenmeißel max. erträgliche Drehzahl gibt Tiraspolsky 400 min^{-1} an, deren Überschreitung unakzeptabel kurze Standzeiten zur Folge hat. Als günstigen Bereich nennt er $200 - 300 \text{ min}^{-1}$. Von den Rollenmeißelherstellern hingegen werden für harte Formationen Drehzahlen von unter 100 min^{-1} empfohlen.

Laborversuche mit Rollenmeißeln (BCT-SMF) im Granit haben zwar gezeigt, daß sowohl Drehzahl als auch Meißellasterhöhung den Bohrfortschritt deutlich steigern (Bild 2.6-2), auf der anderen Seite zeigt Kurochbin aber auch, daß Last und Drehzahlsteigerung die Standzeit wesentlich reduzieren (Bild 2.6-3), so daß für die Praxis ein sinnvoller Kompromiß zwischen Bohrfortschritt und Meißelstandzeit zu suchen ist. Bei hohen Roundtripzeiten, wie sie bei der KTB zu erwarten sind, ist der Bohrfortschritt sicherlich relativ unbedeutend, so daß eine möglichst hohe Standlänge angestrebt werden sollte.

Des weiteren ist zu berücksichtigen, daß die von Tiraspolsky gemachten Angaben sich auf Quellen aus der russischen Literatur beziehen, d.h. daß aufgrund des überwiegenden Antriebes der Rollenmeißel durch Turbinen die von Meißelherstellern für Rollenmeißel genannten günstigen Drehzahlen in der Sowjetunion in der Vergangenheit fast nie erreicht wurden.

Fig. 265a. ACR 8½" diameter three-cone bit in granite. BCT tests on SMF bench. $v = f(n)$.

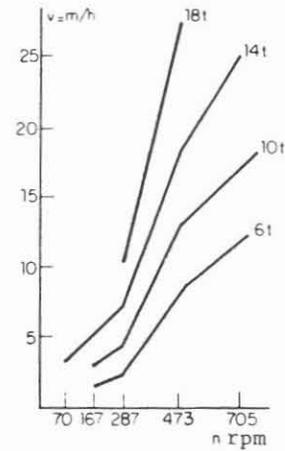


Bild 2.6-2 Bohrfortschritt eines 8 1/2" Rollenmeißels im Granit in Abhängigkeit von Drehzahl und Belastung nach Tiraspolsky

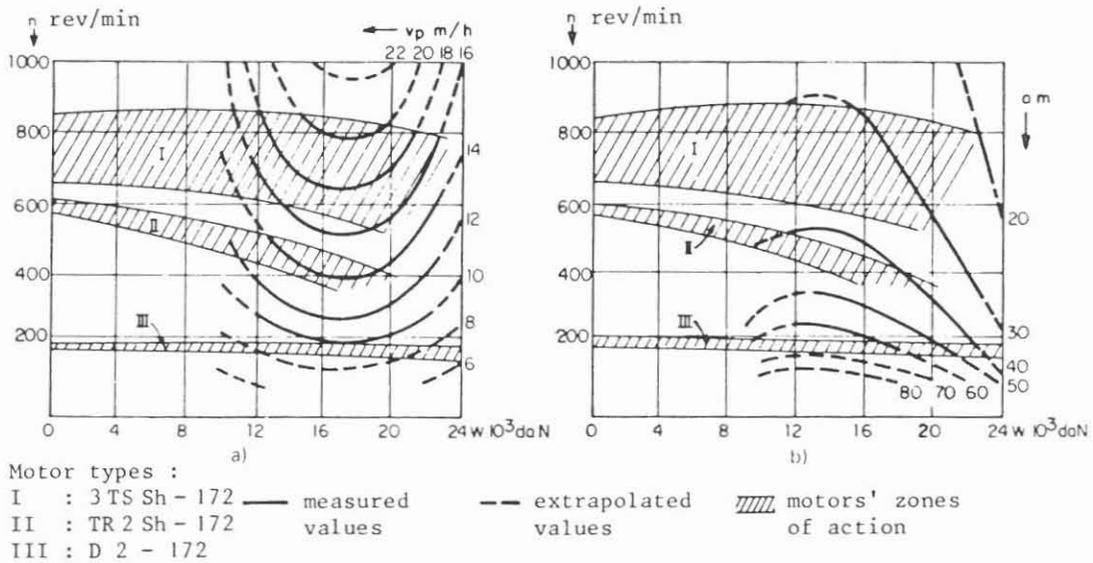


Bild 2.6-3 Bohrfortschritt und Lebensdauer eines 7 1/2" Rollenmeißels nach Tiraspolsky

Allgemein gilt, daß der Rollenmeißel an den Rollenzähnen verschleißt, wenn er unter hoher Drehzahl und geringer Last gefahren wird; andererseits verschleiben die Rollenlager bei langsamer Drehzahl und hoher Last. Der Verschleiß des Meißels hat nicht zuletzt auch einen deutlichen Einfluß auf den Wirkungsgrad, der dann bis unter 50% absinken kann.

2. Diamantmeißel

Im Gegensatz zum Rollenmeißel bleibt beim imprägnierten Diamantmeißel der Wirkungsgrad bis zum Erreichen der Verschleißgrenze im wesentlichen konstant. Es werden lediglich die Spülungswege nach und nach mit dem Abtrag der imprägnierten Schneidelemente kleiner. Die Schneidelemente selbst zeigen einen leichten Anstieg des Verschleißes im letzten Drittel des Abtrags, der dadurch bedingt ist, daß die Diamantsplitter sich im Fertigungsprozeß etwas absetzen.

Erkenntnisse aus bekannten Bohrungen im kristallinen Hartgestein lassen sich für imprägnierte Diamantwerkzeuge nur schwer ziehen, da einerseits in der Regel nur Kernbohrwerkzeuge zum Einsatz kommen, andererseits die eingestellten Parameter offensichtlich unzureichend waren (Tab. 2.6-1). In Modellversuchen mit Schneidstiften sowie eigenen Bohrversuchen in Cella konnte ermittelt werden, daß für imprägnierte Diamantwerkzeuge ein Andruck von ca. $10 - 15 \text{ N/mm}^2$ Segmentfläche benötigt wird, um guten Bohrfortschritt zu erzielen.

Um eine ausreichende Bespülung der Bohrlochsohlenfläche zu gewährleisten, sollten die von den Diamantmeißelherstellern gemachten Angaben von mind. 1130 l/min für das $8 \frac{1}{2}$ " Bohrloch bzw. 1550 l/min für das $10 \frac{5}{8}$ " Bohrloch nicht unterschritten werden. Die Schnittgeschwindigkeit sollte mindestens 3 m/s betragen und kann durchaus auf über 5 m/s gesteigert werden.

In den bisherigen Bohrungen im kristallinen Hartgestein wurden nur Schnittgeschwindigkeiten um $0,5 \text{ m/s}$ erreicht, lediglich in der Bohrung Urach kam neben dem Rotarybohren auch ein Motor zum Einsatz, so daß die Schnittgeschwindigkeit von $0,7 \text{ m/s}$ auf $2,4 \text{ m/s}$ gesteigert wurde. Dies hatte den 3-fachen Bohrfortschritt zur Folge, wobei gleichzeitig die Standzeit des Meißels verdoppelt werden konnte.

Unter Annahmen eines Kopplungsfaktors $\mu_k = 0,2$ ergeben sich damit für den Einsatz von imprägnierten Diamantmeißeln in der KTB Bohrung folgende Leistungsparameter:

Lokation	Gestein	D [mm]	d [mm]	Typ	Reibw. [-]	Ad [%]	ROP [m/h]	sk [m]	WOB [kN]	n [min]	v.sp [l/mi]	dn [mm]	Ak [mm ²]	Ad [mm ²]	WOB/Ad [N/mm ²]	vs [m/s]	v.sp/Ak [l/h ² mm ²]	M [Nm]	P [kW]
Boettstein	Kristal.	158	88.9	TA imp	0.08	50	0.43	15	75	60	550	123.5	13400	6700	11.2	0.4	2.46	370	2.3
Boettstein	Kristal.	158	88.9	TB imp	0.08	50	0.61	18	75	60	550	123.5	13400	6700	11.2	0.4	2.46	370	2.3
Boettstein	Kristal.	158	88.9	TC imp	0.08	50	0.56	11.8	75	60	550	123.5	13400	6700	11.2	0.4	2.46	370	2.3
Weiach	Kristal.	158	88.9	TA imp	0.08	50	0.35	13.1	40	50		123.5	13400	6700	6.0	0.3	0.00	198	1.0
Weiach	Kristal.	158	88.9	TB imp	0.08	50	0.4	17.6	40	50		123.5	13400	6700	6.0	0.3	0.00	198	1.0
Weiach	Kristal.	158	88.9	TC imp	0.08	50	0.9	6.8	40	50		123.5	13400	6700	6.0	0.3	0.00	198	1.0
Schafisheim	Kris, verw	215.9	101.6	TA imp	0.08	50	0.51	10.6	45	80	750	158.8	28502	14251	3.2	0.7	1.58	286	2.4
Schafisheim	Kris, verw	215.9	101.6	BS geo	0.3	100	1.68	23.5	45	80	750	158.8	28502	28502	1.6	0.7	1.58	1072	9.0
Kaisten	Kristal.	134	85	SK imp	0.08	50	1.11	15.1				109.5	8428	4214	0.0	0.0	0.00	0	0.0
Leuggern	Kristal.	140	85	SK imp	0.08	50	1.25	12.7	30	80		112.5	9719	4860	6.2	0.5	0.00	135	1.1
Schafisheim	Kristal.	137	85	SK imp	0.08	50	1.17	14.8				111.0	9067	4533	0.0	0.0	0.00	0	0.0
Schwarzwald	GneisGran	122	79	WL imp	0.08	50	0.96	31				100.5	6788	3394	0.0	0.0	0.00	0	0.0
Schwarzwald	GneisGran	122	79	WL ss	0.3	100	0.96	31				100.5	6788	6788	0.0	0.0	0.00	0	0.0
Oberpfalz	Kristal.	135	101	imp	0.08	50	1	25.7				118.0	6302	3151	0.0	0.0	0.00	0	0.0
Urach	Kristal.	215.1	101.6	imp	0.08	50	0.58	11.1	70	85	1000	158.4	28231	14116	5.0	0.7	2.13	443	3.9
Urach	Kristal.	215.1	101.6	imp	0.08	50	1.65	21.8	70	295		158.4	28231	14116	5.0	2.4	0.00	443	13.7
BVS Celle	Kristal.	96	63	B9 imp	0.08	46.6	14	30	25	800	60	79.5	4121	1920	13.0	3.3	0.87	80	6.7
BVS Celle	Kristal.	96	63	B9L imp	0.08	38.4	14	30	25	800	60	79.5	4121	1582	15.8	3.3	0.87	80	6.7
Deutschland	hart, abra	215.9	0	S 279	0.08	50	1.7	200	100	800	1500	143.9	36610	18305	5.5	6.0	2.46	576	48.2
Deutschland	hart, abra	269.9	0	S 279	0.08	50	1.2	200	150	800	1800	179.9	57213	28607	5.2	7.5	1.89	1080	90.4
KTB	Kristal.	215.9	0	S 279	0.08	50	2.3	50	150	600	1000	143.9	36610	18305	8.2	4.5	1.64	864	54.3
KTB	Kristal.	269.9	0	S 279	0.08	50	1.5	50	200	600	1000	179.9	57213	28607	7.0	5.7	1.05	1439	90.4

Tabelle 2.6-1

Diamantwerkzeuge im Hartgestein

Bohrloch	8 1/2"	10 5/8"
Meißellast	100 - 150 kN	150 - 200 kN
Drehzahl ca.	400 - 800 min ⁻¹	350 - 650 min ⁻¹
Drehmoment	1080 - 1620 Nm	2025 - 2700 Nm
Antriebsleistung	45 - 136 kW	74 - 184 kW

2.6.4 Erforderliche Leistungsdaten der Motoren

Die erforderlichen Leistungsdaten der Bohrlochsohlenmotoren ergeben sich im Prinzip aus dem in Kapitel 2.6.3.1 dargestellten Leistungsbedarf der Bohrmeißel. Hier wird zusätzlich versucht abzuschätzen, inwieweit Motoren bereits verfügbar sind und diesen Leistungsbedarf annähernd abdecken.

2.6.4.1 Schnellaufende Motoren für Diamantmeißel

Für diesen Bereich kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, daß zumindest für den 8 1/2" Bohrlochbereich von den Leistungsdaten her die verfügbaren Turbinen der Größe 6 3/4" verwendet werden können, da sich die Motoren mit den derzeitigen Daten seit Jahren im Feld bewährt haben.

Probleme ergeben sich allerdings durch die von der KTB angestrebten extrem niedrigen Spülungsraten, da sich die Ausgangsleistung der Turbinen in Abhängigkeit von Volumenstrom mit der dritten Potenz ändert, so daß bei Beibehaltung der von der KTB geforderten Spülungsraten eine Anpassung des Drehmoments über die Stufenzahl oder eine komplette Neuauslegung erforderlich ist.

Beim hydrostatischen Antrieb hingegen ändert sich die Ausgangsleistung über die Drehzahl lediglich linear mit dem Volumenstrom, so daß sich unter diesem Aspekt Vorteile für den hydrostatischen Antrieb ergeben.

Für das 10 5/8" Bohrloch stehen für den Antrieb von Diamantbohrmeißeln bisher lediglich mittelschnellaufende Moineau Motoren in der Größe 7 3/4" - 8" zur Verfügung. Aus Gründen der Temperaturbeständigkeit sollen hier alternativ dazu die Möglichkeiten einer Turbine der Größe 8 1/2" aufgezeigt werden. Tabelle 2.6-2 zeigt als Übersicht die Leistungsdaten der bei EC verfügbaren Motoren in der Größe 6 3/4" und 8" für diesen Bereich, sowohl für den jeweiligen Auslegungsvolumenstrom, als auch für den geforderten Volumenstrom.

		Navi Drill 6 3/4"				Turbine* 6 3/4"				Navi Drill 8"	
		Mach 2		Mach 4		L2		S		Mach 2	
Spülungsrate	l/min	1600	1000	1600	1000	1600	1000	1600	1000	2400	1500
Drehzahl	min ⁻¹	431	270	844	528	853	533	1105	691	380	238
Drehmoment	Nm	2030	2030	1680	1680	1872	731	1508	589	2830	2830
Druckabfall	bar	40	40	64	64	89	35	101	39	32	32
Ausg. Leistung	MW	92	57	149	93	167	41	174	43	113	71
* Leistungsdaten für Spülgewicht g = 1,05 kg/l											
Tabelle 2.6-2		Eastman Christensen Bohrmotoren 6 3/4" und 8" für den "High Speed" Bereich im 8 1/2" und 10 5/8" Bohrlochabschnitt									

Für 1000 1/min liegen die Leistungsdaten der Turbinen 6 3/4" unakzeptabel niedrig, so daß entweder der Volumenstrom für den Betrieb zu erhöhen ist, oder Maßnahmen an der Turbine zur Leistungserhöhung erforderlich sind. Auch nehmen die Drehzahlen der als Beispiel aufgeführten Navi Drill Mach 2 Motoren bei den geringen Volumenströmen Werte an, die für den Diamantmeißelantrieb zu niedrig liegen, so daß diese Motoren zumindest bei den geforderten Volumenströmen für diese Anwendung ausscheiden.

Bei der Festlegung der Kenndaten der Motoren könnte man sich auf die vorgegebenen Volumenströme beschränken, es wurde jedoch als sinnvoll angesehen, auch höhere Volumenströme mit zu berücksichtigen. Unter diesem Gesichtspunkt wären dann die Daten von verfügbaren mittelschnelllaufenden Moineau Motoren ausreichend.

Für Turbinen ist auf jeden Fall entweder eine Anpassung der Stufenzahl in der Form vorzunehmen, daß das geforderte Drehmoment bei niedrigen Volumenströmen erreicht wird, oder eine Neuauslegung des Profils durchzuführen, die diese Forderung erfüllt.

Die Leistungsdaten bzw. erforderlich werdende Werkzeuganpassungen werden für folgende Volumenströme verglichen:

Bohrloch 8 1/2"	1000 1/min (max Volumenstrom für KTB-Anforderung Ringraumgeschwindigkeit = 1,2 m/s)
	1300 1/min (empfohlener Volumenstrom)
	1600 1/min (Nennvolumenstrom für 6 3/4" Werkzeuge)
Bohrloch 10 5/8"	1500 1/min (max. Volumenstrom für Ringraumgeschwindigkeit 1,2 m/s)
	1900 1/min (empfohlener Volumenstrom)
	2400 1/min (Nennvolumenstrom für 8" Werkzeuge).

2.6.4.2 Langsamlaufende Motoren für Rollenmeißel

Im Gegensatz zu Diamantmeißeln ist der Leistungsbedarf von Rollenmeißeln wesentlich geringer. Daher ist darauf zu achten, daß insbesondere die Turbinen nicht deutlich überdimensioniert werden, da sich dadurch ein für den Meißel

günstiger Betriebspunkt nicht oder nur unter Aufbringen von unzulässig hohen Meißellasten einstellen läßt, obwohl die Drehmoment / Drehzahl Charakteristik von Turbinen den grundsätzlichen Anforderungen aus der Praxis wie hohe Meißellast bei niedrigen Drehzahlen in harten Formationen und geringe Lasten bei höheren Drehzahlen bei weichen Formationen durchaus entspricht. Da jedoch die spezifischen Drehmomente der Meißel in weichen Formationen bis zum Faktor 4 höher sein können als in extrem harten Formationen, würde eine Turbine, die für weiche Formationen ausgelegt ist, in harten Formationen weit rechts vom Nennpunkt bei ungünstigem Wirkungsgrad mit für den Meißel deutlich zu hoher Drehzahlarbeiten.

Eine gute Anpassung der Turbine an den Bedarf ist um so wichtiger, als daß die Stufenzahl und damit auch die Kosten der Turbine unter der Voraussetzung konstanter Drehzahl proportional mit dem Drehmoment steigt.

Fehler bei der Anpassung des Verdrängermotors an Rollenmeißel sind wegen der Zusammenhänge Volumenstrom - Drehzahl und Druckabfall - Drehmoment hingegen relativ unkritisch. Aus diesem Grund können ohne Änderung der Auslegung langsamlaufende Standardmotoren wie beispielsweise der Navi Drill Mach 1 Motor für den Antrieb von Rollenmeißeln in der KTB eingesetzt werden. Die Mach 1 Werkzeuge wurden speziell für den Rollenmeißelantrieb entwickelt und haben sich als zuverlässige und leistungsstarke Motoren erwiesen. Tabelle 3.3-1 zeigt die Leistungsdaten der für die KTB in Frage kommenden Größen 6 3/4" und 8". Anpassungen sind in bezug auf die Temperaturbeständigkeit der Elastomere vorzunehmen.

Für die Festlegung der erforderlichen Turbinennennmomente werden die in Kapitel 2.6.3.1 genannten Maximaldrehmomente geringfügig reduziert, da auch im Hinblick auf gute Richtungskontrolle nicht zu erwarten ist, daß die Meißel bis zur Grenzlast belastet werden.

Bohrloch 8 1/2" : $T_{erf} = 1500 \text{ Nm}$
10 5/8" : $T_{erf} = 2500 \text{ Nm}$

Probleme für die Auslegung bereitet die erforderliche niedrige Drehzahl, die nach den Ausführungen in Kapitel 2.6.3.1 im Sinne einer hohen Meißelstandlänge deutlich unter 200 min^{-1} liegen sollte. Derart niedrige Drehzahlen sind nur mit Verdrängermotoren nicht aber ohne zusätzliche Maßnahmen mit Turbinen bei den genannten Spülungsraten und Werkzeugdurchmessern zu erreichen. Bei den Turbinen ist deshalb zu überprüfen, ob hydrodynamische Maßnahmen (Bremsstufen) von der Drehzahl, dem Druck oder dem Drehmoment abhängige Reguliereinrichtungen zweckmäßig sind, um die Drehzahl abzusenken, bzw. zu begrenzen, oder ob dazu Untersetzungsgetriebe sinnvoll sind.

deutlich über 200° C bei gleichzeitig niedriger Drehzahl arbeiten. Zwar können die Werkzeuge durch Einsatz von Speziallagern und durch Fortfall jeglicher temperaturempfindlicher Bauteile bis über 300° C betrieben werden, Drehzahlreduzierungen werden aber kaum eingesetzt und sind auch nicht erforderlich, da für diese Anwendung die mehrgängigen Moineau-Motoren zur Verfügung stehen.

In einer Zeit, als mehrgängige Moineau Motoren noch nicht zuverlässig arbeiteten, hat die Firma ZF die Entwicklung eines Untersetzungsgetriebes für Turbinen begonnen. Dieses Getriebe wurde in Zusammenarbeit mit Deutag in "Salzgitter"-Turbinen im Feld erprobt und weiterentwickelt. Fraglich ist, ob mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand eine Erweiterung des Einsatzbereichs für sehr hohe Temperaturen möglich sein wird.

Des weiteren wird von der Firma Maxi Torque ein Untersetzungsgetriebe in Verbindung mit einem 1/2 gängigen Moineau Motor angeboten. Dieses System soll noch keine ausreichende Zuverlässigkeit aufweisen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß zur Zeit weder in der westlichen Welt noch in der Sowjetunion ein Bohrlochsohlenmotor bekannt ist, der bei einer Temperatur von deutlich über 200° C mit für Rollenmeißel üblichen Drehzahlen zuverlässig arbeitet.

Schnellaufende Turbinen mit ausreichender Temperaturbeständigkeit für den Antrieb von Diamantmeißeln sowie langsamlaufende Moineau Motoren mit einer Temperaturgrenze von zur Zeit 150° C hingegen sind verfügbar.

Teufenbereich	Motor Typ	Bohrmeter	Anzahl Meißel märsche	Bohrmeter pro Meißelmarsch	Bohrzeit Std	Wartungs intervall Std
m		m		m		
7263 - 7460	3A7Sh	168	16	10,5	4,9	27,7
7460 - 8028	3A7NAS	113,7	15	7,6	2,1	20,0
	3A7Sh	308,3	50	6,2	2,8	21,9
	3A7+SHIP-2	80,8	11	7,4	4,7	35,1
8028 - 8914	3A7Sh	296,3	54	5,5	2,7	23,4
	3A7GT+SHIP-2	48,3	7	6,9	2,8	33,6
	3A7GTSh	189,7	31	6,1	2,9	25,2
	D2-172M	101,1	14	7,2	6,7	15,0
	A7GTSh-RM	174,7	17	10,3	6,3	38,3
8914 - 9711	3A7Sh	41,1	7	5,9	3,5	23,7
	3A7GT+SHIP-2	178,0	22	8,1	2,9	33,1
	3A7GTSh-I	200,6	21	9,6	2,7	50,8
	4A7GTSh	220,6	22	10,0	3,5	30,9
	D2-172M	29,8	6	5,0	2,4	13,4
	A7GTSh-RM	114,8	14	8,2	4,2	25,7
9711 - 10636	3A7Sh	28,7	5	5,7	2,6	10,9
	3A7GT+SHIP-2	66,1	9	7,3	3,4	35,3
	A7Sh-RM	770,9	88	8,8	3,3	22,4
Tabelle 2.5-1	In der Kola-Bohrung erzielte Ergebnisse mit Bohrmotoren russischer Bauart (nach Kozlovsky "The Superdeep Well of the Kola Peninsula")					

3. Lösungsmöglichkeiten

3.1 Übersicht

Bild 3.1-1 zeigt den zu Beginn der Studie aufgestellten Arbeitsplan mit einer Auswahl von sinnvollen Möglichkeiten, den Bohrmeißel bei der KTB anzutreiben. Neben den Motoren mit niedriger Drehzahl sind auch solche für mittlere und hohe Drehzahl aufgeführt.

In Abhängigkeit von der Bohrlachsohlentemperatur ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, den Meißel anzutreiben. So können z.B. für Temperaturen bis ca. 150° C im Markt verfügbare Moineau Motoren eingesetzt werden. Seitens EC sind hier die Navi Drill Mach 1 und Mach 2 Ausführungen in der Größe 8" verfügbar, lassen sich aber auch für eine Größe 8 1/2" ohne Entwicklungsaufwand optimal anpassen.

Schnellaufende Motoren sind in der Größe 8" - 8 1/2" nicht vorhanden, können jedoch ohne großen Entwicklungsaufwand gebaut werden. Seitens der Moineau Motoren ist zu überprüfen, ob sich bis 200° C eine Statorauskleidung aus Hochtemperatur-elastomeren, bis 250° C eventuell aus thermoplastischen Werkstoffen über 250° C ein Ganzmetallstator realisieren läßt. Da die Entwicklung eines Moineau Motors für Temperaturen über 200 °C aber mit hohem Risiko behaftet ist, müssen für diesen Temperaturbereich besonders Turbinen in Betracht gezogen werden. Schnellaufende Turbinen lassen sich durch Verwendung von Speziallagern ohne großen Entwicklungsaufwand auch für die maximal zu erwartende Temperatur bei Endteufe aufbauen.

Für den wichtigen niedrigen Drehzahlbereich sind die verschiedenen Möglichkeiten zur Drehzahlreduzierung zu überprüfen. Neben Bremsstufen und Drehzahlbegrenzern sollen auch mechanische Lösungen wie Untersetzungsgetriebe zur Drehzahlreduzierung überprüft werden.

3.2 Lösungsmöglichkeit für schnellaufende Motoren

Für den Antrieb von Diamantmeißeln mit schnellaufenden Motoren konnten bei EC in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte erzielt werden. Zum einen wurde die Entwicklung eines schnellaufenden Moineau Motors (Navi Drill Mach 4) vorangetrieben, zum anderen wurden Turbinen für den Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen in tiefen und heißen Bohrungen entwickelt, die den Anforderungen seitens der KTB zumindest hinsichtlich schnellaufender Bohrlachsohlenmotoren mit sehr geringem Entwicklungsaufwand gerecht werden können.

So wurden besondere Bohrturbinen entwickelt und gebaut, die bei gleicher Ausgangsleistung eine erheblich kürzere Baulänge aufweisen als Standardturbinen.

Darüber hinaus wurde eine völlig neuartige Axiallagerung entwickelt, bei der die Reibpartner nicht wie bei Turbinen bisher üblich aus einer Metall-Elastomerpaarung bestehen, sondern Laufflächen mit polykristalliner Diamantbeschichtung aufweisen. Diese Lager weisen eine über 20-fache Tragfähigkeit der herkömmlichen Lager auf, eine um den Faktor 10 verringerte Reibung und haben praktisch keine Temperatureinsatzgrenze. In Geothermalbohrungen konnten diese Werkzeuge bis 270° C problemlos eingesetzt werden.

Bei der Turbinenbeschaukelung wurde das bisher in der Bohrtechnik unübliche Gleichdruckverfahren angewendet, wodurch sich einige wesentliche Vorteile gegenüber dem normalerweise verwendeten Überdruckverfahren ergeben. Neben einer Reduzierung des Axialschubes um bis zu 40% läßt sich ein höherer Arbeitsumsatz je Stufe realisieren, so daß sich in der Praxis die Baulänge deutlich verkürzt.

Für die Größe 8 1/2" wurden die entscheidenden Durchmesser festgelegt und eine Profilauslegung durchgeführt. Für die Volumenströme 1500, 1900 und 2400 l/min ergeben sich bei einem Spülgewicht von 1,05 kg/l für konstantes Drehmoment folgende Auslegungsdaten:

Volumenstrom	l/min	2400	1900	1500
Nennzahl	min ⁻¹	887	702	554
Nennmoment	Nm	2964	2959	2968
Nenndruck	bar	106	106	106
Nennleistung	kW	276	218	172
Anzahl Stufen		138	220	354

Wie bereits erwähnt, stehen keine 8 1/2" Verdrängermotoren zur Verfügung. Hier könnte entweder eine Neuauslegung vorgenommen oder z.B. auf den 8" Navi Drill Mach 2 zurückgegriffen werden (s. Tab. 2.6-2).

In der Werkzeuggröße 6 3/4" sind sowohl Mittelschnellläufer (Navi Drill Mach 2) als auch Schnellläufer (Navi Drill Mach 4) verfügbar, wobei zu beachten ist, daß die Entwicklung von Elastomeren für Temperaturen von deutlich über 200° C aus heutiger Sicht nicht sicher ist.

3.3 Lösungsmöglichkeit für langsamlaufende Motoren

3.3.1 Verdrängermotore

3.3.1.1 Moineau-Motore

Standardmäßig verfügbar sind hier die mehrgängigen Moineau-motoren in den Größen 8" und 6 3/4". Die Leistungsdaten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Größe		6 3/4"	8"
Type		Mach 1	
Spülungsrate	l/min	700 - 1400	1200 - 2300
Drehzahl	min ⁻¹	90 - 180	75 - 150
Max Druck differenz	bar	40	32
Max Dreh moment	Nu	3450	5450
Leistung	kW	33 - 65	43 - 86

Tabelle 3.3-1 Langsamlaufende Moineau-Motore "Navi Drill Mach 1" der Firma Eastman Christensen

Die Drehzahlen dieser Motoren liegen in dem für Rollenmeißel geeigneten Bereich und die Drehmomente sind völlig ausreichend, so daß von den Leistungsdaten her keine Anpassungen erforderlich sind. Als problematisch erweist sich allein die Statorauskleidung, die zur Zeit eine Temperaturgrenze von ca. 150° C aufweist. Durch die Verwendung von Hochtemperatur-elastomeren ist z.Zt. eine obere Temperaturgrenze von 200° C zu erwarten. Auch wäre anstatt der Verwendung von Elastomeren auch der Einsatz von thermoplastischen Werkstoffen denkbar, doch hat eine in anderem Zusammenhang durchgeführte Studie ergeben, daß die thermoplastischen, hochwärmebeständigen Werkstoffe aus heutiger Sicht keine Lösung für die Statorauskleidung von Verdrängermotoren bei Einsatztemperaturen von bis zu 250° C darstellen. Andererseits ermöglicht die Verwendung von ausschließlich wasserbasischer Bohrspülung bei der KTB den Einsatz von speziellen, sonst für Bohrmotoren nicht üblichen Elastomeren, mit denen sich möglicherweise Temperaturgrenzen von bis zu 250° C realisieren lassen.

Die Verwendung von Ganzmetallstatoren, die keine praktische Temperaturgrenze aufweisen, wurde ebenfalls als Lösungsmöglichkeit betrachtet. Eine derartige Paarung kommt in der Industrie bei Exzentrerschneckenpumpen zur Anwendung, die extrem hochviskose Medien zu fördern haben. Allerdings handelt es sich dabei zum einen um 1/2 gängige Geometrien und zum anderen um sehr kurze Pumpen. Auf den Moineau Motor übertragen würde die Verwendung einer hart/harten Paarung dazu führen, daß sowohl Rotor als auch Stator mit hoher Präzision gefertigt werden müssen, was für den Rotor zwar durchaus im Bereich des Möglichen liegt, für den Stator jedoch nur mit neuen Fertigungsverfahren zu verwirklichen wäre, die hohe Investitionen erforderlich machen.

Da trotz eines hohen erforderlichen Kostenaufwandes nicht sicher ist, ob ein Ganzmetallmotor zuverlässig arbeiten würde, soll diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt werden.

3.3.1.2 Flügelzellenmotor

Eine andere Alternative für einen Verdrängermotor ist der Flügelzellenmotor, der allerdings wegen der bisher nicht lösbaren Verschleißprobleme keinen Eingang in die Tiefbohrindustrie gefunden hat. Dieser Motor ließe sich aber auch wie eine Turbine ohne jegliche temperaturempfindliche Elastomere aufbauen. Außerdem erscheint die Verwendung von reibungsarmen Hochtemperaturthermoplasten oder -duroplasten denkbar.

Bild 3.3-1 und Bild 3.3-2 zeigen im Prinzip zwei ehemals für Tiefbohranwendungen entwickelte Ausführungen, den Garrison Motor mit elastischen Flügeln und den Christensen/Shell Motor mit radial verschieblichen starren Flügeln. Beide Motoren sind über das Prototypstadium nie hinausgekommen, da sich klar abzeichnete, daß sie keine wirtschaftliche Alternative zu Moineau Motoren darstellen.

Für Sonderanwendungen wie den Einsatz bei hohen Temperaturen ist dieses Prinzip aber durchaus in Erwägung zu ziehen. Fraglich dabei ist aber, ob für diesen Fall das wie für die beiden dargestellten Motoren angewandte Prinzip des balancierten Rotors mit radialem Lastausgleich angewandt werden sollte, oder ob ein solcher Motor noch einfacher bis hin zur Einwegausführung aufzubauen ist, die maximale Rollenmeißelmärsche mit Sicherheit überlebt.

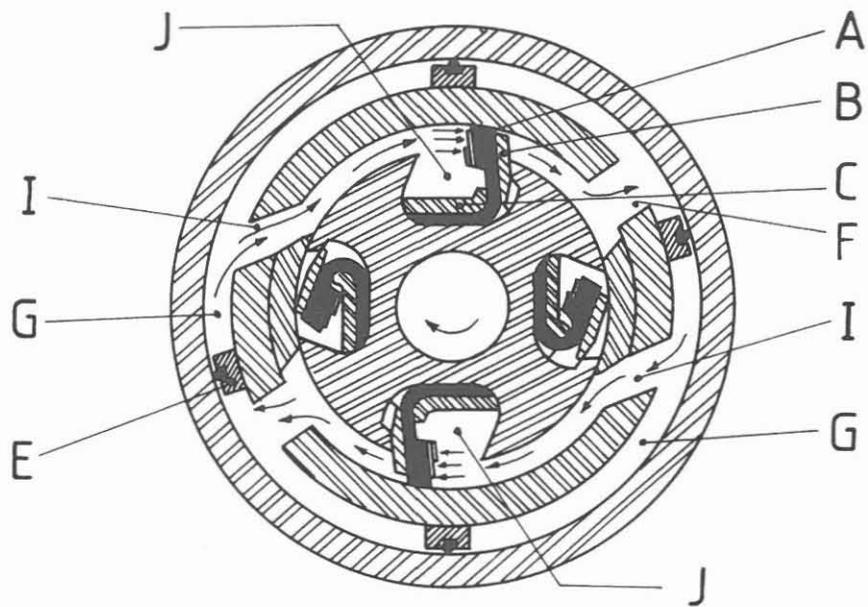


Bild 3.3-1 Flügelzellenmotor mit elastischen Flügeln nach Garrison

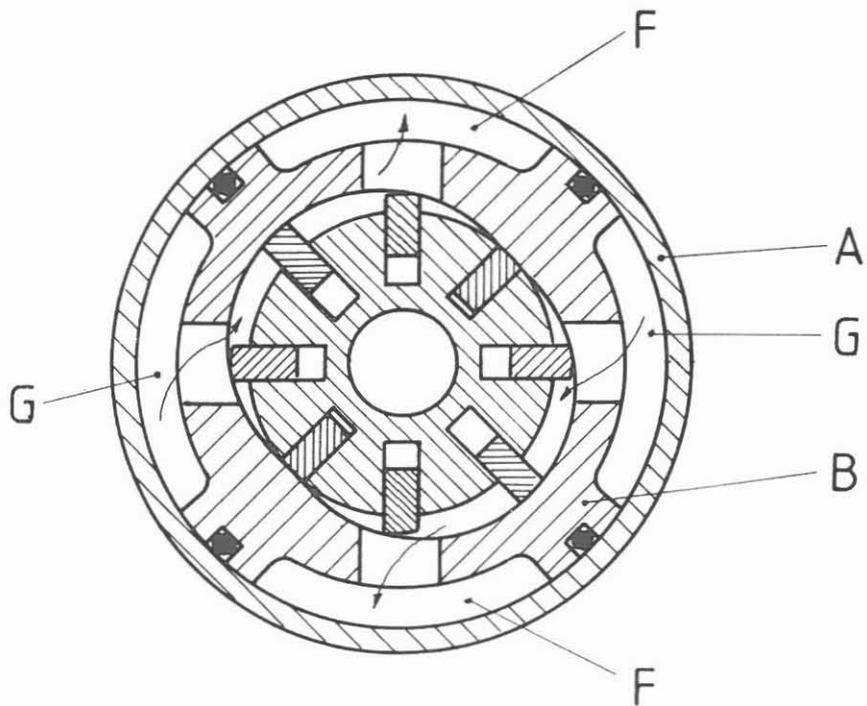


Bild 3.3-2 Flügelzellenmotor mit starren Flügeln nach Christensen/Shell

3.3.2 Turbinen

Da nicht davon ausgegangen werden kann, daß bis zur Endteufe Verdrängermotoren eingesetzt werden können, sind zusätzlich die Möglichkeiten für langsamlaufende Turbinen zu überprüfen. Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge der Auslegungsgrößen von Axialturbinen ergeben sich folgende prinzipiellen Möglichkeiten der Beeinflussung der Turbinenkennlinie zur Realisierung einer geringen Drehzahl.

- Reduzierung der Umlenkung, d.h. Vergrößerung der Abströmwinkel am Stator- bzw. Rotorprofil.
- Reduzierung des Volumenstroms
- Einsatz von Bremsstufen
- Verwendung eines Drehzahlbegrenzers

Sowohl eine Reduzierung der Umlenkung als auch die Reduzierung des Volumenstroms erweisen sich als nicht praktikabel, da sich im ersten Fall eine erforderliche Stufenzahl von ca. 1000 ergeben würde, und im zweiten Fall der Volumenstrom unzulässig niedrige Werte annehmen würde.

3.3.2.1 Einsatz von Bremsstufen

Die Verwendung von Bremsstufen ist - wie bereits erwähnt - eine in der UdSSR häufig angewandte Art und Weise der Drehzahlreduzierung. Bei dieser Möglichkeit werden Antriebs- und Bremsstufen hintereinander geschaltet. Die "Bremsstufen" weisen dabei einen Nennpunkt bei deutlich niedriger Drehzahl auf und erzeugen bei Überschreiten der Leerlaufdrehzahl ein Bremsmoment. Die Addition der beiden Einzelkennlinien ergibt damit eine reduzierte Leerlaufdrehzahl und eine größere Steigung der Drehmoment-Drehzahl-Geraden (Bild 3.1.2-3).

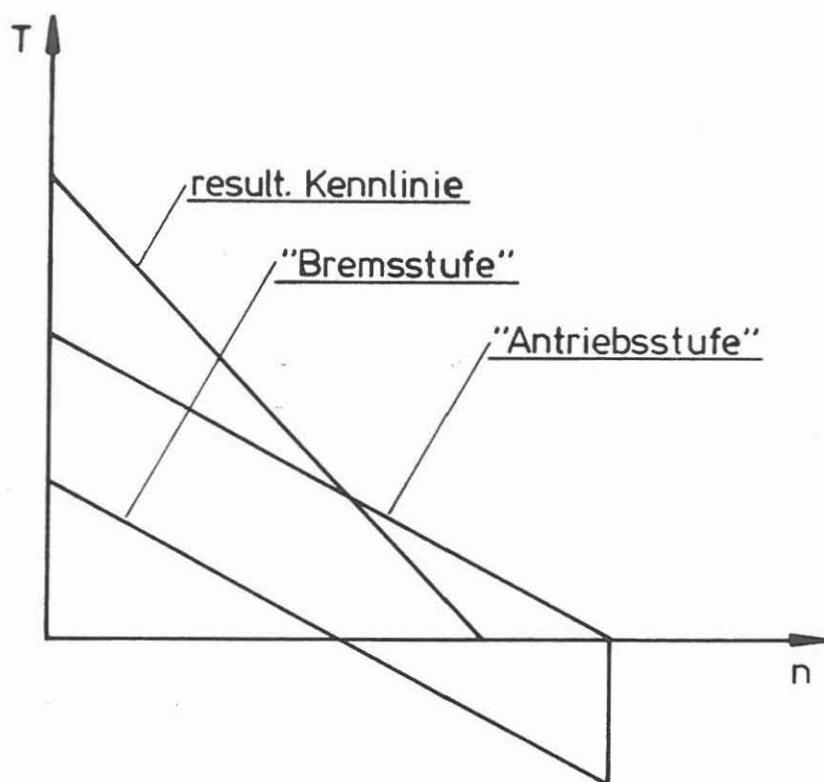


Bild 3.3-3 Funktionsweise von Bremsstufen

Aus Bild 3.3-3 läßt sich bereits erkennen, daß eine wirk-
same Drehzahlreduzierung jedoch nur durch eine sehr niedrig
drehende Bremsstufe erzielt werden kann. Als günstig erweist
sich hier ein Profil mit rein axialer Abströmung aus den
Rotor und Statorschaufeln, d.h. bei $\alpha_3 = \beta_7 = 90^\circ$.
Die Leerlaufdrehzahl wird zu Null und es wird weder ein
Drehmoment erzeugt noch verbraucht. Die Drehmoment-Drehzahl
Kennlinie verläuft jetzt durch den Ursprung vom vierten in
den zweiten Quadranten (Bild 3.3-4).

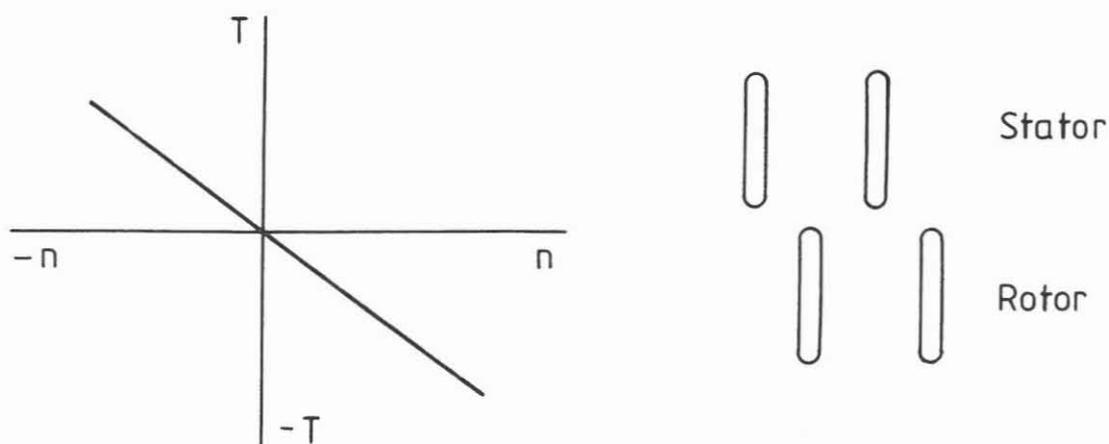


Bild 3.3-4 Bremsstufen mit "geraden Profilen"

Beim Antrieb dieser Bremsstufen werden also negative Momente, d.h. Bremsmomente erzeugt. Bei beispielsweise gleicher Steigung der Drehmoment / Drehzahlgeraden der Bremsstufen wieder der Antriebsstufen wird die Leerlaufdrehzahl einer Antriebs/Bremskombination halbiert. (Bild 3.3-5). Über Variationen der Anzahl von Brems- und Antriebsstufen läßt sich die Steigung der resultierenden Kennlinie und damit eine Leerlaufdrehzahl nahezu beliebig verändern.

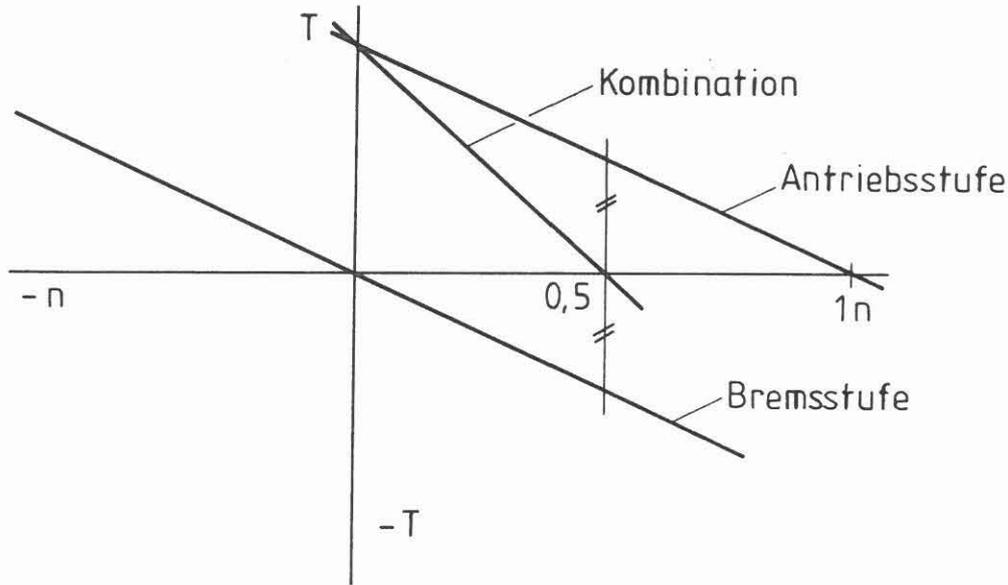


Bild 3.3-5

Nachteil von Bremsstufen ist allerdings, daß die erzeugten Bremsmomente auch einen Druckabfall erzeugen und damit die nötige Eingangsleistung anheben. Benötigt eine Bremsstufe z.B. den jeweiligen Druck wie die Antriebsstufe, so steht bezogen auf obiges Beispiel der doppelten Eingangsleistung nur die halbe Ausgangsleistung gegenüber. Die Folge ist eine extreme Verschlechterung des Wirkungsgrades.

Aufgrund der ungünstigen Anströmung bei gebremsten Profilen sollte es angestrebt werden, das Profil entsprechend dem neuen Betriebspunkt auszulegen, d.h. den stoßfreien Eintritt an die neue Betriebsdrehzahl anzupassen.

Um die prinzipielle Durchführbarkeit des Einsatzes von Bremsstufen nachzuweisen, wurden auch mit einem bestehenden Standardprofil der Größe 6 3/4" Untersuchungen im Gleich- und Gegenlauf durchgeführt. Obwohl die Anströmwinkel nur wenig über 90° liegen, zeigt sich hier die parabolische Tendenz der Kennlinie. Der Druckverlauf ist jedoch äußerst unbefrie-

digend, da er im vierten Quadranten im Bremsbetrieb wieder steil ansteigt. In einem weiteren Versuch wurden die Profile eines Lauf- und Leitrades vertauscht, so daß sich eine gegenläufige Turbinenstufe ergab und diese im Versuch mit 4 Antriebsstufen getestet.

Zusätzlich erfolgt in Tabelle 3.3-2 eine Gegenüberstellung der Theorie mit der Praxis. Da nach der Theorie ein linearer Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehzahl besteht, wird die Drehmomentgerade in den negativen Drehzahlbereich verlängert. Die Serienschaltung von Antriebsstufen mit Bremsstufen ergibt sich aus der Addition der Einzel-Kennlinien. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird im ersten Schritt die Anzahl der Antriebs- und Bremsstufen für eine Kombinationsnenn Drehzahl von $n = 325 \text{ min}^{-1}$ berechnet. Im zweiten Schritt erfolgt die Hochrechnung auf die Großturbine. Die sich ergebenden theoretischen Daten sind in der ersten Spalte der Tabelle 3.3-2 dargestellt. Die zweite Spalte beinhaltet die Werte, die sich aus der Addition der tatsächlich gemessenen Bremskennlinie ergeben würden.

In der dritten Spalte sind die Meßwerte für die verschiedenen Stufenkombinationen aufgeführt. Der Unterschied zwischen den theoretisch zu erwartenden und den sich praktisch einstellenden Werten ist gravierend. Hochgerechnet auf eine Großturbine ergibt sich immerhin eine Halbierung der Stufenzahl mit einem einhergehenden deutlich verringerten Druckgefälle. Es zeigt sich aber auch, daß selbst die einfache Addition der Einzelkennlinien aus getrennten Messungen zu ungünstigen Stufenzahlen führt. Beides deutet darauf hin, daß die Theorie bisher nicht alle Effekte erfaßt und daß die spezielle Einbausituation Einfluß auf das Betriebsverhalten hat. Die Gründe für diese Abweichungen müssen noch genauer untersucht werden, da sich mit den bisher bekannten Zusammenhängen keine hinreichend genaue Auslegung durchführen läßt.

Allein die Stufenzahl von insgesamt 594 und der Wirkungsgrad von 10% würden eine derartige Lösungsvariante nach der rein theoretischen Betrachtung ausscheiden lassen. Die gemessene Kombination hingegen weist eine durchaus akzeptable Stufenzahl von 291 auf, die auch nach Reduzieren der Drehzahl auf ca. 275 min^{-1} noch im "Rahmen des Machbaren" liegen dürfte. Als noch nicht ausreichend muß allerdings der Wirkungsgrad von 15% angesehen werden, der sich jedoch durch Optimierung und Verwendung von Profilen, die den stoßfreien Eintritt bei niedrigen Drehzahlen aufweisen, verbessern läßt. Als Zielsetzung sollte hier ein Wirkungsgrad von mindestens 25% angesetzt werden, der eine Druckdifferenz der Turbine von nahezu 100 bar zur Folge hätte, und damit einen akzeptablen Wert erreichen würde.

Obwohl die Theorie dagegen spricht, ist diese Entwicklungsrichtung durchaus vielversprechend. Von dieser Ausführung können vor allem eine hohe Zuverlässigkeit und durch die sehr steile Drehmoment-Drehzahlkennlinie ein ausgezeichnetes Betriebsverhalten erwartet werden.

		Theorie	Addition der gemessenen Einzelkennlinien	gemessene Kombinationskennlinie
Volumenstrom	l/min	1300	1300	1300
Spülgewicht	kg/l	1,05	1,05	1,05
Nenndrehzahl	min ⁻¹	325	325	325
Nennmoment	Nm	18,2	25,9	25,7
Nenndruck	bar	3,0	2,9	2,7
Nennleistung	kW	0,62	0,88	0,88
Stufen		4+3,2	4+2	4+1
Nenndrehzahl	min ⁻¹	325	325	325
Nennmoment	Nm	1500	1500	1500
Nenndruck	bar	244	170	158
Nennleistung	kW	51	51	51
Anzahl Stufen		330+264	232+116	233+58

Tabelle 3.3-2 Verwendung von Bremsstufen - Gegenüberstellung der Theorie mit Laborergebnissen

3.3.2.2 Verwendung eines Drehzahlbegrenzers

Die vorangegangenen Lösungsmöglichkeiten haben gezeigt, daß eine langsamlaufende Turbine nur mit einer relativ hohen Stufenzahl das für den Bohrbetrieb erforderliche Drehmoment aufbringen kann. Als alternative Lösung bietet es sich an, ein schnellaufendes Profil in einer Stufenzahl mit resultierendem hohem Drehmoment bei steiler Drehmoment / Drehzahl Kennlinie zu verwenden und die Drehzahl durch einen Begrenzer auf die für Rollenmeißel zulässigen Werte zu beschränken.

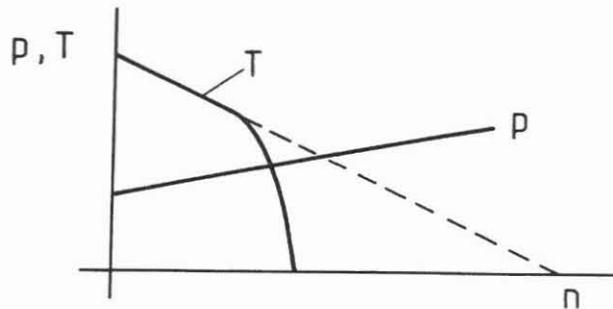


Bild 3.3-6 Beeinflussung der Turbinenkennlinie durch Verwendung eines Drehzahlbegrenzers

Für günstigen Wirkungsgrad ist die Auslegung des Profils so durchzuführen, daß der stoßfreie Eintritt zu niedrigen Drehzahlen hingelegt wird. Es besitzt daher eine mit der Drehzahl steigende Druckkennlinie. Es bietet sich daher an, den Druck als Stellgröße für die Regelung zu verwenden. Allerdings können auch die Drehzahl selbst oder eine Kombination aus Druck- und Drehzahl die Stellgröße sein.

- Druckregler

Ein Druckregler läßt sich im einfachsten Fall durch ein vorgespanntes Ventil realisieren, das in die hohlgebohrte Antriebswelle eingesetzt ist. Auf diese Weise liegt der Differenzdruck über der Motorsektion auch an den Kolbenflächen

des Ventils. Im Falle des Differenzdruckanstiegs öffnet das Ventil und ein Teil des Volumenstroms gelangt unter Umgehung der Turbinenstufen direkt zum Meißel. Ein Druckregler hält in erster Näherung den Differenzdruck konstant. Die tatsächliche Volumenstromabzweigung ist also abhängig von der Differenz zwischen Reglerdruck und Drucklinie der unregulierten Motorsektion.

Da eine quadratische Abhängigkeit zwischen Differenzdruck und Volumenstrom besteht, muß die Drucklinie äußerst steil sein, um mit einem einfachen Druckregler die Drehzahl niedrig zu halten. Besonders nachteilig ist es, daß sich auch geringfügige Änderungen des Pumpenvolumenstroms als deutliche Druckschwankungen äußern. Eine Erhöhung des Volumenstroms kann dann ein Öffnen des Ventils schon bei geringen Drehzahlen zur Folge haben, was zu Ausspülern führen kann. Eine Erniedrigung des Volumenstroms hingegen führt dazu, daß das Ventil erst bei sehr hohen Drehzahlen öffnet, was den Meißel zerstören kann.

Da der Differenzdruck zusätzlich auch noch von der Dichte des Spülungsmediums abhängig ist und diese während des Bohrtriebs geändert werden kann, ist der Reglereinsatzpunkt von zu vielen Einflußfaktoren abhängig. Eine sichere Drehzahlbegrenzung ist also nicht gewährleistet.

- Fliehkraftregler

Ein Fliehkraftregler nutzt als Stellsignal die Drehzahl. Bei geeigneter Auslegung des Ventils ist es möglich, die Regelung unabhängig vom Differenzdruck durchzuführen. Dies läßt sich z.B. durch radiale Anbringung der Strömungskanäle verwirklichen.

Ungünstig ist, daß die nötigen Verschiebewege mit ca. 20 mm sehr groß sind. Der bewegliche Kolben muß außerdem über eine Feder vorgespannt sein, damit das System erst oberhalb einer vorgegebenen Drehzahl aktiviert wird. Dies läßt sich über einen Hebelarm mit Fliehgewichten realisieren. Durch die geringe Drehzahl in Verbindung mit dem eingeschränkten Radius, auf dem sich das Fliehgewicht bewegen kann, ergeben sich jedoch erhebliche Probleme durch die sehr kleinen Stellkräfte.

- Druck-Fliehkraft-Kombination

Die zuvor beschriebenen Systeme weisen sowohl Vor- als auch Nachteile auf. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Druckregler zwar relativ einfach im Aufbau ist, die Drehzahlbegrenzung jedoch nicht in jedem Fall gegeben ist, der Fliehkraftregler hingegen kann die Grenzdrehzahl genau einhalten, weist jedoch relativ geringe Stellkräfte auf, die die Betriebssicherheit beeinflussen können. Es wurde daher ein System erarbeitet, bei dem die Vorteile beider Systeme

verbunden werden. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Fliehkraftregler und Druckventil. Durch eine drehzahlabhängige Verengung des Strömungsquerschnitts wird das Druckgefälle über die Turbinenstufen überproportional erhöht und betätigt das Druckventil zur Volumenstromaufteilung.

Dadurch wird eine sehr steile Kennlinie im Regelbereich erzielt. Weiterhin kann das Druckventil so ausgelegt werden, daß volumenstromabhängige Druckschwankungen nicht direkt Einfluß auf die Grenzdrehzahl haben.

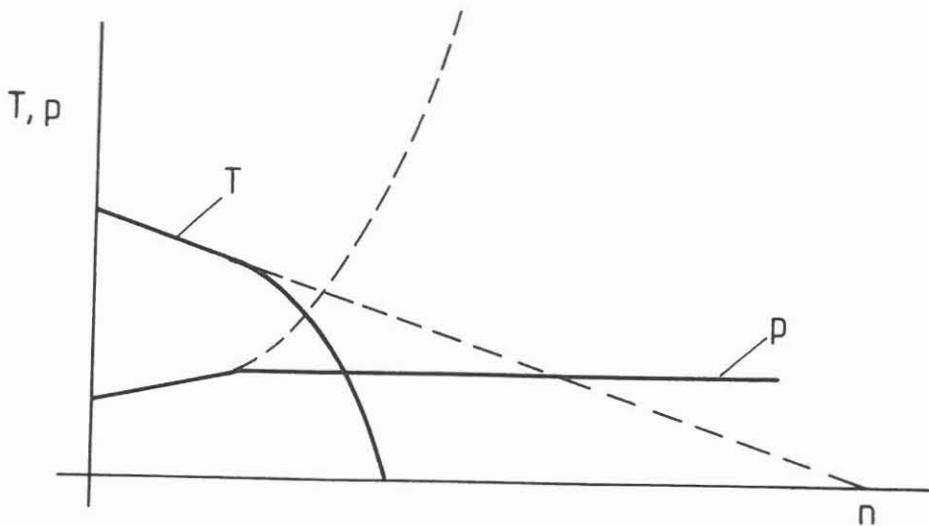


Bild 3.3-7 Wirkungsweise eines Druck-Fliehkraftreglers

Als gravierender Nachteil von Drehzahlbegrenzern ist jedoch die sehr flache Kennlinie aufzuführen, d.h. gegenüber der angestrebten Betriebsdrehzahl ergibt sich nur noch eine relativ geringe Drehmomenterhöhung bis zum Stillstand. Dadurch ergibt sich im Vergleich zur Verwendung von Bremsstufen eine deutlich ungünstigere Betriebssicherheit hinsichtlich des Abwürgens.

Für eine ausreichende Betriebssicherheit sollte das Stillstandsmoment mindestens 30% über dem vorgegebenen Nennpunkt liegen. Soll z.B. eine Betriebsdrehzahl von 150 min^{-1} bei einem Drehmoment von 1500 Nm erzielt werden, so dürfte die Leerlaufdrehzahl des Turbinenprofils bei max. 650 min^{-1} liegen, was wiederum bereits ein langsamlaufendes Profil darstellt und damit eine hohe Stufenzahl erfordert.

3.3.3 Schnellaufende Turbinen mit Untersetzungsgetrieben

Der Einsatz eines Getriebes zur Drehzahlreduzierung scheint nur auf den ersten Blick naheliegend zu sein. Für den Bohrbetrieb allerdings ist ein Getriebe aufgrund der normalerweise erforderlichen Ölschmierung und Abdichtung die riskanteste Möglichkeit zur Drehzahlreduzierung. Das Risiko liegt im Verschleiß und der hohen dynamischen Beanspruchung der Dichtungen.

Da jedoch mit allen bereits genannten Maßnahmen die Drehzahl nicht auf deutlich unter 200 min^{-1} abzusenken ist, bietet ein Untersetzungsgetriebe hier die einzige Möglichkeit. Im Rahmen der Studie wurden sowohl gedichtete als auch ungedichtete Getriebeausführungen überprüft. So wurde mit der Firma ZF Kontakt aufgenommen, die seit Jahren an der Entwicklung eines Turbinenuntersetzungsgetriebes arbeitet. ZF zeigte sich jedoch an einer Zusammenarbeit nicht interessiert, da man offensichtlich befürchtet, die bisher gesammelten Erfahrungen offenzulegen.

Allerdings zeigte ZF durchaus Interesse, zu einem späteren Zeitpunkt nach erfolgreichem Abschluß der Getriebeentwicklung ein Getriebe für die KTB Bohrung zu liefern. Nach Angaben von ZF handelt es sich um ein zweistufiges Planetengetriebe mit einer Untersetzung von 4,26 und einem Außendurchmesser von $8 \frac{1}{2}$ ". Die angestrebte Lebensdauer liegt bei 100 Stunden. Bis Mitte 1987 wurden insgesamt 7 Feldeinsätze in Zusammenarbeit mit Deutag durchgeführt. Als Antrieb dienten Richtbohrturbinen, die von der Salzgitter AG in Lizenz gefertigt wurden.

Als Hauptproblem wurde seitens ZF das Abdichtungssystem genannt, wobei man allerdings der Ansicht war, die Fehler weitestgehend abgestellt zu haben. Für den Einsatz in der KTB Bohrung müßte das Dichtungssystem nach Angaben von ZF jedoch wegen der nicht ausreichenden Temperaturbeständigkeit überarbeitet werden.

Bei den weiteren in der Bohrtechnik zur Zeit verwendeten Getrieben zur Untersetzung der Drehzahl von Bohrlochsohlenmotoren wird das in Bild 3.3-8 dargestellte gleiche Funktionsprinzip angewandt. Die Antriebswelle ist mit dem Sonnenrad verbunden, das Hohlrads a wird "festgehalten" und die Abtriebswelle ist mit dem von den Planetenrädern angetriebenen Steg s verbunden. Von Maxi Torque wird so eine Untersetzung von $1 : 3$, bei den sowjetischen Getrieben eine Untersetzung $1 : 3,6$ in einer Stufe erreicht. Durch das Hintereinanderschalten von 2 Stufen, was in der Sowjetunion praktiziert wird, läßt sich dann eine Untersetzung von 13,62 erzielen, was eine Verwendung einer sehr schnellaufenden kurzen Antriebseinheit ermöglicht.

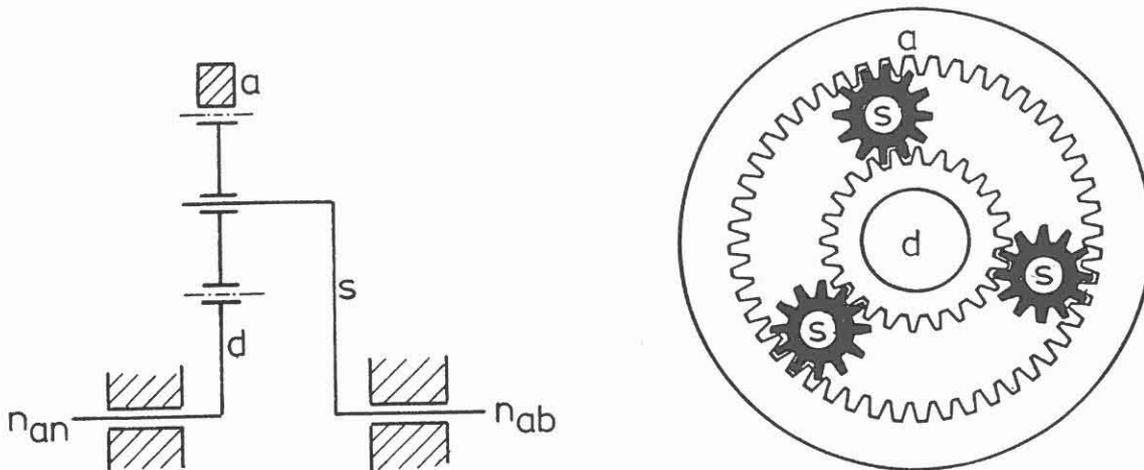


Bild 3.3-8 Funktionsprinzip rückkehrendes Planetengetriebe mit festgehaltenem Hohlrad

Als weitere gedichtete Getriebe-Varianten wurden ein Kegelhäder-Taumelplanetengetriebe (Bild 3.3-9) und ein nicht rückkehrendes Hohlplanetengetriebe (Bild 3.3-10) überprüft, wobei sich das Hohlplanetengetriebe als die geeignetere Möglichkeit erwies.

Bei dieser Ausführung wird der Steg (1) angetrieben. Das Sonnenrad ist mit dem Gehäuse verbunden. Das Planetenrad (2) ist als Hohlrad ausgeführt. Die Drehung des Planetenrades auf dem Steg wird nun abgegriffen und auf die Mittelachse mit einer Gelenkwelle oder einer entsprechenden Bolzen-Mitnehmerkupplung zurückgeführt werden.

Als gravierender Nachteil der beschriebenen Varianten ist allerdings zum einen die erforderliche Abdichtung, sowie die Tatsache, daß für Antriebseinheit und Lagerungseinheit separate Axiallager verwendet werden müssen, so daß die Axiallager nicht wie bei konventionellen Bohrlochsohlenantrieben nur die resultierende Kraft aus der Differenz von Axialschub und Meißellast aufnehmen müssen, woraus sich eine aufwendigere Gestaltung der Axiallager ergibt.

Allerdings wurde bei den erarbeiteten Lösungen aus Gründen der Betriebssicherheit ohnehin vorgesehen, die Lagerung der Antriebssicherheit sowie die Lagerung des Bohrmeißels nicht im gedichteten System unterzubringen, sondern im Spülungsstrom arbeiten zu lassen. Zur Aufnahme des Axialschubes wurde die Platzierung eines Diamantlagers in die Antriebseinheit vorgesehen, und für die Aufnahme der Meißellast eine verstärkte Standardlagerungseinheit für Moineau-Motoren. Dadurch kommen für die Axial- und Radiallagerung bereits bewährte Systeme zum Einsatz, zum anderen weist das gedichtete

Getriebe eine sehr geringe Baulänge auf und kann relativ weit entfernt vom Meißel platziert werden, was wiederum zur Folge hat, daß die im Bereich des Getriebes auftretende Biegung sehr klein gehalten wird.

Bei Verwendung von hochtemperaturbeständigen Dichtungen und Schmierstoffen ist ein gedichtetes Untersetzungsgetriebe zu realisieren und durch die beschriebenen Maßnahmen der separaten Lagerung durchaus erfolversprechend. Die Entscheidung sollte dabei aufgrund des einfacheren Aufbaus zugunsten des rückkehrenden Planetengetriebes mit stehendem Hohlrad fallen.

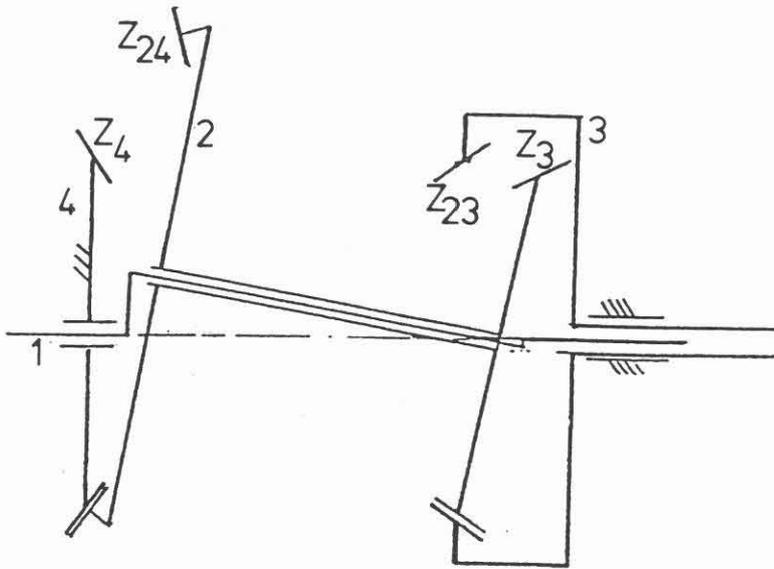


Bild 3.3-9 Prinzipskizze Kegelräder-Taumelplanetengetriebe

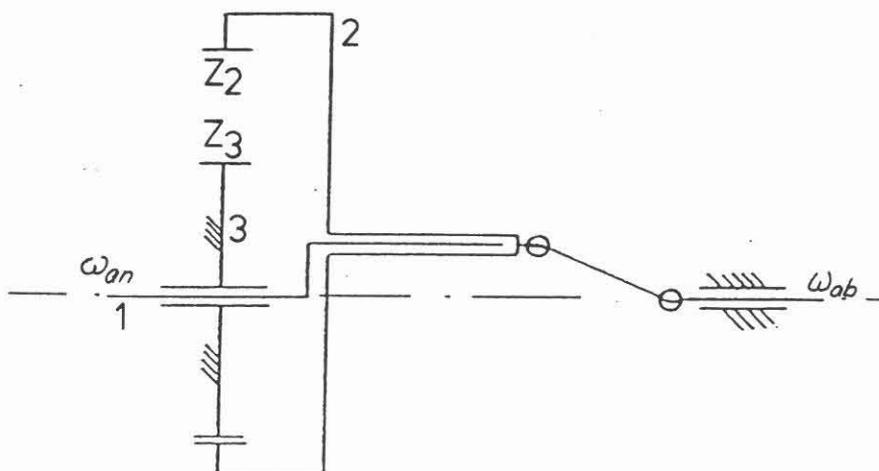


Bild 3.3-10 Prinzipskizze Nichtrückkehrendes Hohlplanetengetriebe

Ungedichtete Getriebe

Ein Getriebe ohne Abdichtung, das direkt im Spülungsstrom betrieben wird, läßt sich in Form eines nicht rückkehrenden Hohlplanetengetriebes aufbauen. Um bruchssichere Verzahnungen mit hohem Verschleißvolumen zu erhalten, bieten sich beispielsweise Novikov-Verzahnungen oder die von Moineau-Motoren bekannten Zahngeometrien an. Ein in der Technik bekanntes Getriebe ist das Cyclogetriebe. Das System basiert darauf, daß eine mit einem geschlossenen Zykloidenzug versehene Scheibe von einem Exzenter angetrieben wird und sich entlang des feststehenden Rings mit Bolzen anstatt Zähnen abwälzt. (Bild 3.3-11). Während sich die Kurvenscheibe im Uhrzeigersinn innerhalb des Bolzenringes fortbewegt, dreht sie sich gleichzeitig entgegen dem Uhrzeigersinn um ihre eigene Achse. Dadurch greifen nacheinander Kurvenabschnitte in die Bolzen des Bolzenringes ein und erzeugen so eine umgekehrte Rotation mit verminderter Geschwindigkeit.

Jede volle Umdrehung der Antriebswelle bewegt die Kurvenscheibe um einen "Zahn" weiter, womit sich die Untersetzung ins Langsame aus der Anzahl der "Zähne" ergibt. Die Kurvenscheibe hat einen Zahn weniger als Bolzen im Stator vorhanden sind.

Für die Anwendung dieses Getriebes wurden zwei verschiedene Lösungsmöglichkeiten ausgearbeitet. In der ersten Ausführung (Bild 3.3-12) wird die Kurvenscheibe von einem Exzenter, der mit der Antriebswelle verbunden ist, angetrieben. Der "Bolzenring" ist im Stator verankert. Die Kurvenscheibe ist mit einer flexiblen Welle verbunden, die die exzentrische Bewegung der Kurvenscheibe kompensiert und nur die Eigendrehung der Scheibe an die Meißelantriebswelle weitergibt. Zu beachten ist hierbei die Drehrichtungsumkehr von der Antriebswelle, so daß die Drehrichtung der Turbine umgekehrt werden muß. In der zweiten Ausführung (Bild 3.3-13) wird die Kurvenscheibe im Stator der Turbine über ein flexibles Element abgestützt und die Abtriebsdrehzahl wird am Bolzenring abgegriffen. Dadurch ergibt sich eine gleichsinnige Antriebs- und Abtriebsdrehzahl, sowie ein zentrischer Lauf der Abtriebswelle.

Als "Verhältnis von Kurvenscheibenzähnen zu Statorbolzen" wurde hier mit 9 zu 10 gewählt, so daß sich für Ausführung 1 eine Untersetzung von 1 : 9 und für Ausführung 2 eine Untersetzung von 1 : 10 ergibt. (Diese Ausführung entspricht im Prinzip der Darstellung des nicht rückkehrenden Planetengetriebes in Bild 3.3-10).

Für eine Anwendung dieses Systems als ungedichtetes Getriebe sind zwar sämtliche "Gleitstellen" mit hochverschleißfesten Werkstoffen zu versehen, da bei EC aber gerade in dieser Hinsicht bereits ein hohes Maß an Erfahrung vorliegt, ist die Entwicklung dieses Systems als sehr erfolgversprechend anzusehen.

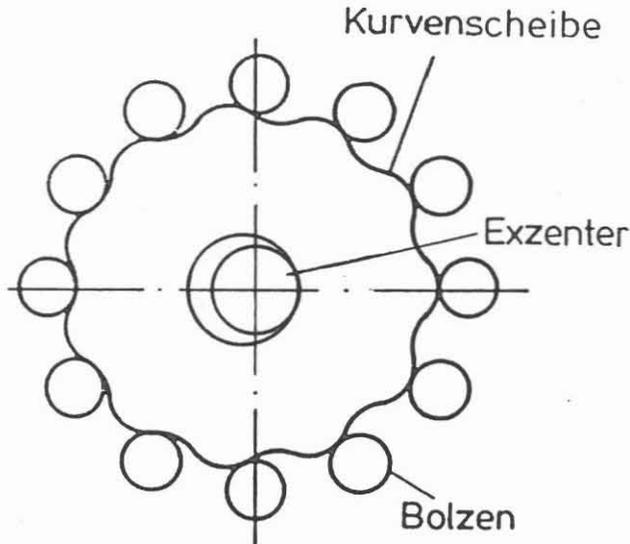
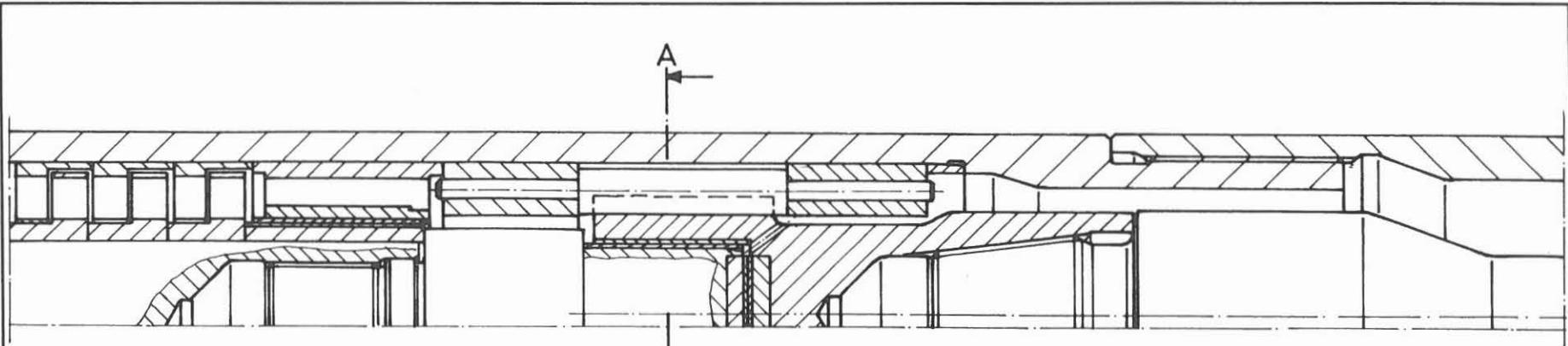


Bild 3.3-11 Funktionsprinzip Cyclogetriebe

4. Planung des erforderlichen Entwicklungsprojekts

4.1 Diskussion der Lösungsmöglichkeiten

Aus den beschriebenen Lösungsmöglichkeiten in Kapitel 3 läßt sich ableiten, daß für die KTB-Anwendung ein mehrgängiger Moineaumotor im Prinzip der ideale Antrieb ist. Neben dem sehr einfachen Aufbau, der eine hohe Zuverlässigkeit bedeutet, ist die hydrostatische Kennlinie für große Teufen vorteilhaft. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Temperaturbeständigkeit der Statorauskleidung selbst durch Weiterentwicklung der Elastomere mit vertretbarem Aufwand auf die zu erwartenden Temperaturen bei Endteufen zu erhöhen ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß im Laufe der nächsten drei Jahre eine Temperaturgrenze von mindestens 200° C und mit Zugeständnissen an die Lebensdauer und bei Verwendung wasserbasischer Bohrspülung möglicherweise bis zu 250° C erreicht werden kann, so daß zumindest der 10 5/8" Bohrlochbereich aller Wahrscheinlichkeit nach mit Moineau-Motoren abgedeckt werden kann.



Schnitt A-B

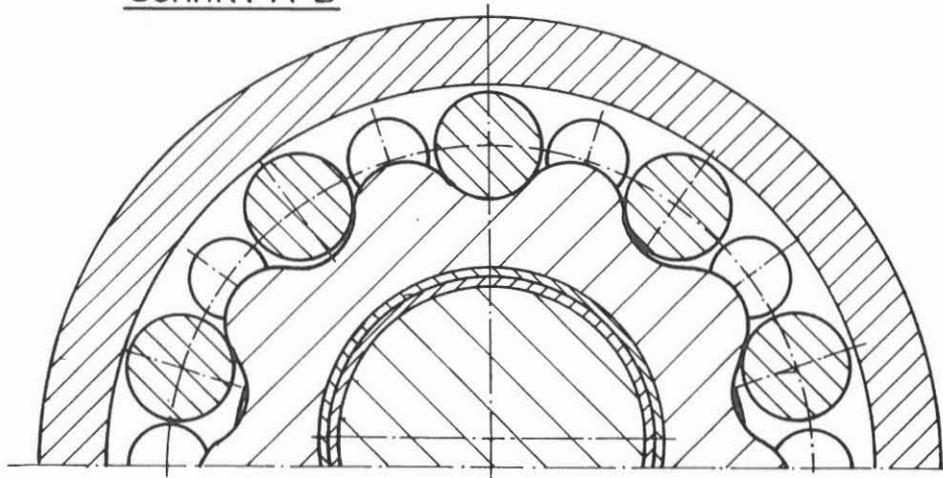


Bild 3.3-12: Umlaufgetriebe ungedichtet, $i = 9$

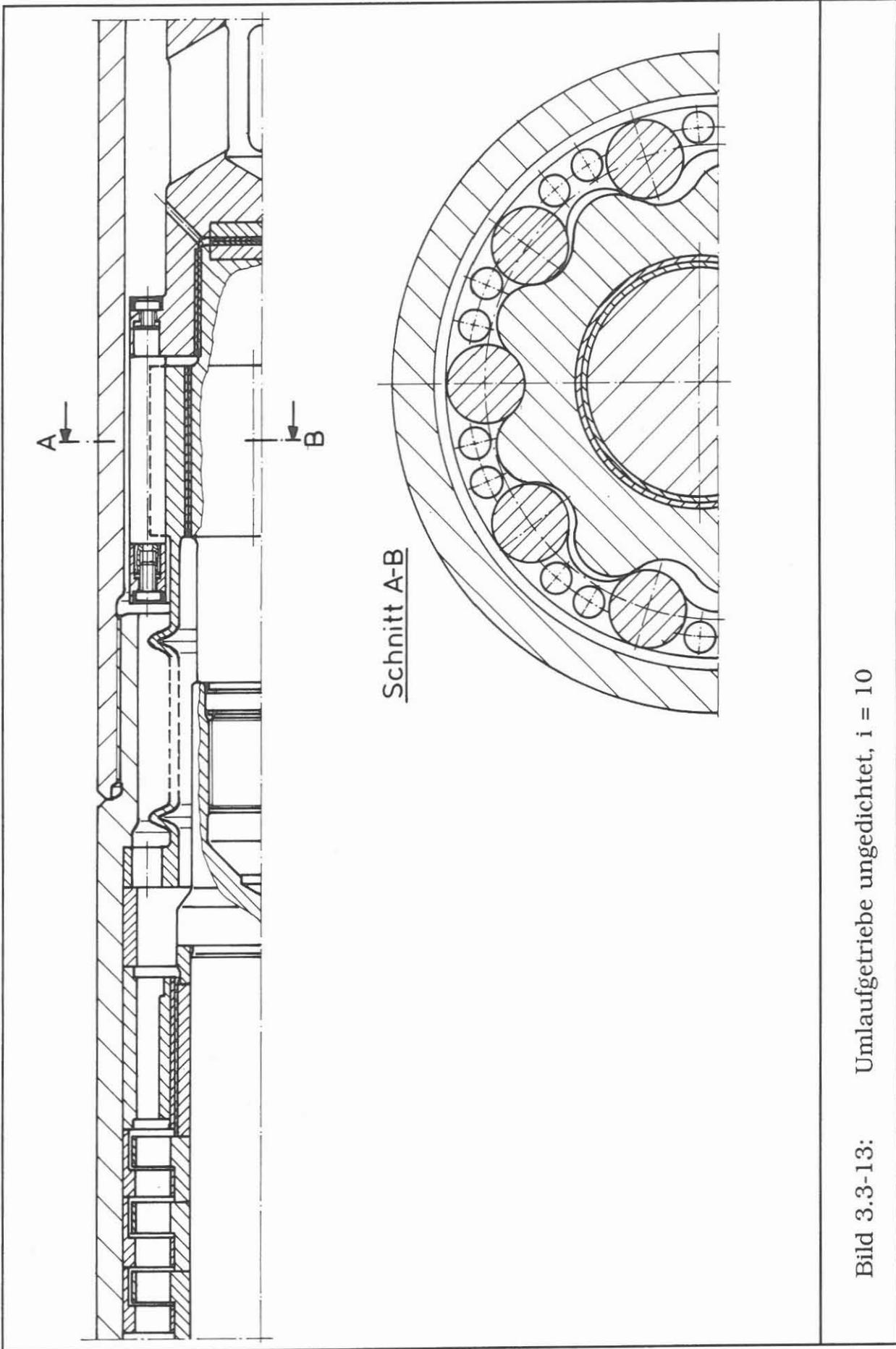


Bild 3.3-13: Umlaufgetriebe ungedichtet, $i = 10$

Für den 8 1/2" Bohrlochbereich ist jedoch in jedem Fall eine Alternative mit höherer Temperaturbeständigkeit zu entwickeln.

Da für den Flügelzellenmotor im Prinzip eine relativ aufwendige Neuentwicklung erforderlich wäre, soll eine Turbinenausführung bevorzugt werden. Schnellaufende Turbinen mit Speziallagern können hier mit geringem Aufwand relativ kurzfristig zur Verfügung gestellt werden, so daß die Verfügbarkeit eines Bohrlochsohlenantriebs auch für die max. zu erwartende Temperatur bei Endteufe als Alternative sichergestellt ist.

Für den Rollenmeißelantrieb müssen zwei Drehzahlbereiche definiert werden. Zum einen der mittlere Drehzahlbereich von 220 (10 5/8") bis 275 (8 1/2") und zum anderen ein niedriger Drehzahlbereich von unter 150 min⁻¹. Während der mittlere Drehzahlbereich noch mit hydraulischen Maßnahmen zu realisieren ist, sind für den unteren Drehzahlbereich Untersetzungsgetriebe erforderlich.

Zur Realisierung des mittleren Drehzahlbereiches sollten Bremsstufen eingesetzt werden, um eine möglichst steile Kennlinie zu erhalten. Ein weiterer Vorteil liegt in der hohen Betriebssicherheit aufgrund des relativ einfachen Aufbaus. Als Nachteil ist jedoch der zu erwartende sehr niedrige Wirkungsgrad aufzuführen, der Probleme hinsichtlich der zur Verfügung zu stehenden Pumpenleistung verursachen kann.

Im Sinne einer hohen Standlänge der Rollenmeißel sollte beim derzeitigen Stand der Technik eine Drehzahl jedoch auf 150 min⁻¹ limitiert werden, so daß die Verwendung eines Untersetzungsgetriebes vorzusehen ist. Hier sollten sowohl die am Markt befindlichen Systeme dahingehend überprüft werden, ob sich Anpassungen an die KTB Bedingungen mit vertretbarem Aufwand realisieren lassen, als auch die Entwicklung eines ungedichteten Getriebes durchgeführt werden. Im Sinne der Zuverlässigkeit sollte ein ungedichtetes System angestrebt werden.

4.2 Vorschlag für den Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren in der KTB Hauptbohrung

Für eine Planung der einzelnen Entwicklungsschritte wurde der in Bild 4.2-1 dargestellte Vorschlag für die Verwendung und Entwicklung von Bohrlochsohlenantrieben erarbeitet. Der Plan sieht zwei Systeme unterschieden nach Drehzahlbereichen vor. Der Drehzahlbereich $n > 700 \text{ min}^{-1}$ beinhaltet schnellaufende Turbinen mit Gleichdruckstufen und Speziallagern für den An-

trieb von Diamantmeißeln. Der hier erforderliche Entwicklungsaufwand ist sehr gering, da die für die Größe 6 3/4" erforderlichen Komponenten bereits erprobt sind und lediglich Anpassungen an die KTB Anforderungen notwendig sind, und für die Größe 8 1/2" Konstruktionskennwerte von den bereits vorhandenen Turbinen anderer Größen übernommen werden können. Erforderlich sind im wesentlichen nur die endgültige Auslegung und die Herstellung der nötigen Gußformen.

Für den Rollenmeißelantrieb soll bis mindestens 200 C, möglicherweise sogar bis 250° C der Moineau Motor zum Einsatz kommen. Hier wird davon ausgegangen, daß eine hochtemperaturfeste Statorauskleidung für Temperaturen deutlich über 200° C in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen entwickelt werden kann, auch wenn die Entwicklung dieser Elastomere ein beträchtliches Risiko darstellt.

Um mit Sicherheit Werkzeuge für den hohen und höchsten zu erwartenden Temperaturbereich zur Verfügung stellen zu können, wird zum einen die Entwicklung einer Turbine mit Untersetzungsgetriebe vorgeschlagen. Parallel zu gedichteten Einheiten soll dabei unbedingt das Konzept der ungedichteten Ausführung verfolgt werden, da mit einem solchen Getriebe zwar theoretisch niedrige Höchstlaufzeiten erreicht werden, dafür aber hohe Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit im Rahmen der nötigen Laufzeiten. Als Antrieb sollen hier die schnellaufenden Turbinenstufen verwendet werden, wodurch die Stufenzahl deutlich reduziert werden kann.

Zum anderen soll mindestens bis hin zur detaillierten Konstruktion verschiedener möglicher Alternativen das Konzept eines einfachen Flügelzellenmotors verfolgt werden, um auch ohne Bau eines Prototypen Kosten und Zuverlässigkeit im Vergleich zu den anderen Systemen sicher abschätzen zu können. Erst dann ist die endgültige Entscheidung für den Prototypenbau zu fällen.

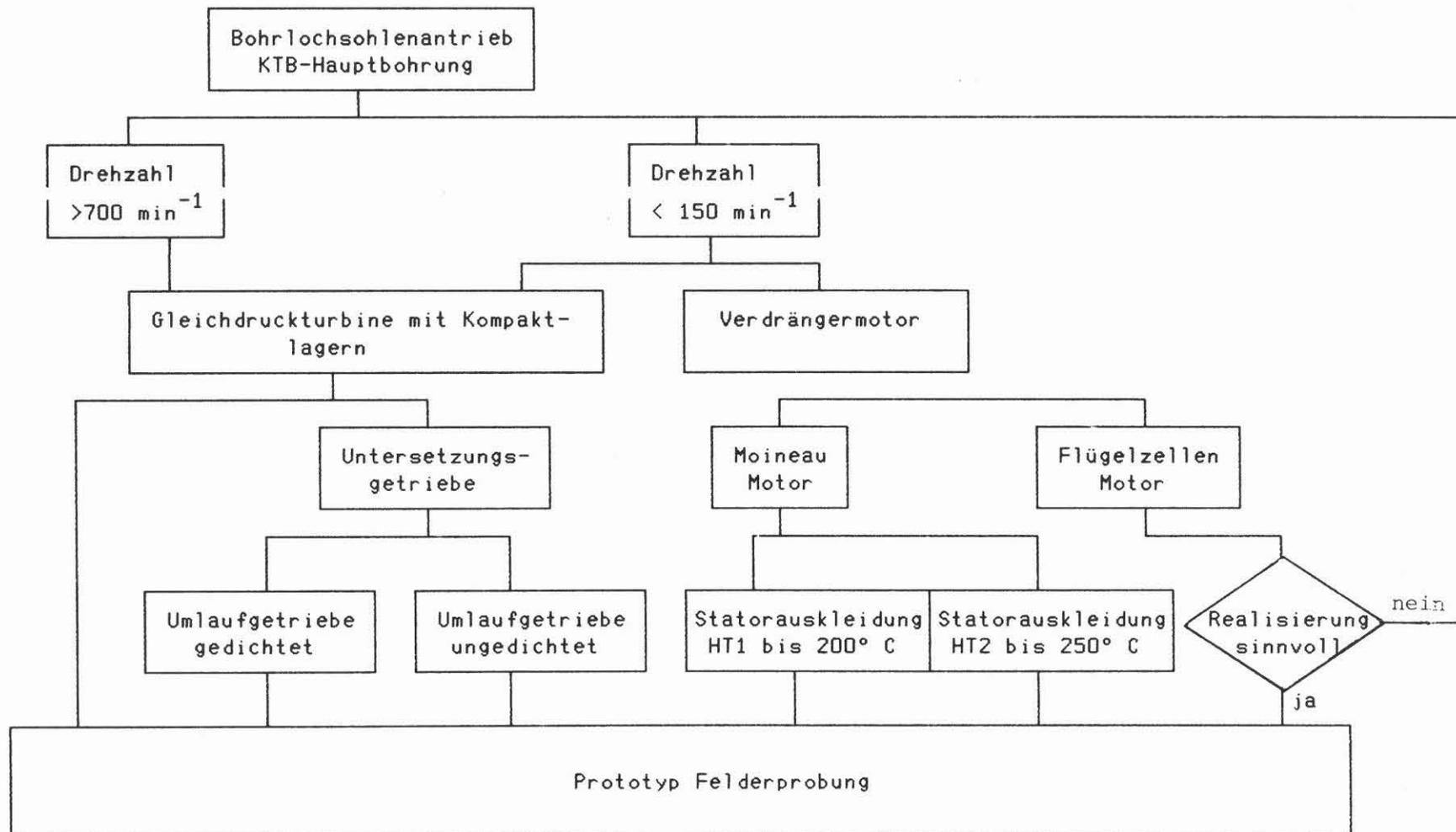


Bild 4.2-1

Vorschlag für den Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren in der KTB-Hauptbohrung

Einsatz eines selbsttätig steuernden Zielbohrsystems zur Herstellung eines lotrechten, tiefen Bohrloches beim Kontinentalen Tiefbohrprogramm KTB

Martin Wiebe
Dipl.-Ing. Dieter Schwidder
Paul Braun

Schwing Hydraulik Elektronik GmbH & Co.
Herne 2

Dipl.-Ing. V. Mertens
Dipl.-Ing. H. Wallussek
Dipl.-Ing. J. Kohnert
Dipl.-Ing. J. Gehrke

Bergbau-Forschung GmbH, Fachabteilung Maschinelles Vortrieb
Essen 13

Dr.-Ing. T. Kerk
Dipl.-Ing. H. Kinzel
Dipl.-Ing. D. Müller-Link

Preussag Service Engineering, Berkhöpen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten der Zielbohrtechnik.....	330
2. Die Entwicklung der Bergbau-Forschung GmbH.....	332
3. Erprobung und Entwicklungsarbeiten im Versuchsstand.....	338
3.1 Betriebseinsätze.....	339
4. Erforderliche Weiterentwicklungen und Lösungsansätze für das Bohren beim KTB.....	342
5. Schluß.....	346

1. Bedeutung und Einsatzmöglichkeiten der Zielbohrtechnik

In allen Bereichen des Bergbaus, des Fels- und Tiefbaus sowie in jüngster Zeit vermehrt auf dem Gebiet der Erdöl- und Erdgasgewinnung bieten zielgenaue Bohrungen große Vorteile. Bei der Erstellung von Gefrier- und Vorbohrlöchern für das Abteufen von Schächten im Bergbau hat die Zielbohrtechnik schon heute eine vorrangige Bedeutung. Auch bei Tiefbohrungen sind die Anforderungen an die Genauigkeit des Bohrlochverlaufs in den letzten Jahren stetig gewachsen. Die sich daraus ergebenden Ansprüche an ein Zielbohrsystem sind einerseits, daß die Bohrung bei allen Neigungsrichtungen den Zielpunkt genau und zuverlässig erreichen soll und andererseits, daß sich während des Bohrens möglichst geringe Abweichungen vom geplanten Bohrlochverlauf ergeben.

Im besonderen Maße besteht die Forderung nach Zielgenauigkeit auch bei den immer tiefer werdenden Bohrungen.

Beim Abteufen von Tiefbohrungen treten Risiken auf, deren Kenntnis und Beherrschbarkeit von großer Wichtigkeit für das Gelingen eines solchen Projektes sind. Je tiefer die Bohrung werden soll, um so entscheidender ist ihr möglichst vertikaler Verlauf. Abweichungen von der Vertikalen führen zu erheblichen Überlasten beim Ziehen des Bohrgestänges, zu erhöhten Drehmomenten beim Rotary-Bohrverfahren und zu erhöhtem Verschleiß am Bohrgestänge und an bereits eingebrachten Verrohrungen. Auch der Einsatz von reibungsmindernden Spülmittelzusätzen ist nicht in der Lage, dies auch nur annähernd auszuschalten.

Für die kontinentale Tiefbohrung, die eine Endteufe von 10.000 - 14.000 m erreichen soll, ist es daher besonders wichtig, die ersten mehreren tausend Meter möglichst

genau vertikal abzuteufen, damit die erwähnten Schwierigkeiten weitgehend vermieden werden.

Da jede Bohrung durch die verschiedensten Einflüsse, die z.B. geologisch oder bohrspezifisch bedingt sein können, das Bestreben hat von ihrer geplanten Richtung mehr oder weniger stark abzuweichen, kann nur ein kontinuierlich steuerndes System ein solches Bohrloch gewährleisten. Dieses System sollte darüber hinaus in der Lage sein, durch ständige Messungen die Orientierung der Bohrung zu erkennen, zu registrieren und alle Informationen kabellos zum Bohrstand zu übermitteln.

Nach dem Erkennen einer beginnenden Abweichung muß die sofortige automatische Richtungskorrektur des Meißels beginnen. Es darf sich daher nicht um eine Richtungskorrektur im hergebrachten Sinne handeln, sondern es muß ein ständiges Richtungshalten angestrebt werden.

Eine Kontrolle des Zielbohrsystems selbst muß in der Weise möglich sein, daß gemeinsam mit den Bohrparametern auch Werte der Meß- und Steuereinheit übermittelt werden können. Durch diese Übertragung von Funktionswerten der Hydraulik und Elektronik des Systems wird somit die übertägige Gegenkontrolle von Bohrlochverlauf und Zielbohrsystem gewährleistet.

Alle heute angewendeten Techniken des Richtbohrens bei tiefen Bohrungen werden diesen Forderungen nicht gerecht. Häufig wird zwar schon während des Bohrens gemessen (MWD), die Richtungskorrektur selbst kann jedoch nur abschnittsweise vorgenommen werden. Dazu muß eine veränderte Bohrgarnitur eingebaut werden, die einen zusätzlichen Roundtrip erfordert und dadurch zusätzliche Stillstandzeiten der Bohranlage verursacht.

Das Ergebnis dieser Korrekturen ist ein Bohrlochverlauf um eine gedachte lotrechte Achse mit mehr oder weniger großen Abweichungen.

2. Die Entwicklung der Bergbau-Forschung GmbH

Vor etwa acht Jahren hat die Bergbau-Forschung GmbH mit der Entwicklung einer selbsttätig steuernden Zielbohrstange - ZBE - begonnen. Das heute vorliegende ZBE-System, welches eine Gemeinschaftsentwicklung mit der Schwing Hydraulik Elektronik GmbH & Co. ist, kann als Vertreter einer neuen Generation von aktiven Zielbohrgeräten betrachtet werden.

Bei der Konzeption dieses Systems wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß von der ZBE schon während des Bohrens kontinuierlich kleinste Abweichungen von der Solllinie gemessen werden können. Treten Abweichungen von der Lotrechten auf, erfolgt die selbsttätige Gegensteuerung durch das System. Zu diesem Zweck mußten aktive Einrichtungen in den Gerätekörper integriert werden, die über einen Soll/Ist-Wert-Vergleich die selbsttätige Richtungsänderung vornehmen.

Abbildung 1 zeigt die selbsttätig steuernde Zielbohrstange als Foto und als Schnittzeichnung mit den wesentlichen benannten Bau- und Funktionselementen.

Die für das Rotary-Bohren konzipierte Zielbohrstange wird hinter dem Bohrkopf von z.B. 216 mm (8 1/2") Durchmesser angeordnet und kann in Verbindung mit üblichem Bohrgestänge verwendet werden.

Das Gerät ist 1,95 m lang und besteht im wesentlichen aus einer inneren Welle, welche innerhalb eines äußeren Rohrkörpers durch Axial- und Radiallager sowie Wellen-

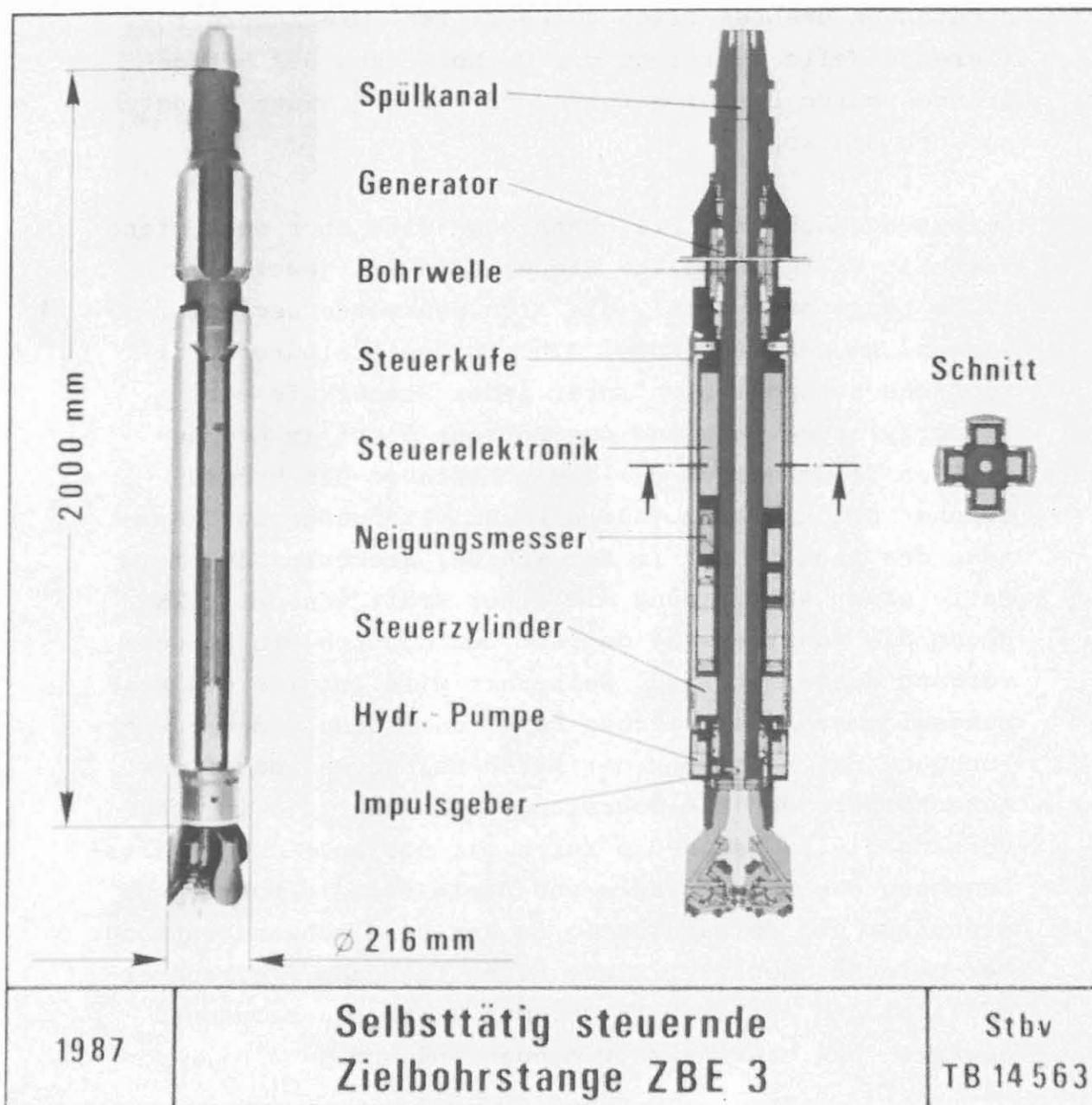


Abb. 1

dichtungen drehbeweglich gelagert ist. Die innere rotierende Welle überträgt die Drehbewegung des Bohrstänges durch das nichtrotierende Außengehäuse hindurch auf den Bohrkopf.

Am Außengehäuse der Zielbohrstange sind über den Umfang verteilt vier bewegliche Steuerkufen von jeweils ca. 1,2 m Länge angebracht, die sich paarweise gegenüberliegen. Am vorderen Ende, d.h. in unmittelbarer Bohrkopfnähe befindet sich unter jeder Steuerkufe ein Steuerzylinder. Während des Bohrens steht im hydraulischen Steuersystem der Zielbohrstange ein hydraulischer Druck bis ca. 100 bar zur Verfügung, so daß jede der Steuerkufen im Bereich der Steuerkolben im Falle einer Aktivierung mit einer Kraft von ca. 7 kN gegen die Bohrlochwand gepreßt und dadurch ein Steuerungsvorgang ausgelöst wird. Weiterhin wird infolge des Reibungswiderstandes zwischen den Steuerkufen und der Bohrlochwand das Mitdrehen der Kufen selbst und damit des Außenkörpers der Zielbohrstange verhindert. Beim Bohrvorgang gleiten dann die Kufen mit der Auf- und Abwärtsbewegung des Bohrstranges und damit der Zielbohrstange drehstarr und reibschlüssig an der Bohrlochwand entlang. Der zwischen den vier Steuerkufen liegende Freiraum ermöglicht den Abtransport der mit Bohrklein beladenen abwärts- bzw. aufwärtsströmenden Spülung.

In den Kammern hinter den Steuerleisten befinden sich die für die Ermittlung der Bohrlochneigung, für die Regelung und für den Steuervorgang nötigen Komponenten der Elektronik und Steuerhydraulik. Mit Hilfe zweier senkrecht zueinander angeordneter Neigungsmesser (Inclinometer), die ähnlich einer elektronischen Wasserwaage die Bohrlochneigung in der positiven und negativen x-Richtung bzw. y-Richtung messen, werden Abweichungen von der Lotrechten von nur einer Winkelminute ($1/60^\circ$) erkannt.

Bei Registrieren einer Abweichung durch auf den Bohrmeißel einwirkende ablenkende Kräfte erfolgt ausgehend von den Hochgenauigkeits-Meßinstrumenten die sofortige automatische Eingabe eines Korrektursignals in die Steuerhydraulik. Die in die Steuerhydraulik eingegebenen Signale bewirken, daß über eine Ansteuerung durch Magnetventile der Hydraulikkreislauf zu den Steurzylindern geöffnet wird, wobei der der jeweils gegenzusteuern den Neigungsrichtung zugewandte Zylinder mit 100 bar Druck beaufschlagt wird. Dadurch wird die zugehörige Steuerkufe gegen die Bohrlochwand gedrückt, und zwar so lange, bis die Kurskorrektur abgeschlossen bzw. die lotrechte Bohrrichtung wieder erreicht ist.

Durch diesen, in den genannten vier Richtungen kontinuierlich arbeitenden Steuervorgang werden beginnende Bohrlochneigungen bereits zum Zeitpunkt des Entstehens erkannt und durch entsprechende Gegensteuerung hin zur Lotrechten sofort korrigiert.

Bekanntermaßen erbohrt der Meißel immer ein um wenige Millimeter gegenüber dem Meißeldurchmesser vergrößertes Bohrloch. Da die hochsensitiven Neigungsmesser Abweichungen von einer Winkelminute registrieren, erfolgen die Steuervorgänge bereits schon unterhalb des Freischnittes des Bohrkopfes, d.h. innerhalb dieses Übermaßes. Es wird daher sehr frühzeitig und mit relativ niedrigen Kräften gegengesteuert.

Die für die Meß- und Steuerelemente erforderliche elektrische und hydraulische Energie wird in der Zielbohrstange selbst durch die Drehbewegung beim Bohrvorgang erzeugt. Dazu liefern 4 Hydraulikpumpen einen durch Sicherheitsventile begrenzten Systemdruck von 100 bar. Ein neuentwickelter Bohrstangengenerator erzeugt bei einer Gestängedrehzahl von nur 60 min^{-1} eine elektrische Leistung von 45 W.

Da bei einem aktiven Zielbohrsystem, das ohne Einfluß von außen eine selbsttätige Steuerung des Bohrlochverlaufes vornimmt im Falle eines Funktionsfehlers oder Schadens die Gefahr einer Abweichung besonders groß ist, erfolgt während des Bohrens eine ständige Funktionsüberwachung. Dies geschieht mittels des Verfahrens der kabellosen Meßwertübertragung, der Mud Pulse-Technik (s. Abb. 2). Bei diesem Druckpulsverfahren wird in der Spülflüssigkeit innerhalb des Bohrgestänges in der Nähe des Bohrkopfes durch Verengung des durchströmten Querschnittes ein Druckanstieg - Druckimpuls - erzeugt. Diese Druckimpulse ermöglichen eine Datenübertragung aus dem Bohrloch heraus, da sich die unter Tage erzeugten Druckimpulse in der Spülungssäule mit nahezu Schallgeschwindigkeit bis an die Oberfläche fortsetzen. Für die angesprochene Querschnittsverengung ist in den Kopf der Zielbohrstange ein elektrohydraulisch betriebener Impulsgeber eingebaut, der zur Zeit für acht Meßwerte zeitcodierte Druckimpulse auf die im Bohrstang abwärtsfließende Spülwassersäule aufgibt. An der Bohranlage werden diese Druckimpulse von einem übertägigen Differenzdruckaufnehmer empfangen und als Stromimpulse über Kabel in den Eingang des Meßwertempfängers geleitet. Der Empfänger wertet die Zeit zwischen den seriell empfangenen Druckimpulsen aus und setzt diese in Spannungswerte um, die den in der Zielbohrstange während des Bohrens ermittelten Werten entsprechen. Ein kompletter aus dem Bohrloch übertragener Datensatz besteht aus den Meßwerten für:

- die vier Neigungswerte entsprechend den o.g. vier Neigungsrichtungen
- die System-Temperatur
- den Tankdruck des Hydrauliksystems
- den Meßwertdruck, d.h. den Druck mit dem der Impulsgeber zur Meßwertübertragung ausgefahren wird und
- den von den vier Hydraulikpumpen erzeugten Steuerdruck.

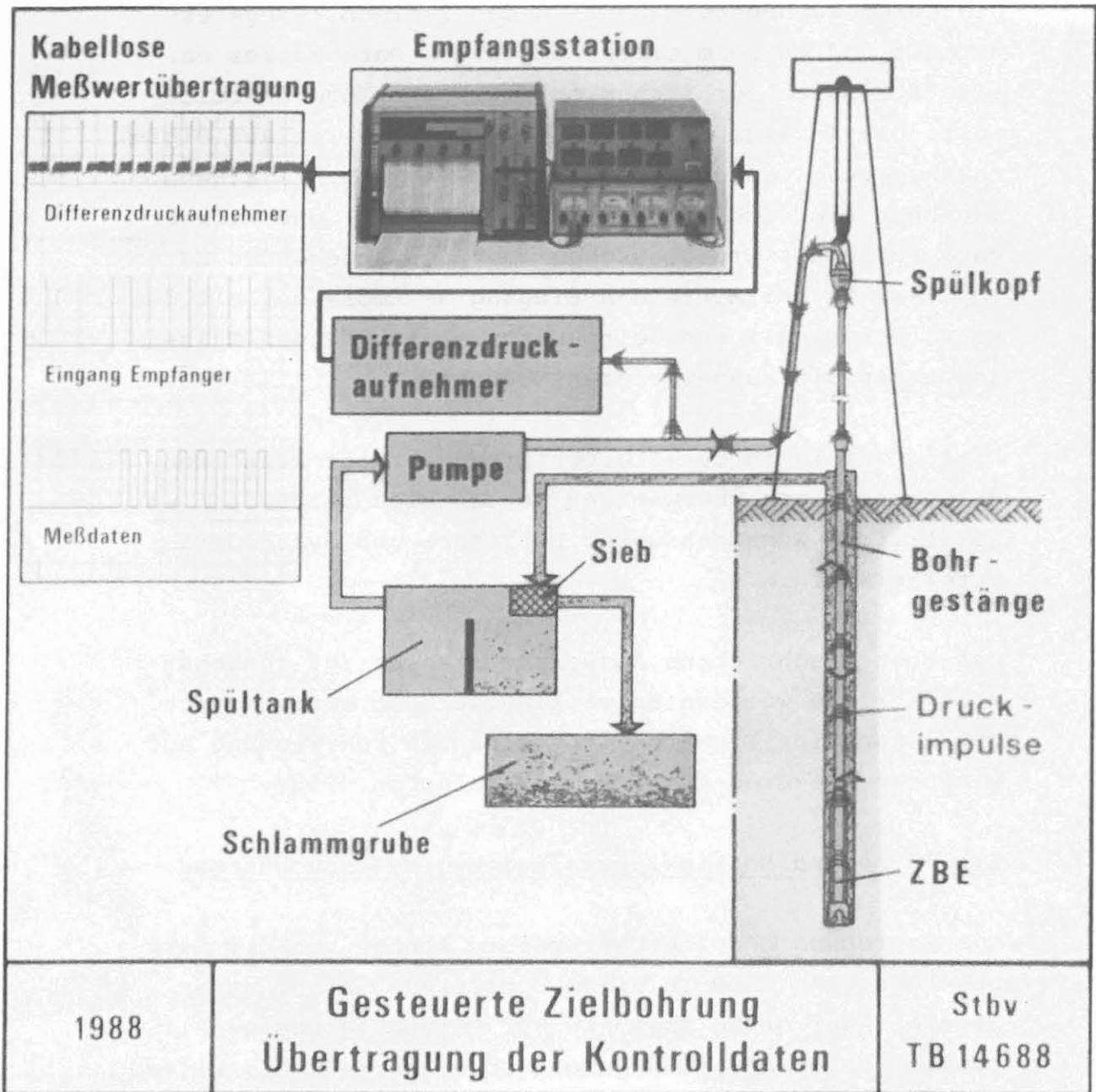


Abb. 2

Die Daten werden permanent in der Zielbohrstange ermittelt und in Form eines kompletten Datensatzes ca. alle 5 Minuten zur Systemkontrolle zum Tage übermittelt. Die Anzeige der Daten erfolgt parallel auf Digitalanzeigen. Im Schreiberdiagramm (s. Abb. 2) erkennt man oben die sich von dem durch den Bohr- und Pumpvorgang erzeugten Grundrauschen deutlich abhebenden Datenimpulse, in der Mitte den Eingang am Empfänger mit den zu unterschiedlichen Zeitpunkten eintreffenden Pulsen und unten die ausgewerteten Meßdaten.

Die derzeitig in der Zielbohrstange ermittelten Meßdaten und deren Überwachung lassen sich bei Bedarf um zusätzliche wünschenswerte Bohrloch- und Systemparameter erweitern.

Das oben beschriebene Auswerteverfahren ist zunächst noch für die weitere Entwicklungsarbeit erforderlich. Für zukünftige Einsätze läßt sich die Überwachung auf einfache Rot-Grün-Anzeigen vereinfachen.

3. Erprobung und Entwicklungsarbeiten im Versuchsstand

Die Erprobung des Zielbohrsystems konnte von der Bergbau-Forschung GmbH in einem Bohrversuchsstand unter Tage auf der Grube Tremonia der Versuchsgrubengesellschaft mbH in Dortmund durchgeführt werden. Mit Hilfe von parallel durchgeführten Testläufen zur Funktionskontrolle verschiedener Einzelteile im Labor und bei anschließender Erprobung unter Tage war somit eine weitgehende Betriebsnähe gegeben.

Insgesamt wurden 19 vertikale Aufwärtsbohrungen zwischen der 3. und der 2. Sohle mit einem Sohlenabstand von 72 m gebohrt, wobei die letzten sechs Bohrlöcher allesamt absolut lotrecht erstellt werden konnten. Zum Einsatz kam dabei eine Bohrmaschine EH 1200 der Turmag Turbo-Maschinen AG, Nüsse & Gräfer. Die Anforderungen an die Zielbohrstange waren dabei durch steilstehende, wechseln-

de Gebirgsschichten einschließlich Steinkohlenflözen außerordentlich hoch. Das Zielbohrsystem - ZBE - wurde in seinem ersten Entwicklungsschritt für bergbauübliche Einsätze mit Bohrlängen bis 350 m konzipiert und hat nach verschiedenen Detailverbesserungen heute die Betriebsreife für das Aufwärtsbohren erreicht.

Für das Abwärtsbohren, welches den zweiten Schritt in der Entwicklung des Zielbohrsystems darstellt, mußten verschiedene Modifikationen am Gerät vorgenommen werden. Der wesentliche Unterschied abwärtsgerichteter Bohrungen gegenüber den aufwärtsgerichteten ist der, daß die Zielbohrstange durch das Vorhandensein der Spülungssäule höheren statischen Drücken ausgesetzt ist. Damit ergeben sich u.a. größere Anforderungen an die Dichtungen, die das drehende Innenteil vom stehenden Außenteil der ZBE abdichten. Mit der weiterentwickelten Zielbohrereinheit ist es inzwischen gelungen, eine durchgehend lotrechte Abwärtsbohrung von 275 m Länge zu erstellen.

In einer weiteren abwärtsgerichteten Versuchsbohrung von 100 m Länge hat sich das Zielbohrsystem in Kombination mit einem nachgeschalteten Erweiterungsbohrkopf (Holeopener), der das Bohrloch von 216 mm auf einen Durchmesser von 305 mm erweitert, bewährt. Damit steht nun auch die Möglichkeit offen, mit einem Zielbohrstangen-Grunddurchmesser unterschiedliche Bohrloch-Durchmesserbereiche zu erfassen.

3.1 Betriebseinsätze

Seit Mitte 1984 sind auf 18 Bergwerken in der Bundesrepublik Deutschland, Belgien und Frankreich 34 Zielbohrungen bis zu 400 m Länge bei in diesem Fall 8 cm Abweichung abgebohrt worden. Die mit der selbsttätig steuernden Zielbohrstange ZBE 3 überwiegend aufwärtsgerichteten Bohrungen verliefen alle zielgenau und durch-

gehend geradlinig. Beispielhaft sei hier die aufwärtsgerichtete Zielbohrung als Pilotbohrung für einen Blindschacht auf dem Bergwerk Waterschei der NV Kempense Steenkolenminen in Belgien aufgeführt.

Vor dem Einsatz des Zielbohrsystems waren bereits zwei konventionell begonnene Zielbohrungen wegen schwieriger Geologie gescheitert. Das Titelfoto verdeutlicht mit Hilfe eines Laserstrahls den über 191 m Länge absolut vertikalen Verlauf der Bohrung. Als Besonderheit ist hervorzuheben, daß die Bohrung drei abgebaute und verbrochene Flözhorizonte durchbohren mußte und dabei ihren lotrechten Verlauf genau einhielt. Gebohrt wurde ohne nachgeschaltete Stabilizer. Die von den abgebauten und verbrochenen Flözen hinterlassenen Hohlräume waren größer als 2 m und gingen damit über die Führungslänge (ca. 1,2 m) der ZBE 3 hinaus.

Bei einem erst kürzlich durchgeführten untertägigen Einsatz wurde mit der ZBE eine 307 m lange Aufwärtsbohrung durch gebirgsmechanisch stark beanspruchte Zonen sowie mehrere Flözhorizonte geführt. Bei einer späteren Befahrung des Bohrloches mit einer Fernseh-Sonde wurde deutlich, daß sich das Bohrloch abschnittsweise von der kreisrunden zu einer ovalen Form hin deformiert hatte. Anhand des geradlinigen Bohrlochverlaufes ließ sich dann eindeutig feststellen, daß selbst hohe Gebirgsdrücke auf die Bohrlochwandung keinen negativen Einfluß auf die Steuerfunktion der Zielbohrstange hatten. Inzwischen hat das Zielbohrsystem durch Betriebsversuche seine Tauglichkeit unter Beweis gestellt. Heute ist das Erstellen von Aufwärtsbohrungen nicht nur durchgehend lotrecht, sondern auch betriebswirtschaftlich erfolgreich möglich.

Schwierigkeiten bei der Erprobung im Betrieb traten überwiegend während der Übertragung der Kontrolldaten mit Hilfe des "Mud-Pulse-Verfahrens" auf. Ausfallzeiten waren die Folge. Nach einigen konstruktiven Veränderungen stellt der störungsfreie Empfang der Informationen aus der Zielbohrstange heute kein Problem mehr dar. Die Häufigkeit von ZBE-systembedingten Einsatzunterbrechungen konnte durch fortschreitende konstruktive Verbesserungen an Teilkomponenten stark reduziert werden. Es sind derzeit 10 Zielbohrsysteme bei verschiedenen Bergbau-Spezialunternehmen im Einsatz, 2 weitere Systeme befinden sich im Bau.

Eine der Hauptursachen die zu Störungen im Hydrauliksystem führte und lange Zeit nicht richtig erkannt wurde, lag im Einsatz von unrund laufenden Bohrmeißeln. Auf den Durchmesser bezogen betrug der Seitenschlag bis zu 5 mm. Allein durch den Einsatz von rundlaufenden Bohrmeißeln konnte eine wesentliche Ausfallursache beseitigt werden.

Versuchsweise wurde auch mit Bit- und Stringstabilizern gebohrt. Deren Einsatz hat sich zum einen nicht nachteilig auf die Steuerfunktion der ZBE ausgewirkt, sondern darüber hinaus zu einem insgesamt positiveren Bohrablauf beigetragen.

Wegen der höheren statischen Drücke im Bohrloch infolge der Spülungssäule wurde für das Abwärtsbohren der Einsatz verbesserter Dichtungselemente nötig. Sie befinden sich z.Z. in der Erprobung und zeigen durch die Erhöhung der Standzeiten erste Erfolge. Zur Zeit befindet sich ein Zielbohrsystem erstmalig in einem nicht bergbaulichen Einsatz bei einem Kavernenkraftwerk in Österreich.

Für die Bohrung ist eine Endteufe von 600 m vorgesehen, wobei sehr harte, u.a. quarzithaltige Gesteinsschichten zu durchteufen sind. Die Zielbohrstange ist in Kombination mit einem Holeopener von 311 mm \emptyset im Einsatz. Die Bohrung hat Anfang März eine Teufe von 300 m erreicht und weist laut Datenkontrolle einen bis hierhin durchgehend lotrechten Verlauf auf. Das Gerät hat zu diesem Zeitpunkt Betriebszeiten von 100 - 200 Stunden im ununterbrochenen Einsatz erreicht.

4. Erforderliche Weiterentwicklungen und Lösungsansätze für das Bohren beim KTB

Das Zielbohrsystem ist augenblicklich noch für die Erstellung "flacher" vertikal aufwärts- oder abwärtsgerichteter Bohrungen konzipiert und genügt den an diese Bohrungen gestellten Anforderungen im Bergbau. So konnte bei den bisher durchgeführten Betriebseinsätzen die mittlere Standlänge je Bohrung durch konsequente Weiterentwicklung und Verbesserungen an Problembereichen von zunächst sehr niedrigen Werten nennenswert gesteigert werden. Bei den aufwärtsgerichteten Bohrungen wurde bereits eine Einzel-Standlänge von knapp 240 m erreicht. Um den Einsatz des Zielbohrsystems auf tiefe Bohrungen ausdehnen zu können, müssen während der nächsten Entwicklungsschritte verschiedene konstruktive Veränderungen an diesem System vorgenommen werden. Es wird ein wesentlicher Beitrag zum Gelingen der KTB-Bohrung sein, die Voraussetzungen für ein weitgehend geradliniges und lotrechtes Bohrloch zu schaffen.

Die in der kontinentalen Tiefbohrung in den für die ZBE vorgesehenen Einsatzteufen zu erwartenden bohrtechnischen Parameter sind ein wichtiger Bestimmungsfaktor für die konstruktive Gestaltung der Zielbohrstange. Ihre Einsatzfähigkeit und Lebensdauer hängt im wesentlichen davon ab, daß ihre möglichen Belastungsgrenzen nicht unterhalb derer vergleichbarer Bohrstrangkomponenten liegen. Dazu muß das System den derzeitigen durchschnittlichen Standardanforderungen genügen.

Die KTB-Bohrung soll im ersten Bohrlochabschnitt bis 500 m Teufe in einem Durchmesser von 17 1/2" und im daran anschließenden Bohrlochabschnitt bis ca. 3000 - 5000 m in einem Durchmesser von 14 3/4" ausgeführt werden. Dabei werden für die Teufe von 5000 m etwa folgende Arbeitsbedingungen angenommen:

- Spülungsdruck: bis ca. 600 bar
- Temperatur: 120°C
- Schockbelastung: bis ca. 500 g

Der hohe Wert der Schock- und Stoßbelastung ist nicht nur aus den Umgebungsbedingungen beim Bohren hergeleitet, sondern wird auch für die Handhabung bei Transport und Einbau gefordert.

Für die Erfüllung der beim KTB geforderten Aufgabe wird das Zielbohrsystem mit einem Grunddurchmesser von 14 3/4" (374,6 m) gefertigt. Die Abdeckung des ersten Bohrlochabschnittes erfolgt durch Auffüttern des Gehäuses der ZBE auf 17 1/2". Als Alternative hierzu wird die Kombination der 14 3/4"-Zielbohrstange mit einem nachgeschalteten Erweiterungsbohrkopf (Hole-opener) angesehen.

Wie aus obigen Angaben zu ersehen ist, werden die Ansatzpunkte für weitere Entwicklungsschritte, insbesondere die Werte des Drucks, der Temperatur sowie die maximal auftretenden mechanischen Beanspruchungen in der angestrebten Teufe sein.

Das bisher in der Zielbohrstange eingesetzte Hydrauliksystem, welches mit Hilfe drehzahlabhängiger Hydraulikpumpen Systemdrücke von 100 bar liefert, kann in 5000 m Teufe nicht mehr eingesetzt werden. Bedingt durch die herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen muß ein geöffnetes, vom Teufendruck unabhängiges System entwickelt werden.

Im Zielbohrsystem gibt es zwei problematische Dichtungssysteme, deren frühzeitiger Ausfall bisher u.a. das Maß für die Standzeit war. Es handelt sich hierbei um die Gleitringdichtungen, die das "stehende" Gehäuse und die rotierende Bohrwelle gegeneinander abdichten. In diesem abgedichteten Raum sind die komplette Lagerung (Bohrwelle-Gehäuse), der Generator, die Hydraulikpumpen sowie die Drehdurchführung für die Datenübertragung untergebracht. Angesichts der zu erwartenden Druckverhältnisse in der KTB-Bohrung (bis 600 bar) wird es nur schwer möglich sein, den abzudichtenden Freiraum gänzlich von evtl. eindringender verschmutzter Spülung freizuhalten. Unter Beibehaltung der bewährten Meß- und Steuertechnik wird zur Eliminierung der o.g. bisherigen Hauptausfallursache ein Lösungsweg beschritten, der die Verwendung der Spülung selbst als Druckmedium für das Hydrauliksystem vorsieht. Durch eine Abzweigung des in der rotierenden Welle herabfließenden Spülstroms in den o.g. Freiraum zur Bespeisung der Hydraulikpumpen wird ein teufenunabhängiger Druckausgleich entsprechend dem jeweiligen Teufendruck zwischen dem Freiraum und der Spülungssäule geschaffen. Diese technische Lösung und eine Reihe weiterer damit verbundener gravierender Vorteile gegenüber der jetzigen Auslegung läßt bei jeder Teufe und Drehzahl eine störungsfreie Funktion der ZBE erwarten.

Eine weitere dominierende Größe hinsichtlich zu ertragender Umgebungseinflüsse stellt die Temperatur dar. Die Arbeitsgrenzen aller zur Zeit auf dem Markt erhältlichen Geräte liegen heute bei maximal 150 - 200°C. Sie müssen auf ihre Eignung für das Zielbohrsystem untersucht werden. Alle Bauteile, die zur Meß- und Regeltechnik der Zielbohrstange gehören, müssen nach den gleichen, auch für die Hydraulik und Elektronik relevanten Kriterien gekühlt oder isoliert werden.

Bei einer zu erwartenden Meißellast von etwa 30 (\pm 10) t und entsprechend vorhandenen Zugkräften der Bohrmaschine werden an die Lager der Zielbohrstange hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen so ausgelegt sein, daß sie im Rahmen der angestrebten Lebensdauer die auftretenden statischen und dynamischen Belastungen in axialer und radialer Richtung aufnehmen können.

Hinsichtlich der zu erwartenden Stoßbelastung besteht eine weitere Entwicklungsaufgabe darin, die einzelnen Bauelemente oder -gruppen der Elektronik durch konstruktive Maßnahmen und/oder zusätzliche Dämpfungselemente gegen Zerstörung durch hohe Stoßbelastung beim Bohrvorgang oder durch unsachgemäßen Transport zu schützen.

Erreichen die abwärtsgerichteten Bohrungen größere Teufen, so muß die Technik der Impulserzeugung zur Datenübertragung infolge zunehmender Dämpfung der Druckstöße modifiziert werden. Es ist zu erwarten, daß mit zunehmender Teufe die Datenübertragung wegen wachsender Kompressibilität des Spülstroms schwieriger wird. Mit zunehmender Teufe und wachsender Anzahl der Gestängeverbinder nehmen die Fließwiderstände im Strang zu. Damit verbunden ist ein Anwachsen des sogenannten "Grundrauschen", welches sich additiv aus den Druckanstiegen der Pumpenhöhe der Spülpumpe und den Fließwiderständen im Strang zusammensetzt. Die Druckstöße der Meßwerte aus dem Zielbohrsystem müssen eindeutig über dem "Grundrauschen" liegen. Hier müssen Wege gefunden werden, die eine bessere Auflösung garantieren, um dann die erzeugten Signale eindeutig aus dem Spülstrom filtern zu können. Zuletzt durchgeführte Versuche haben einen Weg erkennen lassen, wie Druckstöße, die über dem "Grundrauschen" liegen, besser erkannt und ausgewertet werden können.

Mit dem "Mud-Puls-Verfahren" - BF/Schwing - kann bei entsprechender Weiterentwicklung des Impulsgebers eine eindeutige Datenübertragung für 5000 m Bohrteufe erwartet werden.

Für größere Bohrteufen sollten die begonnenen Entwicklungsarbeiten an elektromagnetischen Übertragungssystemen intensiviert werden.

5. Schluß

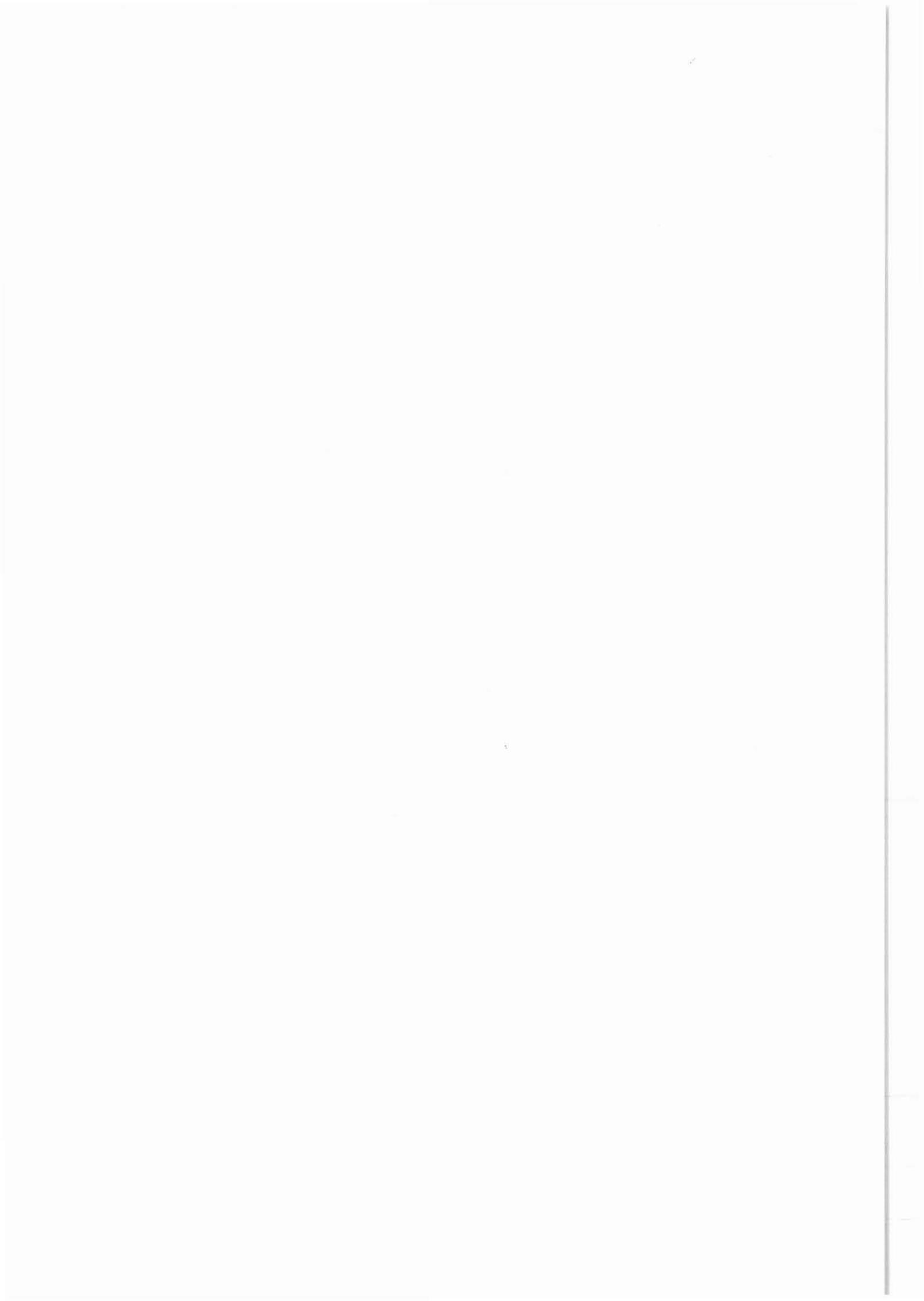
Das selbsttätig steuernde Zielbohrsystem BF/Schwing (Bergbau-Forschung GmbH/Schwing Hydraulik Elektronik GmbH & Co.) hat in mehreren Betriebseinsätzen nachgewiesen, daß durchgehend lotrechte Bohrlöcher mit diesem System erstellt werden können. Bei einer der letzten Bohrungen ist bereits eine Standzeit von 200 Betriebsstunden erreicht worden.

Für die zukünftigen Schritte ist die Weiterentwicklung eines auf der Technik des heute bestehenden Zielbohrsystems und auf der Basis der bestehenden Patente BF/Schwing aufbauenden Prototyps nötig und realisierbar. Durch den Einsatz des Zielbohrsystems in Tiefbohrungen können Kosten minimiert und technisch bedingte Risiken erheblich reduziert werden.

Durch die erforderliche Weiterentwicklung des Zielbohrsystems - ZBE - für das KTB ist eine weitreichende Signalwirkung für andere Bohraufgaben zu erwarten, auch wenn in den Entwicklungsschwerpunkten eine gravierende Abgrenzung vorhanden ist. So sind die Fragen des erhöhten Drucks und die Probleme der Abdichtung in vielen Fällen ähnlich gelagert.

Die bisher gemachten Erfahrungen sowie die vorgesehenen weiteren Entwicklungsschritte lassen die berechtigte Hoffnung zu, daß das für das KTB ausgelegte Zielbohrsystem bis zur Teufe von 5000 m erfolgreich einsetzbar ist und eine durchgehend lotrechte Bohrung liefern wird.

C. Bohrplatz und Bohranlage



Planungsbüro U. Schröder

Der Zuschlag 26, 3152 Uetze

Studie Bohrplatzoptimierung

Dipl.-Ing. U. Schröder

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung.....	354
2. Einleitung.....	354
3. Gesetzliche Vorschriften.....	355
4. Lösungsvorschlag Allgemein.....	355
4.1 Bohrplatzausbildung.....	356
4.2 Straßen- und Erdbau.....	359
4.3 Leerrohrnetz.....	359
4.4 Technische Daten Betriebsgelände.....	359
5. Wassersysteme.....	360
5.1 Regenwassersysteme.....	360
5.1.1 Sammelbecken.....	360
5.1.2 Bohrplatzentwässerung.....	360
5.1.3 Straßenentwässerung.....	362
5.2 Schmutzwassersystem.....	362
5.3 Brauchwassersystem.....	362
5.4 Löschwassersystem.....	365
5.5 Stromversorgung.....	365
6. Planungszeiten.....	365

1. Zusammenfassung

Im Rahmen der Kontinentalen Tiefenbohrung soll in Form einer Studie untersucht werden, welche Möglichkeiten zur Bohrplatzoptimierung aus bautechnischer Sicht unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen, die das Kontinentale Tiefbohrprojekt hier stellt, gegeben sind.

Dabei ist im einzelnen zu prüfen

- bis zu welcher Maximalentfernung zwischen Vor- und Hauptbohrung ein gemeinsamer Bohrplatz, der beide Ansatzpunkte umfaßt, wirtschaftlich ist
- welcher Platzbedarf für Vor- und Hauptbohrung unter Berücksichtigung der erforderlichen Nebengebäude wie Feldlabor, Kern- und Spülprobenmagazin, Werkstätten, usw. besteht.
- wie bei einem gemeinsamen Bohrplatz die in Frage kommenden Bohranlagen für Vor- und Hauptbohrung inklusive ihrer Nebenaggregate optimal aufgestellt werden können.
- welche Maßnahmen zum Schutze der Umwelt getroffen werden müssen.

2. Einleitung

Ein Bohrplatz hat die Aufgabe, die Bohranlage, die Maschinen und die Container aufzunehmen, um einen reibungslosen Ablauf innerhalb des Platzes zu gewährleisten.

Früher war der Bohrplatz eine mehr oder weniger planierte, eventuell mit Holzmatten und Bitumen ausgelegte Fläche, die lediglich dem Selbstzweck diente.

Der Bohrplatz der heutigen Zeit ist ein Bauwerk, das in seiner gesamten Auslegung bis hin zu seiner inneren Konstruktion ein voll integriertes Bestandteil der Bohranlage ist. Eine Vielzahl von Anschlüssen und Leitungen für die Ver- und Entsorgung des zum Einsatz kommenden Bohrgerätes sorgen für einen reibungslosen Ablauf der "Maschine" Bohrplatz. Weiterhin wird dem gestiegenen Verantwortungsbewußtsein der Allgemeinheit gegenüber der Umwelt sowie den gestiegenen Anforderungen an die Gesetze und DIN-Vorschriften Rechnung getragen.

3. Gesetzliche Vorschriften

- Bundesberggesetz
- Bergbau- und Tiefbohrverordnung
- Bundesnaturschutzgesetz
- Arbeitsstättenverordnung
- DIN-Vorschriften
- Altölgesetz
- Wasserhaltsgesetz
- Unfallverhütungsvorschriften
- TA Lärm
- TA Luft

4. Lösungsvorschlag Allgemein

Maßgebend für die minimalen Abstände der Bohrungen untereinander sind die jeweiligen Turmhöhen der Bohranlagen. Innerhalb eines Schlagkreises von Turmhöhe + 10% um den Bohransatzpunkt dürfen keine "bewohnten" Gebäude und öffentliche Verkehrsflächen liegen. Zur wissenschaftlichen Auswertung, zur Lagerung von Bohrkernen und Spülungsproben sowie zur allgemeinen Verwaltung ist ein Zentralgebäude erforderlich. Die Lage sollte nach Möglichkeit zwischen den Bohransatzpunkten liegen. Zur zentralen Verkehrsanbindung sind Straßen erforderlich, die, um für Feuerwehrfahrzeuge passierbar sein zu können, Mindestradien von 18,00 m aufweisen müssen. Die Bohrplätze der Haupt- und Vorbohrung, die Nebengebäude und Entsorgungssysteme werden zu einem geschlossenen Betriebsplatz zusammengefaßt, der neben einer Einzäunung auch Bäume und Bepflanzungen erhält, die für eine ökologische Einbindung in die Landschaft sorgen.

Die Oberkanten der Bohrungen untereinander sowie der Gebäude sollten möglichst gleich sein, um auch bei schlechten Witterungsbedingungen reibungslose Zwischentransporte zu garantieren.

Unter Berücksichtigung der beiden Bohrplätze, dem Anordnen der einzelnen Gebäude, Wasserbecken, Straßen und Parkplätze ergibt sich ein Abstand der Bohrungen untereinander von 200 m. Die Mindestplatzabmessungen betragen 190 m X 300 m = 57.000 m².

4.1 Bohrplatzerstellung

Alle zur Bohranlage gehörenden Bauteile wie Turm, Maschinen, Gestängelager und Container werden auf einer Platzfläche, die sich nach der Größe der Anlage richtet, zusammengefaßt.

Die Platzfläche wird in einen "Inneren" und einen "Äußeren" Bereich unterteilt. Der innere Bereich beinhaltet die Maschinenstellfläche und den Turm. Der äußere Bereich besteht aus dem Gestängelager, den Umfahrten und den Containerstellflächen. Die Bereiche werden über Rinnen getrennt entwässert (s. Ziffer 2.1.5.1).

Die Platzoberfläche besteht aus hochwertigem Beton, der folgende Güteeigenschaften besitzen muß:

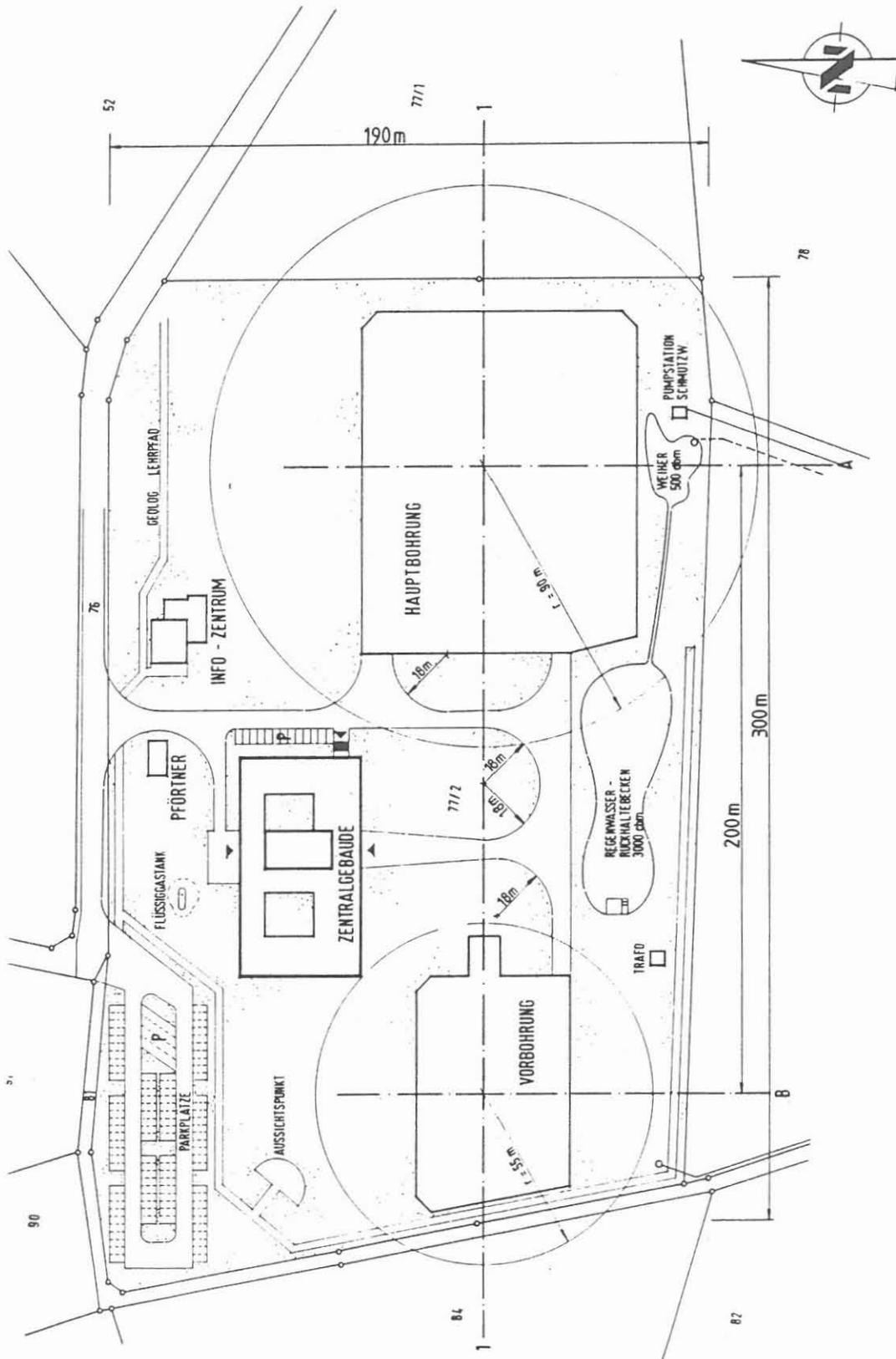
- Festigkeitsklasse B35
- wasserdicht
- tausalzbeständig
- ölbeständig.

Die Betonfläche wird durch Fugen unterteilt, die Risse infolge Schwinden vermeiden sollen. Fugenbänder, die den o.a. Forderungen entsprechen, verhindern einen Abfluß schädlicher Stoffe in den Untergrund.

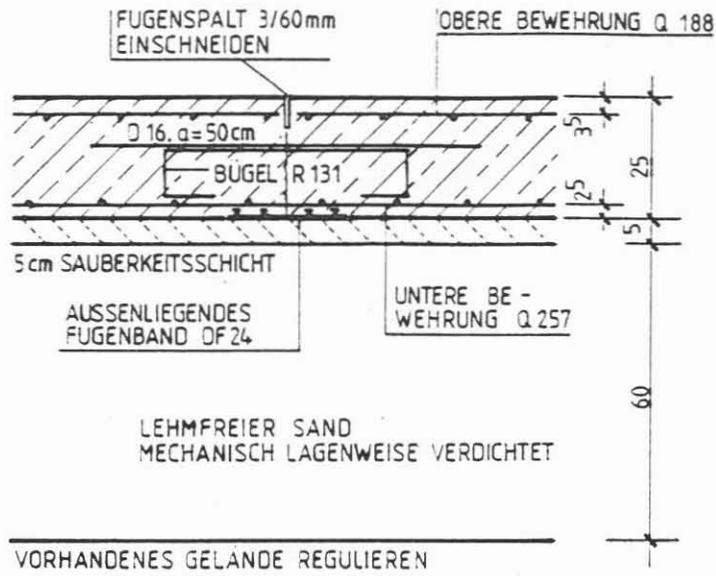
Zur Vermeidung von Frostaufbrüchen erfolgt die Gründung des Platzes auf 60 cm lehmfreien Sand, der mechanisch lagenweise verdichtet wird. Die Gründung der Turmfundamente hat auf gewachsenem Boden zu erfolgen.

Für die Vorbohrung ergibt sich ein Platzbedarf von ca. $75,00 \times 55,00 \text{ m} = 4.125 \text{ m}^2$.

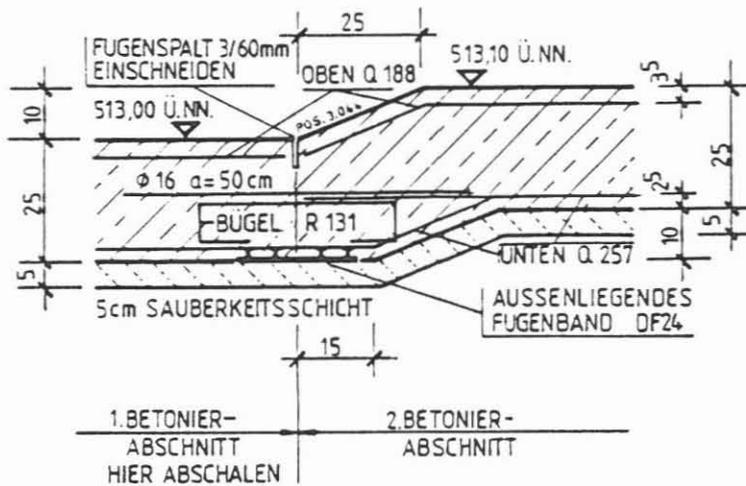
Für die Hauptbohrung ergibt sich ein Platzbedarf von ca. $120 \times 95,00 \text{ m} = 11.400 \text{ m}^2$.



PLATZQUERSCHNITT- FUGENDETAIL



ÜBERGANG INNERE-ÄUSSERE FLÄCHE



4.2 Straßen- und Erdbau

Innerhalb des Betriebsgeländes werden 5,00 m breite Straßen angeordnet. Seitliche Gossen und Bordsteine sowie ausreichendes Gefälle zu den Einlaufschächten sorgen für eine schnelle Entwässerung.

Das gesamte Gelände ist entsprechend den Erfordernissen zu regulieren. Der Mutterboden wird abweichend von DIN 18300 nicht in Mieten gelagert, sondern für eine Aussichtsplattform, Gebäudeanbindungen und Böschungsregulierungen verteilt.

Außerhalb der Einzäunung wird ein Parkplatz für ca. 100 PKW und 4 Busse angeordnet.

Die Straße erhält folgenden Aufbau:

- 10 cm Planum
- 50 cm Frostschutzkies
- 12 cm Bitumentragschicht
- 3,5 cm Asphaltfeinbeton

Parkplatzflächen werden aus gestalterischen Gründen aus Rasengittersteinen erstellt.

4.3 Leerrohrnetz

Die Vor- und die Hauptbohrung werden untereinander und mit dem Zentralgebäude durch Leerrohre miteinander verbunden, so daß jederzeit EDV-, Gas- und Versorgungsleitungen eingelegt werden können.

4.4 Technische Daten Betriebsgelände

Im Zuge der Errichtung der Vorbohrung und der Erstellung des Betriebsplatzes wurden folgende Massen bewegt oder eingebaut:

- 45.000 m² Mutterboden abgeschoben und wieder eingebaut
- 16.000 m³ Boden abgebaut und im Bereich der Hauptbohrung eingebaut
- 17.000 m² Boden in einer Stärke von 50 cm in der Höhe reguliert
- 8.000 m³ schweren Fels abgebaut
- 7.500 m³ Sand und Mineralgemisch geliefert und eingebaut
- 2.600 lfdm Rohrleitungen und Kabel geliefert und in Gräben eingebaut
- 1.480 m³ Beton in Sohlen, Fundamenten und Gruben eingebaut
- 60 t Betonstahl und Baustahlgewebe eingebaut
- 1.700 lfdm Fugen einschl. Fugenbänder ausgebildet.
- 4.700 m² Bitumen-Fahrbahn
- 1.500 m² Rasengittersteine
- 1.200 lfdm Bordsteine
- 15 Stck. Straßenschächte

- 5. Wassersysteme
- 5.1 Regenwassersystem
- 5.1.1 Sammelbecken

Das Hauptproblem beim Bohrplatzbau ist die Erfassung der Niederschlagsmengen und deren Lagerung. Bei einem Regen von nur 15 Minuten Dauer sammeln sich 500 m³ Wasser. Die Erfahrung bei anderen Bohrplätzen hat gezeigt, daß Niederschläge im Bereich der Maschinenstellfläche in Berührung mit Kohlenwasserstoffen oder salzhaltigen Spülungen abgefahren werden müssen. Auf der Bohrung Hindelang z.B. sind hier 150,- DM/m³ Kosten entstanden. (Die Gesamtniederschlagsmenge betrug hier 1,80 m³/m²/Jahr).

Bei der Sammlung von Regenwasser kann man davon ausgehen, daß die Hälfte bis zweidrittel der Menge verdunsten und nur einachtel versickert. Aus diesem Grunde wird die Fläche des Regensammelbeckens groß angelegt. Das Becken wird terrassenförmig im Gelände angeordnet, so daß eine Begrünung möglich ist. Die Beckengröße beträgt 3.000 m³. Als Überlauf ist ein ebenfalls bepflanzter Weiher nachgeschaltet. Von ihm gelangt das Wasser über einen sogenannten Mönch (Stauwehr) in eine Regenwasserleitung, die zum Gemeindekanal führt.

5.1.2 Bohrplatzentwässerung

Wie schon unter Ziffer 2.1.4.1 erwähnt, wird der Bohrplatz in einen "Inneren" und einen "Äußeren" Bereich unterteilt. Der innere Bereich wird entsprechend der Regenspende so tief gelegt, daß er in seiner Gesamtfläche das anfallende Regenwasser aufnehmen kann, ohne überzulaufen. Rinnen erfassen das Wasser und führen es in die Bohrkleingrube.

Durch die umweltfreundliche Spülung kann das Regenwasser z.Z. über die Schmutzwasserleitung an die gemeindeeigene Kläranlage abgegeben werden. Durch entsprechende Abschottungen ist jedoch jederzeit eine Trennung des Systems möglich. Der äußere Bereich wird im Gefälle zu einer umlaufenden Rinne, die über Sandfänge und Rohrleitungen mit einem Ölabscheider verbunden ist, entwässert.

5.1.3 Straßenentwässerung

Das Regenwasser der Straßen wird durch Einlaufschächte gesammelt und über ein Rohrsystem dem Ölabscheider zugeführt. Der Abscheider besteht aus einem Dreikammersystem, der Kohlenwasserstoffe und Verunreinigungen abscheidet; weiterhin werden in einem Beruhigungsbecken Sande abgelagert. Vom Abscheider wird das Wasser in das Regenwasserbecken geleitet.

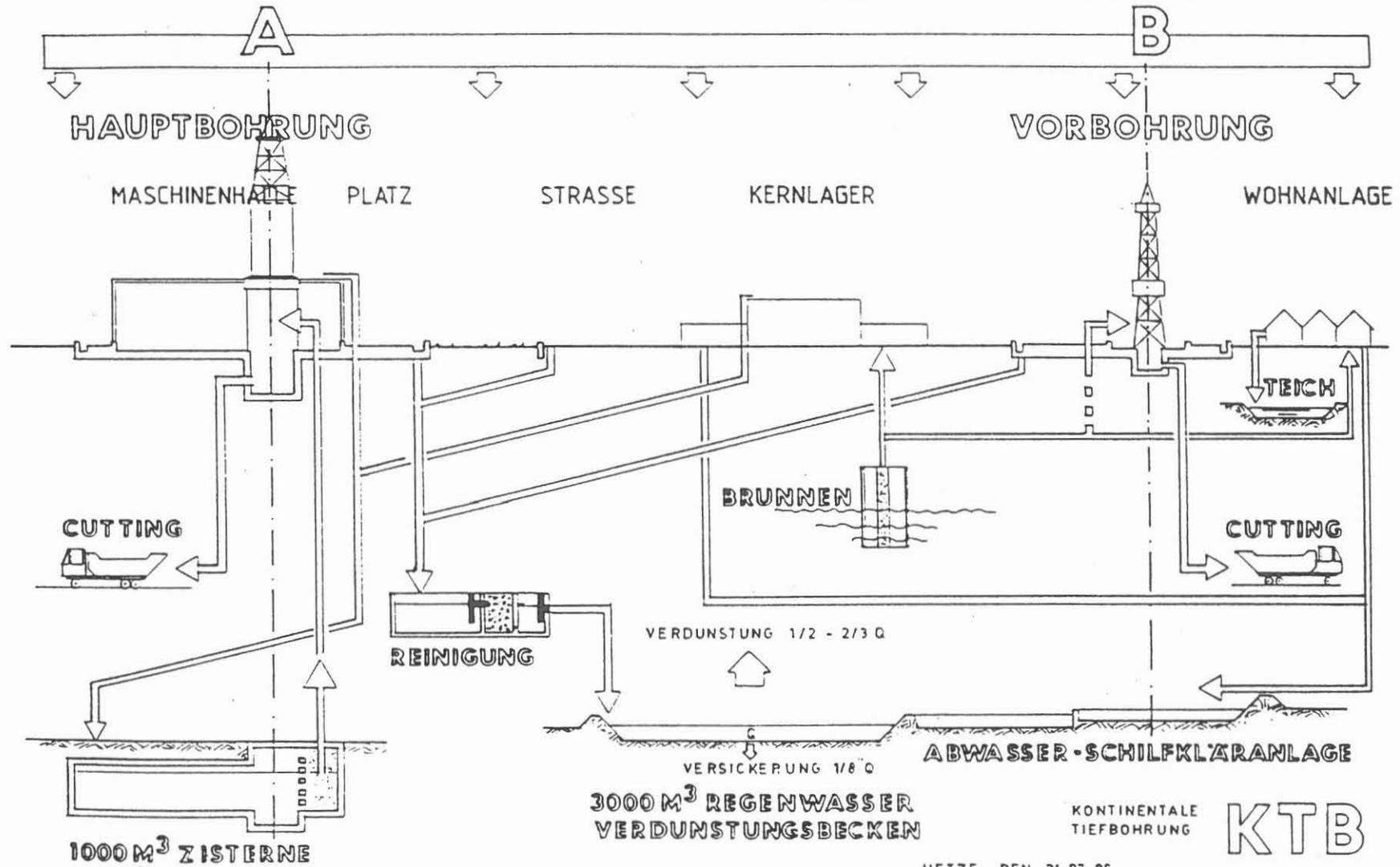
5.2 Schmutzwassersystem

Die Hausabwässer der Bohrcontainer, des Zentralgebäudes und des Informationszentrums werden in einem Schmutzwasserkanal im natürlichen Gefälle einer Pumpstation zugeführt. Von hier werden die Abwässer zur gemeindeeigenen Kläranlage gepumpt.

5.3 Brauchwassersystem

Die Wasserversorgung erfolgt über eine gesonderte, öffentliche Zuleitung zu einem Übergabeschacht auf dem Bohrgelände. Von hier wird die Bohranlage direkt versorgt. Eine zweite Leitung verbindet das Zentralgebäude und die erforderlichen Hydranten für die Feuerlöschversorgung.

WASSERSYSTEME



Wasserarten	VERBRAUCHSWERTE	ABHÄNGIGKEITEN	EINZELKOSTEN DM/m ³	KOSTEN IN 10 JAHREN (TDM)	m	ALTERNATIVLÖSUNG (TDM)
Trinkwasser	8,00 m ³ / Tag	Bau Wasserleitung Bau Schmutzwasserleitung	Entnahme 0,90 Abgabe 2,40	Bau Wasser 38/25 Bau Abwasser 95/70	228 TDM	Brunnenbau Bau 40 Unterhalt 10
Brauchwasser	35,00 m ³ / Tag	antibiot. Schutz	Entnahme 0,90 Abgabe 2,40	Bau Wasser 163/115 Bau Abwasser 405/307	990 TDM	Bau 1000 m ³ Zisterne Bau 350 Bau Klaranlage-Sickerteich Bau 120
Regenwasser Dachfläche	17,00 m ³ / Tag	Abgabe Vorflut	0	Bau 10	10 TDM	Abgabe in die Zisterne Unterhalt 5
Regenwasser Innere Fläche	18,00 m ³ / Tag	ohne Schadstoffe in Vorflut mit Schadstoff-Abflut	0 Abflut 150	0 in 5 Jahren 4927	4927 TDM	Zeltdach Bau 10 83 Innere Fläche überdachen Schalldämmte Maschinenhalle Bau 14 82
Regenwasser Äußerer Bohrplatz	49,00 m ³ / Tag	Überscheider	0	Bau 8	16 TDM	WASSER-SYSTEME Gegenüberstellung der Ver- und Entsorgungskosten für Trink-, Brauch-, Schmutz- und Regenwasser KONTINENTALE TIEFBOHRUNG KTB Uetze, den 21.7.86
Regenwasser Straßenfläche	46,00 m ³ / Tag	Überscheider	0	Bau 8	16 TDM	

50
470
5
1482

5.4 Löschwasserversorgung

Neben der vorgenannten Hydrantenleitung dient das Regensammelbecken als Löschwasserreservoir.

5.5 Stromversorgung

Auf dem Bohrgelände wurde eine Trafostation errichtet, von wo aus die Vorbohrung und das Zentralgebäude mit Strom versorgt werden.

Für die Hauptbohrung wird zu einem späteren Zeitpunkt eine gesonderte Zuleitung gelegt.

6. Planungszeiten

- Vorplanung 1986
- Behördengespräche
Januar bis Mai 1987
- Ausführungsplanung
Juni bis Mitte Juli
- Baubeginn Mitte Juli 1987

In einer Planungs- und Bauzeit von insgesamt 14 Wochen wurde das Bauwerk erstellt.

Literaturverzeichnis:

Studie "Bohrplatzoptimierung" BÜRO SCHRÖDER, UETZE

Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrgesellschaft

Postfach 13 60
4450 Lingen

Das Konzept für die Bohranlage (Neubau)

DST Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrgesellschaft mbH
ITAG Internationale Tiefbohr-GmbH & Co Kg
SMAG Salzgitter Maschinenbau GmbH
WIRTH Maschinen- und Bohrgeräte-Fabrik GmbH

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	370
2. Aufgabenstellung.....	370
3. Ergebnis der Studie.....	371
3.1 Bohrturm.....	373
3.2 Hebewerk.....	374
3.3 Pipehandling.....	375
3.4 Energieversorgung.....	376
3.5 Spülungsanlage.....	377
3.6 Meßtechnik und Datenerfassung.....	378
3.7 Technische Daten der KTB-Bohranlage.....	378
4. Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage.....	380
4.1 Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage anhand wichtiger Kriterien.....	381
4.2 Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage anhand wichtiger Anlagenkomponenten.....	382

DST, ITAG, SMAG, WIRTH: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland - Das Konzept für die Bohranlage

1. Einleitung

Im Februar 1985 begann offiziell die Planung für das vom Bundesminister für Forschung und Entwicklung finanzierte erste deutsche geowissenschaftliche Großforschungsprojekt, das "Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland" (KTB.)

Im Mittelpunkt steht die Durchführung einer 14.000 m tiefen Bohrung im kristallinen Hartgestein mit dem Ziel, die physikalischen und chemischen Bedingungen und Prozesse in der tieferen kontinentalen Erdkruste zu erforschen.

Diese Teufe wurde bisher weltweit noch nicht erreicht, ist aber technisch realisierbar. Der außergewöhnliche Umfang dieses Projekts erfordert eine Studie zur Auslegung der Bohranlage. In dieser Studie wird das Konzept für die Tiefbohranlage vorgestellt, mit der die Bohrung im Rahmen des kontinentalen Tiefbohrprogramms abgeteuft werden soll.

Nach Aufstellung des Anforderungsprofils wird die Ausführung einer neuen, genau auf das Bohrprojekt zugeschnittenen Tiefbohranlage vorgestellt. Das Konzept wird mit einem alternativen Konzept verglichen.

Zur Auslegung und Zusammenstellung der Bohranlage wurden umfangreiche Untersuchungen der Einzelkomponenten und Systeme durchgeführt.

2. Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Studie ist es, das Konzept für Bau und Betrieb einer Tiefbohranlage anhand vorgegebener Eckdaten zu erarbeiten, mit der die KTB-Hauptbohrung abgeteuft werden kann. Dabei ist die Tiefbohranlage nach Kriterien auszulegen, die sich teilweise grundlegend von denen unterscheiden, die an schwere konventionelle Bohranlagen für die Aufsuchung von Kohlenwasserstoffen gestellt werden.

Die KTB-Tiefbohrung dient allein geowissenschaftlichen Forschungszwecken und wird voraussichtlich nach Abschluß der Bohrarbeiten als Tiefenlabor eingerichtet. Die Gewinnung wissenschaftlicher Meßdaten und die Durchführung wissenschaftlicher Arbeiten müssen uneingeschränkt durchführbar sein. Sie

dürfen weder durch die Bohrtätigkeit noch durch Umwelteinflüsse behindert werden.

Aus bohrtechnischer Sicht stellt die KTB-Bohrung ein Novum dar. Die geplante Endteufe wurde bisher weltweit nicht erreicht. Bohrerfahrungen aus kristallinen Formationen liegen bei diesen Teufen und Durchmessern nicht vor. Es sind extreme Bohrbedingungen zu erwarten, die zu Weiter- und Neuentwicklungen von Bohrwerkzeugen und Bohranlagenkomponenten sowie Spülungssystemen zwingen. Besonders hervorzuheben sind:

- hohe Drücke und Temperaturen im Bohrloch
- geringe Bohrfortschritte
- geringe Standlänge der Bohrwerkzeuge mit häufigem Ein- und Ausbau des Bohrstrangs
- große Lasten
- lange Kernstrecken

Die Bohranlage muß den bergamtlichen und baurechtlichen Bestimmungen entsprechen. Störungen, Belästigungen und Verunreinigungen der Umwelt beim Betrieb der Bohranlage müssen bereits vom Bohranlagenkonzept her ausgeschlossen sein.

Alle genannten Auslegungskriterien sind bei der Erarbeitung des Konzeptes für die KTB-Tiefbohranlage zu beachten. Dabei muß die Bohranlage eine möglichst wirtschaftliche Durchführbarkeit des Projekts sicherstellen. Die Bohranlage muß zuverlässig und betriebssicher arbeiten, damit das Risiko des Forschungsprogramms niedrig gehalten und der Umfang der wissenschaftlichen Ausbeute in keiner Phase gefährdet wird.

3. Ergebnis der Studie

Im folgenden wird das Ergebnis der Studie, das Konzept einer neuen KTB-Tiefbohranlage, die weitgehend aus Komponenten deutscher Hersteller zusammengestellt ist, vorgestellt. Sie unterscheidet sich wesentlich von vorhandenen schweren Bohranlagen. Nach Aufzeigen der wichtigsten Anlagenbauteile sind tabellarische Auflistungen angefügt. Mit ihrer Hilfe wird die für das KTB-Projekt vorgesehene Tiefbohranlage mit einer schweren Standardbohranlage verglichen. Der Vergleich bezieht sich auf allgemeine Beurteilungskriterien und auf die wichtigsten Bohranlagenkomponenten.

Nach unseren Untersuchungen entspricht die Belastung der Bohranlage bei der KTB-Bohrung einer Beanspruchung, die eine schwere Bohranlage insgesamt beim Abteufen von rd. 30 Bohrungen à 5.000 m erfährt.

Durch Realisierung aller für die KTB-Bohranlage geplanten technischen Neuerungen gegenüber einer Standardbohranlage ist eine Zeiteinsparung von 323 Tagen zu erreichen. Diese zeitliche Ersparnis bedeutet eine Kosteneinsparung von 9,7 Mio bis 16,2 Mio DM bei einem angenommenen Tagessatz von 30.000 bis 50.000 DM.

Durch konsequenten Einsatz neuer Techniken wird das Bohrpersoneal um ca. 30 % reduziert. Es ergeben sich dadurch Einsparungen von 7,2 Mio DM.

Bei der Erarbeitung des Anlagenkonzeptes wurde neben der geowissenschaftlichen Forschungsaufgabe dem Umwelt- und Landschaftsschutz wegen der langen Projektdauer besonders Rechnung getragen.

Die überwiegende Anzahl von Arbeitsbereichen und Einrichtungen ist in geschlossenen Gebäuden untergebracht. Kontaminierung von Spülung und Spülungschemikalien mit Regenwasser sind weitgehend ausgeschlossen. Durch die witterungsgeschützte Anordnung der Arbeitsbereiche in Gebäuden werden unabhängig von Jahres- und Tageszeit optimale Arbeitsplatzbedingungen geschaffen. Der Schutz der maschinellen Einrichtungen führt zu einem geringen Wartungsaufwand. Der gesamte Gebäudekomplex wird architektonisch der Umgebung angepaßt. Die Arbeitsbereiche und Einrichtungen der Bohrtechnik werden funktionell und räumlich von denen der Geowissenschaften getrennt, um eine gegenseitige Behinderung und sich daraus ergebende Gefährdungen zu vermeiden.

Die klare Gliederung der Gesamtanlage bietet eine räumliche Trennung von Bohrturm, Bohrgestänge- und Futterrohrlager, Spülungsanlage und Energieversorgung. Neben der guten Zugänglichkeit wird dadurch die Möglichkeit für Erweiterungen und Umrüstungen geschaffen, die sich angesichts des schwierigen Projektzieles später als notwendig erweisen können. Technische Entwicklungen, die sich während der langen Projektdauer ergeben, können leicht integriert werden.

Das erarbeitete Konzept vermindert Wartezeiten und führt damit zu einem effektiven Einsatz der Bohranlage. Die KTB-Anlage besteht aus den Hauptkomponenten:

- Bohrturm mit allen zum Bohren und zur Handhabung von Bohrstrang und Futterrohren notwendigen Einrichtungen wie Drehtisch, Hebewerk, Pipehandling-Maschine mit Ver- und Entschraubeinrichtung, Preventeraufbau, Hilfsaggregaten, Fahrstand und Doghouses (Arbeits- und Aufenthaltsräume in unmittelbarer Nähe der Arbeitsbühne).
- Bohrgestängelager mit Liftsystem und Bohrstrang-Prüfbereich sowie zusätzlichem Rohrlager.
- Spülungsanlage mit Spülpumpen, Auslaufrinne, Spülsaufbereitung, Tankanlage für Aktivspülung, für Reservespülung und für Spülung zu Meßzwecken, Spülfabrikation und Spülrückkühlung.
- Energieversorgung mit Transformatoren, Blindstromkompensation, Gleichstrom- und Drehstromteil sowie Steuer- und Schaltzentrum.

3.1 Bohrturm

Der Bohrturm ist als stationäres Bauwerk für eine Hakenregellast von 5.500 kN und eine Hakenausnahmelast von 8.000 kN ausgelegt. Dem Bohrturm sind getrennte Bohrgestänge- und Rohrlager zugeordnet. Die Gesamthöhe des Bohrturms beträgt 75 m, die freie Höhe zwischen Drehtisch und Rollenlager 60 m. Der Bohrturm ist für einen Betrieb mit maximal 40 m-Bohrgestängezügen auch bei Einsatz eines Kraftdrehkopfes (top drive) ausgelegt. Mit 36,5 m-Bohrgestängezügen beträgt die Zeiteinsparung gegenüber dem Einsatz von üblichen 27,4 m-Bohrgestängezügen beim geplanten Roundtrip-Umfang 65 Tage.

Der Bohrturm bietet durch seine großzügige Dimensionierung genügend Raum, um störende Beeinflussungen der verschiedenen Arbeitsgruppen untereinander zu vermeiden. Durch aufeinander abgestimmte und gleichzeitig ablaufende Arbeitsvorgänge lassen sich erhebliche Zeiteinsparungen bei der Projektdurchführung verwirklichen.

Durch die Vollverkleidung des gesamten Bohrturms und die Unterbringung von Ausrüstungskomponenten in geschlossenen Räumen wird eine Belastung der Umwelt vermieden. Die Gebäude werden dem Landschaftsbild angepaßt. Die Vollverkleidung bietet Wetterschutz für das bohrtechnische und wissenschaftliche Personal. Heizungs- und Lüftungsmöglichkeiten verbessern die Arbeitsplatzbedingungen. Wichtige Anlagenkomponenten werden geschützt und Schallemissionen reduziert.

Der Platz im Bohrgerüst ist ausreichend, um gleichzeitig zwei 5"-Bohrstränge für 14.000 m Teufe abzustellen. Für die Bohrstrang- und Futterrohrhandhabung ist eine Pipehandling-Maschine vorgesehen. Sie wird auf der Arbeitsbühne und der Fingerbühne geführt. Für Montage-, Wartungs- und Meßarbeiten sind im Bohrgerüst Umlaufbühnen angeordnet, die über Leitern und einen Personenaufzug erreichbar sind. Die untere Bühne kann für Besucher genutzt werden. Im Bohrgerüst sind Schienen zur Führung des Haken-Retraktor-Systems angebracht. Die Schienen können gleichzeitig zur Führung eines Kraftdrehkopfes eingesetzt werden.

Die Arbeitsbühne hat eine Fläche von 12,5 x 12,5 m. Sie ist in zwei Bereiche unterteilt. Der eine Bereich ist für das Abstellen der Bohrgestängezüge vorgesehen. Hier sind auch die Pipehandling-Maschine und das Liftsystem installiert. Der andere Bereich dient zur ungestörten Handhabung von Kernrohren und Meßgeräten. Auch vorformierte Futterrohrzüge oder Kühlstränge können hier abgestellt werden. An die Arbeitsbühne sind zwei Doghouses angeordnet. Ein Doghouse ist dem technisch-wissenschaftlich-operativen Stab zugeordnet, das andere dient der Bohrtechnik. Vor dem Doghouse der Bohrtechnik ist - in einer verglasten Kanzel - der Fahrstand installiert. Der Unterbau ist für eine Abstelllast von 5.500 kN bei gleichzeitiger Drehtischträgerlast von 8.000 kN ausgelegt. Die Konzep-

tion läßt bei einer Abstelllast von $2 \times 5.500 \text{ kN}$ noch eine Drehtischträgerlast von 6.000 kN zu. Der Unterbau hat eine freie Höhe von $9,6 \text{ m}$. In ihm sind neben dem Hebewerk alle zum Betrieb der Einrichtungen im Bohrturm notwendigen Aggregate untergebracht. Montagehilfen für das Hebewerk, den Preventer-aufbau und die übrigen Komponenten im Unterbau sind vorgesehen.

3.2 Hebewerk

Als Hebewerk wird der Typ GH 4000 E der Fa. Wirth eingesetzt. Das Hebewerk wurde aus dem Typ GH 3000 E weiterentwickelt und modifiziert, ohne auf bewährte Standardkomponenten zu verzichten. Zum einen wurde die Leistung auf 4.000 PS (2.940 kW) angehoben, zum anderen wurde die Fahrseilkapazität der Seiltrommel erhöht und damit ein Betrieb mit bis zu 40 m -Bohrgestängezügen ermöglicht. Die Leistungserhöhung führt zu einer 24tägigen Verkürzung der Zeiten für die angenommenen 800 Roundtrips .

Die Installation des Hebewerks auf einem Fundament im Unterbau stellt auf der Arbeitsbühne zusätzlichen Platz zur Verfügung, reduziert die Schallerregung und verbessert die Möglichkeiten zur Schall- und Schwingungsdämpfung. Wartungsarbeiten am Hebewerk sind leichter durchführbar.

Die auf $2,30 \text{ m}$ verlängerte Seiltrommel hat in vier Wickellagen eine Kapazität von $660 \text{ m } 1 \frac{3}{4}'' \text{ EIPS-Fahrseil}$. Die maximale Zugkraft an der Seiltrommel beträgt in der 2. Wickellage 828 kN . Das $1 \frac{3}{4}'' \text{ EIPS-Seil}$ wurde gewählt, weil es neben dem $1 \frac{7}{8}'' \text{ Seil}$ der einzige Standard-Fahrseiltyp ist, mit dem die vorgegebenen Hakenlasten noch bei 16facher Einscherung (bzw. 14fach bei zukünftiger Änderung der Seilsicherheitsfaktoren nach BVOT) gezogen werden können. Das Fahrseil wird in vergrößerten Seilgebinden angeliefert, um die Verschnittlängen zu verkleinern.

Das Hebewerk wird von vier Gleichstromnebenschlußmotoren, die in der Zündschutzart "Überdruckkapselung" ausgeführt sind, angetrieben. Die Motoren werden über steuerbare Gleichrichter im 4-Quadrantenbetrieb gefahren. Dadurch werden ein generatorisches Bremsen mit Energierückspeisung und beim Abfahren des leeren Bohrhakens eine kontrollierte Unterstützung der Beschleunigung von Hebewerks- und Seilmassen erreicht. Zur Motorkühlung sind Umluft-/Wasserkühler mit Umluftfiltern vorgesehen. Diese Kühlart gewährleistet einen wartungsarmen Betrieb.

Die Hauptbremse des Hebewerks ist eine Verbundbandbremse, die über ein pneumatisch-hydraulisches Servosystem fernbedient wird. Sie ermöglicht ein Abbremsen der maximalen Hakenlast mit dem vorgeschriebenen Sicherheitsfaktor und wirkt gleichzeitig als Notbremse.

Als Zusatzbremse arbeiten die Gleichstrommotoren bei generatorischer Fahrweise oder die Wirbelstrombremse direkt auf der Fahrseiltrommelwelle.

Die installierte Nachlaßvorrichtung wirkt formschlüssig auf die Seiltrommel und wird zum Regeln der Senkgeschwindigkeit des Bohrstrangs eingesetzt. Im Notfall kann mit der Nachlaßvorrichtung der Bohrstrang von Sohle gezogen werden.

Die Steuerung des Hebwerks erfolgt teilautomatisiert. Beschleunigungen oder Verzögerungen werden in Abhängigkeit von Hakenlast, Geschwindigkeit, Bohrlochkriterien und Stromaufnahme geregelt. Rechnergestützte Sicherungen gegen das Fahren des Klobens unter das Rollenlager oder auf den Drehtisch sind vorgesehen.

Die Leistungsübertragung der Antriebsmotoren erfolgt über zwei Vorgelegewellen auf die Hebewerkstrommelwelle. Vier Gangstufen sind schaltbar. Damit ist eine maximale Fahrseilgeschwindigkeit von 20,17 m/s und eine maximale Seilzugkraft in der 4. Seillage von 715 kN erreichbar. Durch die Möglichkeit der kurzzeitigen Momentenüberhöhung der Antriebsmotoren wird eine Annäherung der mechanischen Gangabstufung an die 4.000 PS-Leistungshyperbel erreicht.

3.3 Pipehandling

Bei der Tiefbohranlage kommen umfangreiche maschinelle Einrichtungen für das Pipehandling zum Einsatz.

Mit dem Haken-Retraktor-System wird eine Überlappung von Arbeitsgängen beim Ein- und Ausbau des Bohrgestänges dadurch erreicht, daß Haken und Kloben bei Auf- oder Abfahrt ohne Hakenlast außerhalb der Bohrlochachse gefahren werden. Beim Fahren mit Last lenkt das Haken-Retraktor-System wieder in die Bohrlochachse ein. Für die Gesamtzahl aller geplanten Roundtrips ergibt sich hiermit bei Einsatz von 36,5 m-Bohrgestängezügen eine Zeiteinsparung von ca. 100 Tagen (25 %) gegenüber dem konventionellen System.

Die Pipehandling-Maschine mit Ver- und Entschraubeinrichtung führt alle Bohrgestänge- oder Futterrohrtransporte zwischen Liftsystem, Abstellflächen und Bohrloch durch. Mit der Ver- und Entschraubeinrichtung werden die Gewindeverbindungen des Bohrstrangs ver- und entschraubt und gekontert bzw. gebrochen.

Erst durch die Kombination mit der Pipehandling-Maschine ist eine optimale Ausnutzung des Haken-Retraktor-Systems gegeben. Zusätzlich zwingen weitere technische, sicherheitliche und wirtschaftliche Gründe wie Materialschonung, Personaleinsparung und physische und psychische Beanspruchung der Bohrmannschaft zum Einsatz eines solchen Systems.

Der Bohrstrang wird mit fernbedienten Keilen abgefangen. In großen Teufen wird die Last nicht in Keilen abgefangen, sondern mit einem neu entwickelten Doppelevator-System. Dieses System ermöglicht zwar nur eine geringe Zeitersparnis, ist jedoch aus

Gründen der Materialschonung und des sicheren Betriebs bei großen Bohrstrang-Absetzlasten unbedingt notwendig.

Das Liftsystem wird während des Bohrens für den zugweisen Transport von Bohrgestänge zwischen Bohrgestängelager und Bohrturm eingesetzt. In Kombination mit einem Bohrstrang-Prüfzentrum und einer horizontalen Ver- und Entschraubvorrichtung im Bereich des Bohrgestängelagers können damit Bohrstranginspektionen rationell durchgeführt werden, ohne den Bohrbetrieb oder die wissenschaftlichen Arbeiten im Bohrloch zu behindern. Die dadurch erreichbare Zeiteinsparung beträgt ca. 120 Tage. Als zusätzliche maschinelle Einrichtungen können ggf. ein Kraftdrehkopf oder eine verlängerte Kellystange eingesetzt werden.

3.4 Energieversorgung

Die Verwendung der elektrischen Energie aus dem öffentlichen Netz gewährleistet einen wirtschaftlichen Energieeinsatz. Gegenüber einem dieselelektrischen Antrieb werden die Energiekosten um ca. 40 % gesenkt. Emissionen (Lärm, Abgase) wie bei dieselelektrischen Bohranlagen werden ausgeschlossen.

Die zum Betrieb erforderliche installierte elektrische Leistung beträgt ca. 8 MW. Davon entfallen ca. zwei Drittel auf die Versorgung der Hauptantriebe und ein Drittel auf die Nebenantriebe. Durch die beiden Diesellaggregate ist eine Notstromversorgung geschaffen, die schnell zur Verfügung steht und ein begrenztes Weiterarbeiten der Bohranlage und ihrer Hilfsantriebe erlaubt. Die Auslegung der Generatoren stellt sicher, daß auch der unter bestimmten Lastbedingungen große Blindleistungsanfall der Elektroantriebe gedeckt werden kann.

Die eingesetzten Gießharztransformatoren sind wartungsfrei, feuchtesicher, schwer brennbar und selbstverlöschend. Außerdem können sich bei Lichtbogeneinwirkung keine toxischen Gase bilden.

Die dynamische Kompensationsanlage, die direkt an die Mittelspannungsschaltanlage angeschlossen ist, reagiert sehr schnell auf Veränderungen der induktiven Blindleistung und garantiert damit eine Stabilisierung der Netzspannung und eine Verminderung von Spannungsverzerrungen. Der Einsatz von Gleichstromnebenschlusmotoren, die über Thyristorstromrichter an das Drehstromnetz angeschlossen werden, hat gegenüber frequenzgeregelten Drehstrommotoren große wirtschaftliche Vorteile. Mit der gewählten Antriebsart finden ausgereifte Motoren Verwendung, die in standardisierter Form seit langem in der Bohrinindustrie eingesetzt werden. Die Wahl der Motorkühlung mit geschlossenen Luft-/Wasserkühlern und Filtern stellt eine effektive Kühlart dar, die die Verschmutzungsgefahr reduziert und einen einfachen Explosionsschutz in der Zündschutzart "Überdruckkapselung" ermöglicht.

Beim Antrieb des Hebewerks ist durch Einsatz eines 4-Quadranten-Betriebs eine bremsende und treibende Fahrweise in beiden Fahrrichtungen gegeben. Damit können von der elektrischen Anlage Bremsenergien in das Netz zurückgespeist werden. Die unterbrechungsfreie Stromversorgung läßt den Anschluß von Niederspannungssystemen, deren Stromversorgung gesichert sein muß, zu. Der Anschluß von Datenspeicher- und kontinuierlichen Meßsystemen ist damit ermöglicht.

3.5 Spülungsanlage

Die Spülungsanlage ist speziell auf die Erfordernisse der KTB-Tiefbohrung zugeschnitten. Sie wird von einer zentralen Warte mit angeschlossenem Labor überwacht.

Der Auslauf der Spülung aus dem Bohrloch und die Auslaufrinne können offen oder geschlossen betrieben werden. Der Auslauf ist durch eine Stopfbuchse abgedichtet, um das Entweichen von Gasen zu verhindern. Die Auslaufrinne vom Bohrlochkopf zur Spülsaufbereitung ist über beidseitig angeordnete Laufstege zugänglich. Die Rinne wird aus zusammengeflanschten, austauschbaren Segmenten mit Meßwertaufnehmern gebildet. An die Auslaufrinne ist ein System zur verdampfungsfreien Rückkühlung der Spülung angeschlossen. Es arbeitet als indirektes Kühlsystem mit zwei Wärmetauschern, die alternierend betrieben werden. Als Kühlmedium wird Wasser verwendet. Die Rückkühlung des Kühlmediums erfolgt über Luftkühler. Der bei der Rückkühlung anfallende Wärmestrom wird zu Heizzwecken genutzt.

Die Tankanlage für Aktivspülung besteht aus dem Tank mit den Einrichtungen zur Spülsaufbereitung, dem Zwischentank und dem Saugtank. Zur Spülsaufbereitung sind zwei Tandem-Doppeldeck-Schüttelsiebe mit Sandabsetzkammern, ein Vakuumentgaser, ein Entsander und ein Entsilberer vorgesehen.

Der Zwischen- und der Saugtank weisen zusammen ein Volumen von 150 m³ auf. In den Saugtank ist der Piltank integriert.

Alle Tanks für Aktivspülung sind auf Beton-Schwellenfundamente aufgesetzt, mit Unter- und Überläufen versehen und über eine Spülungsrinne verbunden. Die Sauganschlüsse der Spülpumpen werden in den Tankboden verlegt. Damit ist eine variable Führung der Aktivspülung mit Umgehung einzelner Aufbereitungsstufen möglich.

Die Tankanlage für Reservespülung hat ein Nutzvolumen von 250 m³. Sie wird aus drei ebenfalls auf Betonschwellen aufgesetzten Einzeltanks gebildet. Die Tanks für Reservespülung sind wie die Tanks für Aktivspülung mit Rührwerken und Niederdruck-Unterflur-Spülungswirblern ausgestattet. Zusätzlich ist eine aus zwei Beton-Rundtanks à 700 m³ Inhalt bestehende Tankanlage für Spülung zu Meßzwecken vorgesehen. Die Tanks sind frostsicher ins Erdreich eingelassen. Einer der Tanks dient zur Speicherung einer feststofffreien Spülung zu Meßzwecken. Der andere

nimmt beim Einzirkulieren der Meßspülung in das Bohrloch die austretende Spülung auf. Eine Vermischung beider Spülungen wird ausgeschlossen und ein kontinuierlicher Betrieb erreicht. Die Rundtanks sind mit Rührwerken ausgestattet. Die Befüllung erfolgt über ein Rinnensystem, die Entleerung mit Transferpumpen. Die Spülungsfabrikation der Spülungsanlage besteht aus Lagerbehältern für pulverförmige und flüssige Zuschlagsstoffe und Additive, Dosier- und Transporteinrichtungen und einem runden Mischtank. Bei entsprechend vorgegebenen Rezepturen erfolgt das Anmischen von Spülung rechnergestützt.

Die hydraulische Leistung wird von zwei 1.600 PS-Triplex-Spülpumpen erbracht. Sie sind mit 350 bar-Standard-Wasserkörpern ausgerüstet. 500 bar-Hochdruck-Wasserkörper in Plunger-Ausführung sind beigelegt. Die Spülpumpen saugen bei geringen Hubzahlen direkt aus dem Saugtank. Bei größeren Hubzahlen wird der Saugvorgang durch Ladepumpen unterstützt. Für das Kernbohren kann eine weitere spezielle Spülpumpe installiert werden. Alle Einrichtungen der Spülungsanlage sind, mit Ausnahme der Tanks für die Spülung zu Meßzwecken und der vier Außensilos für Spülmittel, in einem dreiteiligen Gebäude untergebracht. Die Spülmittelaufbereitung steht unter einem Schleppdach. Durch die Überdachung der Spülungsanlage wird eine Kontamination mit Regenwasser ausgeschlossen, und die Arbeitsplatzbedingungen im Bereich der Spülungsanlage werden verbessert.

3.6 Meßtechnik und Datenerfassung

In das Konzept der Tiefbohranlage sind umfangreiche Meß- und Datenerfassungssysteme integriert. Die Systeme arbeiten rechnergestützt. Bohr- und anlagentechnische Daten werden ebenso wie wissenschaftliche Daten mit Meßwertaufnehmern ermittelt und über einen Zentralrechner weiterverarbeitet, d. h. angezeigt, gespeichert oder zur Analyse genutzt.

3.7 Technische Daten der KTB-Bohranlage

Bohrturm

Gesamthöhe	75,0 m
Freie Höhe über Arbeitsbühne	60,0 m
Höhe der Arbeitsbühne	11,0 m
Freie Unterbauhöhe	9,6 m
Hakenregellast	5.500 kN
Hakenausnahmelast	8.000 kN
Drehtischträgerlast	8.000 kN
Abstelllast	8.000 kN + 5.500 kN oder
(gleichzeitig wirkend)	6.000 kN + 2 x 5.500 kN

Hebewerk

Eingangsleistung	2.940 kW (4.000 PS)
Anzahl der Antriebsmotoren	4
Anzahl der Gänge	4

Seil	1 3/4"-EIPS
Fassungsvermögen der Seiltrommel	660 m
Anzahl der Wickellagen	4
Breite der Seiltrommel	2,3 m
Seilzugkraft in der 2. Wickellage	828 kN
Max. Fahrgeschwindigkeit	20,17 m/s

Drehtisch

Drehtischlast	5.500 kN
Drehtischlast (nach oben)	2.500 kN
Eingangsleistung, max.	550 kW
Drehzahl	0 - 330 U/min.
Drehmoment, max.	40.000 Nm
Drehtischdurchgang	27 1/2"

Pipehandling

Pipehandling-Maschine	Handhabung von bis zu 40 m langen Bohrgestängezügen
Ver- und Entschraubungsvorrichtung Liftsystem	im Bohrturm und auf dem Gestängelager für den Transport von bis zu 8 Bohrgestängezügen zwischen Gestängelager und Bohrturm

Energieversorgung

Installierte Leistung	8 MW, elektrisch aus dem öffentlichen Netz
Leistung für Notbetrieb	1.600 kW (Dieselgeneratoren)

Spülungsanlage

Spülpumpen-Typ	TRIPLEX TPK 7" x 12"
Anzahl der Spülpumpen	2 (3)
Max. Eingangsleistung je Pumpe	1.193 kW
Hydraulische Leistung der Spülpumpen mit 350-bar-Wasserkörpern	254 bar; 5.066 l/min.
Hydraulische Leistung der Spülpumpen mit 500-bar-Wasserkörpern	513 bar; 2.508 l/min.
Volumen der Tankanlage für Aktivspülung	150 m ³
Volumen der Tankanlage für Reservespülung	250 m ³
Volumen der Tankanlage für Spülung zu Meßzwecken	2 x 700 m ³
Volumen des Pilltanks	8 m ³
Volumen des Triptanks	8 m ³
Fläche des Schüttelsiebes	6 m ²
Kapazität des Vakuumentgasers	3.800 l/min.
Kapazität des Entsanders	5.700 l/min.
Kapazität des Entsilfers	4.500 l/min.

4. Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage

Um die Besonderheiten der KTB-Bohranlage mit einer für die Aufsuchung von Kohlenwasserstoffen üblichen Bohranlage zu vergleichen, wurde eine Gegenüberstellung ausgearbeitet. In ihr sind die wichtigsten Kriterien für die Beurteilung einer Bohranlage angeführt. Ein Vergleich der Bohranlagenkomponenten schließt sich an. Zusätzlich sind im tabellarischen Vergleich die Auswirkungen der Neuerungen bei der KTB-Konzeption hervorgehoben. Die Auswirkungen werden teilweise durch Zeit- oder Kosteneinsparungen quantifiziert. Im einzelnen ergeben sich im Vergleich zu einer Standard-Bohranlage durch reduzierten Personaleinsatz Einsparungen von ca. DM 7,2 Mio DM. Weiterhin lassen sich bei

Roundtrips	65 Tage
Bohrstranginspektionen sowie durch höhere Hebewerksleistung	120 Tage
Haken-Retraktor-System	24 Tage
bis zu 80-t-Seilgebinde	100 Tage
insgesamt	<u>14 Tage</u> 323 Tage

einsparen.

Einschließlich der geringeren Personalkosten führt dies im Vergleich zu einer Standard-Bohranlage bei einem angenommenen Tagessatz von 30.000 bis 50.000 DM zu Betriebskosteneinsparungen zwischen 16,9 Mio und 23,4 Mio DM.

4.1 Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage anhand wichtiger Kriterien

Kriterium	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Bohranlage	konzipiert für stationären Forschungsbetrieb	konzipiert für Kurzeiteinsatz und häufige Umbauten. Einsatz für das Abteufen von Bohrungen zum Aufsuchen und Gewinnen von Kohlenwasserstoffen	<ul style="list-style-type: none"> - funktionelle und räumliche Trennung zwischen Geowissenschaft und Bohrtechnik - optimal für die Gewinnung von Bohrkernen und die Durchführung von Bohrlochmessungen - Führung von Besuchergruppen ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebs
Gebäude	Einrichtungen in Gebäuden untergebracht	Einrichtungen im Freien oder in Containern untergebracht	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Umweltbelastungen durch Vermeidung von Emissionen und Verunreinigung von Regenwasser - besserer Schallschutz - bessere und sicherere Arbeitsplatzbedingungen - Einpassung in das Landschaftsbild besser möglich - Schutz der Einrichtungen, dadurch geringere Instandhaltungskosten - erhöhte Frostsicherheit
Teufenkapazität	15.000 m	6.000 - 9.000 m	- Die KTB-Anlage ist speziell für dieses Projekt konzipiert.
Betriebsdauer	8 Jahre Weiter Nutzung als Tiefenlabor	1 bis 2 Jahre pro Bohrung	<ul style="list-style-type: none"> - feste Einrichtungen möglich, Gebäude - optimaler Witterungsschutz - auf das Projekt abgestimmte Arbeitsplatzbedingungen
Personalbedarf	22 Personen	31 Personen	- Einsparung von ca. 7,2 Mio DM

4.2 Vergleich der KTB-Bohranlage mit einer Standard-Bohranlage anhand wichtiger Anlagenkomponenten

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Bohrturm	stationärer Bohrturm, verschraubte Konstruktion, vollverkleidet	transportabler Bohrmast, verbolzte Konstruktion, Verkleidung nur im Bereich der Arbeitsbühne	<ul style="list-style-type: none"> - stationärer Bohrturm ermöglicht großzügige bauliche Anpassung an Erfordernisse der Wissenschaft und der Bohrtechnik, transportable Ausführung zwingt zu Kompromissen - kein Verschleiß, da geschraubte und geschweißte Verbindungen (Bolzenverbindungen neigen zum Ausschlagen) - Vollverkleidung bietet optimalen Witterungs-, Umwelt- und Schallschutz
Bohrgerüst	freie Gerüsthöhe 60 m, geeignet für 40 m-Bohrgestängezüge und Kraftdrehkopf	freie Masthöhe ca. 45 m, geeignet für 27,4 m-Bohrgestängezüge, bedingt für Kraftdrehkopf geeignet	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz längerer Züge und damit für die vorgegebenen Roundtrips Zeiteinsparungen von 65 d (entsprechen bei einer Tagesrate von 30.000-50.000 DM einer Einsparung von 2-3,3 Mio DM) - Kraftdrehkopf gestattet kontinuierliches und sicheres Bohren
	Personenaufzug	Unterbautreppe/Mastleiter	<ul style="list-style-type: none"> - schneller, sicherer Aufstieg, keine Ermüdung des Personals - gefahrlose Führung von Besuchergruppen möglich
	Zwei 40 m hohe Öffnungen mit fernbetätigten Schiebetoren	eine Mastöffnung, manuell zu betätigende Tore	<ul style="list-style-type: none"> - auch bei Einsatz einer Pipehandling-Maschine ist der freie Zugang durch die zweite Öffnung gegeben - Kernrohrtransport ist jederzeit ungehindert möglich - sicheres Öffnen und Schließen der Tore
	Basismaß 12,5 x 12,5 m, steht bis über Fingerbühne zur Verfügung	Basismaß 10 x 10 m, nach oben verjüngt	<ul style="list-style-type: none"> - 50 % mehr Raum im Bohrgerüst - zwei Fingerbühnen mit Umlaufbühnen finden Platz - Eckstiele des KTB-Bohrgerüsts geben die gesamte Fläche der Arbeitsbühne zur Nutzung frei
Unterbau	Stationärer Unterbau als verschraubte Konstruktion vollverkleidet, frei zugängliche Bauweise	transportabler Unterbau, als verbolzte offene Konstruktion für den Auf-, Abbau und Transport konzipierte, verschachtelte Bauweise	<ul style="list-style-type: none"> - einfache, wirtschaftliche Bauweise, kein Ausschlagen der Bolzenverbindungen während des Betriebes - Installation des Hebewerks im Unterbau möglich - im Unterbau lassen sich in geschütztem Raum Spülrückkühlung, Triptank, Arbeitsbühnen für Preventeraufbau etc. unterbringen - sichere Handhabung der Preventer

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Arbeitsbühne	156 m ² Arbeitsfläche	100 m ² Arbeitsfläche	<ul style="list-style-type: none"> - 50 % mehr Fläche auf der Arbeitsbühne - Abstellkapazität für zwei komplette Bohrstränge - keine Einschränkung der Arbeitsbereiche für wissenschaftliche und bohrtechnische Aktivitäten - gegenseitige Beeinträchtigungen und Gefährdungen werden vermieden
	Hebewerk im Unterbau	Hebewerk auf Arbeitsbühne	<ul style="list-style-type: none"> - keine Verringerung der Arbeitsbühnenfläche durch Hebewerk - geschützte Unterbringung des Hebewerks - geringerer Schallpegel auf der Arbeitsbühne - geringere Lärmbelastigung der Umwelt und weniger Körperschall durch Schallabsorption im Erdreich
	zwei Doghouses	ein Doghouse	<ul style="list-style-type: none"> - großzügige Platzverhältnisse für Wissenschaft und Bohrtechnik
	Anordnung der Fahrerkanzel mit direktem Blick auf Haken, Drehtisch, Fingerbühnen und Pipehandling-Maschine	Fahrseil und Haken seitlich neben Fahrstand	<ul style="list-style-type: none"> - gute Übersicht
Hebewerk	Hebwerksleistung 4.000 PS	Hebwerksleistung 3.000 PS	<ul style="list-style-type: none"> - Zeiteinsparungen ca. 24 Tage (entsprechen bei einer Tagesrate von 30.000 - 50.000 DM einer Einsparung von 0,7 - 1,2 Mio DM) durch bessere Beschleunigungen und höhere Hakengeschwindigkeiten unter Last
	Hebewerk ferngesteuert	Hebewerk direkt gesteuert	<ul style="list-style-type: none"> - Fernsteuerung gewährleistet Feinfühligkeit bei Servowirkung - Servowirkung ermöglicht auch bei Abrieb der Reibbeläge die erforderlichen Bremskräfte der Haltebremse
	Steuerung teilautomatisiert und rechnergestützt	Steuerung manuell	<ul style="list-style-type: none"> - günstige Beschleunigungs- und Verzögerungswerte auch bei häufigen und langen Roundtrips - Zeit- und Sicherheitsgewinn - Begrenzungen der Stromspitzen möglich
	Nachlaßvorrichtung formschlüssig	Nachlaßvorrichtung reibschlüssig	<ul style="list-style-type: none"> - die formschlüssige Nachlaßvorrichtung ermöglicht geräuscharmen Betrieb - im Notbetrieb Heben der Hakenregellast möglich

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Hebewerk	Zusatzbremse durch generatorischen Betrieb der Antriebsmotoren	kein generatorischer Betrieb, da im allgemeinen von Dieselaggregaten angetrieben	<ul style="list-style-type: none"> - Zusatzbremse wirkt energiesparend - neben der generatorischen steht eine zweite Zusatzbremse zur Verfügung und erhöht somit die Sicherheit
	Notbremse	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - federbelastete Notbremse erhöht die Sicherheit
	Fahrseiltrommelbreite ca. 2.300 mm	Fahrseiltrommelbreite ca. 1.570 mm	<ul style="list-style-type: none"> - bei Verwendung von 36,5 m-Bohrgestängezügen erhöht sich die eingesicherte Seillänge gegenüber 27,4 m-Zügen um ein Drittel. Die verlängerte Fahrseiltrommel erhöht das Fassungsvermögen um 46 % und ermöglicht den Betrieb in einer wirtschaftlichen Seillage - hohe Zugkraft durch niedrige Seillage
	Antrieb reversierbar	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - motorisches Beschleunigen der Massen begünstigt die Abfahrt des leeren Hakens (Zeiteinsparung)
Hebesystem	Klobenführung mit Haken-Retraktor-System	freier Kloben	<ul style="list-style-type: none"> - Haken-Retraktor-System ermöglicht für 36,5 m-Züge 100 Tage Zeiteinsparung für alle Roundtrips (entsprechen bei einer Tagesrate von 30.000 - 50.000 DM einer Einsparung von 3 - 5 Mio DM)
	Fahrseil 1 3/4" in bis zu 80 t-Gebinden	1 1/2" - 1 5/8" als ca. 20 t-Gebinde	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der totalen Verschnittlänge, dickeres Seil muß weniger häufig nachgenommen und gekürzt werden, dadurch Zeiteinsparungen bis zu 14 Tagen (entsprechen bei einer Tagesrate von 30.000 - 50.000 DM einer Einsparung von 0,4 - 0,7 Mio DM)
Drehtisch	Standardausführung, API-Anforderungen übertreffend	Standardausführung API gemäß	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte zulässige Drehtischlast von 5.500 kN - Beanspruchung von unten möglich mit 2.500 kN - geräuscharmer Betrieb durch Bogenverzahnung
Pipehandling-Maschine	Einsatz einer Pipehandling-Maschine in beiden Abstellbereichen möglich, Pipehandling-Maschine mit Ver- und Entschraubeinrichtung, Be- und Entladen des Liftsystems möglich	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - Materialschonung, automatische Kontrolle der eingegebenen Verschraubmomente, Entlastung des Personals, Handhabung auch von 40 m-Bohrgestängezügen, Personaleinsparung - Entlastung des Bohrlochs von Nebenarbeiten - erhöhte Arbeitssicherheit

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Rohr- und Gestängelager	Separates Rohr- und Gestängelager mit Rutschen	gemeinsames Rohr-/ Gestängelager mit Rutsche	<ul style="list-style-type: none"> - größere Kapazität und Flexibilität für den Transport zwischen Turm und Lager - Separates Rohrlager vermeidet Blockierung des Gestängelagers vor und während des Rohreinbaus
	Gestängelager mit Ver- und Entschraubeinrichtung	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - Züge werden auf dem Lager formiert und nicht im Bohrloch - keine Blockierung des Bohrlochs - Zeiteinsparung für Bohrstranginspektionen ca. 120 Tage (entsprechen bei einer Tagesrate von 30.000 bis 50.000 DM einer Einsparung von 3,6 - 6 Mio DM)
	Bohrstrang-Prüfzentrum	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - witterungsgeschützter Arbeitsplatz, sicheres Prüfergebnis
Liiftsystem	Transport zwischen Gestängelager und Bohrgerüst mit Liftsystem für 40 m-Bohrstränge	Transport mit Seilwinden über Rutsche	<ul style="list-style-type: none"> - Liftsystem ermöglicht den Transport ganzer Bohrsträngezüge zwischen Turm und Lager - rationelle Bohrstranginspektion ohne Beeinträchtigung der Bohr-, Kern- und Meßtätigkeit
Doppel-Elevator-System	Doppelelevatoren bei hohen Stranglasten in Verbindung mit Dualschulter-Bohrsträngeverbindern	Wechselelevatoren bei hohen Stranglasten	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Arbeitssicherheit - kein Wechsel und Umschlagen der Elevatorbügel erforderlich - Zeitersparnis - Fernbetätigung der Elevatoren problemlos möglich - gedämpftes Abfangen des Bohrstrangs
Energieversorgung	Direktanschluß an 20 kV-Mittelspannungsnetz mit dyn. Blindstromkompensation und Energierückspeisung Rechnerüberwachung zur Vermeidung von Stromspitzen	dieselektrischer Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> - 40%ige Energiekosteneinsparung durch Bezug aus öffentlichem Netz - Ausschaltung von Emissionen (Lärm, Abgase) - geringere Investitionen und Wartungskosten
	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - gesicherter Betrieb von Datenspeichern und Meßgeräten
Spülungsanlage	geschlossener Auslauf, geschlossene Auslaufrinne sektionsweise austauschbar, mit zwei Begleitlaufstegen in geschlossener Brücke	offener Auslauf, offene Auslaufrinne oder geschlossenes Auslaufrohr	<ul style="list-style-type: none"> - geschlossener Auslauf ermöglicht Probenahme ohne Luftzutritt - Begleitstege in geschlossener, überdachter Brücke ermöglichen Zugang zu den Meßeinrichtungen in der Auslaufrinne

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Spülungsanlage	Spülungsrückkühlung mit Wärmetauschern	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - Spülungsrückkühlung kontinuierlich, verdampfungsfrei möglich - Nutzung der Abwärme zu Heizzwecken
	Triptank im Unterbau	Triptank neben Unterbau	<ul style="list-style-type: none"> - geschützte, frostsichere Anordnung
	Tankanlage in Halle untergebracht, Halle belüft- und beheizbar	offene Tankanlage im Freien	<ul style="list-style-type: none"> - Schutz vor Umwelteinflüssen ist gegeben - Verschmutzung der Umwelt wird vermieden - keine Kontaminierung des Regenwassers - frostsicher - keine Verdünnung der Spülung durch Regenwasser
	Tanks für stationären Einsatz mit glatten Böden auf Schwellenfundamenten gelagert, Leitungsführung außerhalb des Tanks	mobile Tanks mit Ölfeldschlitten auf Fundamentplatte, Leitungsführung weitgehend innerhalb der Tanks	<ul style="list-style-type: none"> - Aufstellung und glatte Böden ermöglichen Zusatzkühlung durch bessere Umströmungen und gestatten die Installation der Sauganschlüsse in den Boden, dadurch Nutzung des max. Tankvolumens, verbesserte Zugänglichkeit, bessere Reinigungsmöglichkeit, wartungsfreundlicher - keine Behinderung der Verwirbelung durch Einbauten
	Spülsaufbereitungsanlage auf separatem Tank	Spülsaufbereitung auf Tanks	<ul style="list-style-type: none"> - gesonderte Anordnung ergibt größere Flexibilität für den Einsatz von Spülsaufbereitungsaggregaten
	Siebfläche mehr als 6 m ² , zwei Absetzkammern	Siebfläche kleiner, einfache Absetzkammer	<ul style="list-style-type: none"> - große Siebfläche ermöglicht feinere Abscheidung, zwei Absetzkammern gewährleisten kontinuierlichen Betrieb
	Zusatztankanlage für feststofffreie Flüssigkeit zu Meßzwecken als Erdtanks	nicht üblich	<ul style="list-style-type: none"> - Austausch der Spülung gegen eine feststofffreie Flüssigkeit ohne gegenseitige Vermischung möglich - erhöhte Frostsicherheit
	Spülungsfabrikation mit Misch tanks, teilautomatisierten Dosiereinrichtungen in Spülungshalle, Silos an der Spülungshalle, zentrale Mischstation und Spülungswarte mit Labor	einfache Spülungsfabrikation im Freien	<ul style="list-style-type: none"> - staubfreie Handhabung - Belastung der Umwelt und des Personals wird vermieden - gesonderter Mischtank erhöht die Effizienz und ermöglicht schnelles Anmischen großer und kleiner Mengen - Personalbedarf gering - Integration Spülungsüberwachung/Labor und Fabrikation

Komponente	KTB-Konzeption	Standardausführung	Vorteile der KTB-Konzeption
Spülpumpen	Triplex-Ausführung mit Standardwasserkörpern bis 350 bar und Hochdruck-Wasserkörpern bis 500 bar, Steigleitung und Spülkopf für 500 bar, zentrales Kühlsystem für Zylinderbuchsen	Triplex- oder Duplex-Ausführung mit Standardwasserkörpern, Steigleitungen und Spülkopf für max. 350 bar, jede Pumpe separates Kühlsystem	<ul style="list-style-type: none">- Druckstufe 500 bar erreichbar- bessere Kühlung durch Filter und größere Wassermenge, geringerer Verbrauch von Zylinderbuchsen und Kolbenmanschetten
Meßtechnik	Datenerfassung und -verarbeitung rechnergestützt	Datenerfassung nicht rechnergestützt, Datenverarbeitung nur begrenzt möglich	<ul style="list-style-type: none">- erhöhte Betriebssicherheit- zentrale Erfassung aller Daten- Rechnerunterstützung verbessert die Auswertbarkeit und Dokumentation der Meßwerte und Daten- bessere Datenüberwachung- Datenfernübertragung wird vereinfacht- Früherkennung von veränderten Bohrlochbedingungen

DEUTAG
Deutsche Tiefbohr AG

Postfach 75
4444 Bad Bentheim

Entwicklung eines Konzeptes zum Umbau und zur
Optimierung einer bestehenden Bohranlage
entsprechend den besonderen Anforderungen
des kontinentalen Tiefbohrprogramms

Preussag AG
Siemens AG
Wintershall AG

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Konzeptstrategie.....	392
2. Die Bohranlage im Überblick.....	394
2.1 Bohrturm und Unterbau.....	394
2.2 Das Spülungssystem.....	396
2.3 Die Energieversorgung.....	397
3. Die technischen Besonderheiten der Bohr- anlage.....	399
3.1 Das Hebewerk.....	399
3.2 Zuglängen und Roundtripzeiten.....	400
3.3 Das vollautomatische Pipehandlingsystem.....	401
3.4 Das Bohrgestängeaufnahme- und Ablegesystem.....	406
3.5 Drilling Instrumentierung (DIS) und Automatisierung.....	410
4. Umweltschutz und Sicherheit.....	415

**"ENTWICKLUNG EINES KONZEPTES ZUM Umbau UND ZUR OPTIMIERUNG
EINER BESTEHENDEN BOHRANLAGE ENTSPRECHEND DEN BESONDEREN
ANFORDERUNGEN DES KONTINENTALEN TIEFBOHRPROGRAMMS (KTB)"**

Die Ergebnisse des Forschungsberichtes AZK/3-RG 86040, erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft Deutag-Bad Bentheim (Federführer), Preußag-Berkhöfen, Siemens-Erlangen und Wintershall-Kassel werden nachstehend in einer Kurzfassung wiedergegeben:

1. KONZEPTSTRATEGIE

Die derzeit schwerste Tiefbohranlage in Europa, die DEUTAG-Anlage T-47 (Continental Emsco C-3 Hebewerk) verfügt über eine maximale Zugkraft am Haken von 8900 KN. Der Bohrturm hat eine Abstellkapazität für 9000 m Bohrgestänge, die für das Abteufen von übertiefen Bohrungen zur Kohlenwasserstoff-findung ausgelegt ist. Die KTB-Projektleitung hat als Eckdaten zum Abteufen einer 14000-m-Bohrung eine Hakenausnahmelast von 8000 KN und eine Abstellkapazität von mindestens 14000 m Bohrgestänge gefordert.

Dem Konzept zum Umbau und zur Optimierung der Bohranlage T-47 für dieses Projekt, liegen die folgenden Überlegungen zugrunde:

1. Aus Gründen einer Kostenreduzierung und einer erhöhten Zuverlässigkeit sollen dort wo es sinnvoll ist, im lang-jährigen Einsatz bewährte und austauschbare Elemente der Tiefbohrtechnik eingesetzt werden.
2. Die Prämisse ist ein technisch abgesichertes und wirtschaftlich günstiges Erreichen der vorgesehenen Endteufe.
3. Neuentwicklungen werden in den Bereichen angestrebt, die eine wesentliche Reduzierung von Projektzeit und -kosten sowie eine Erhöhung der wissenschaftlichen Ausbeute gewährleisten.
4. Besonderes Augenmerk wird auf die Bereiche Arbeitssicherheit, optimale Arbeitsplatzgestaltung, Umweltschutz und Langzeiteinsatz der Bohreinrichtungen gelegt.

5. Aus der Verwendung vorhandener und in der Tiefbohrindustrie bewährter Ausrüstungen resultiert eine rasche Verfügbarkeit der Anlage sowie eine Reduzierung der Investitionskosten.

Die als Ergebnis der Studie vorgestellte Bohranlage unterscheidet sich von herkömmlichen durch eine weitgehende Automatisierung, die über alles bisher vorhandene hinausgeht, durch eine optimale Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Leistungen, die die Stillstands-Zeiten, in denen nicht gebohrt werden kann auf ein Mindestmaß reduzieren, durch eine Sensorik, die eine optimale Erfassung und datentechnische Verarbeitung der Bohr- und Spülungsdaten gewährleistet sowie durch eine kostengünstige und wirtschaftliche Energiehaushaltung.

Die einzelnen Baugruppen der Bohranlage sind so gestaltet, daß in ihnen bewährte Konstruktionsprinzipien mit zweckmäßigen, den besonderen Anforderungen des Projektes dienenden Neuerungen kombiniert sind.

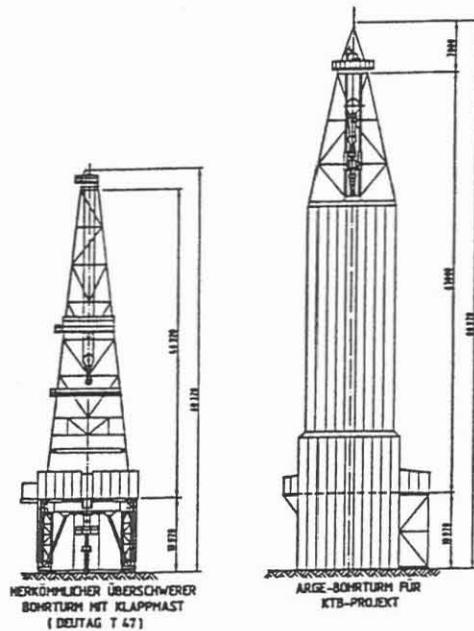


Abb. 1 zeigt die konzipierte KTB-Anlage im Vergleich zu der Bohranlage DEUTAG T-47

2. DIE BOHRANLAGE IM ÜBERBLICK

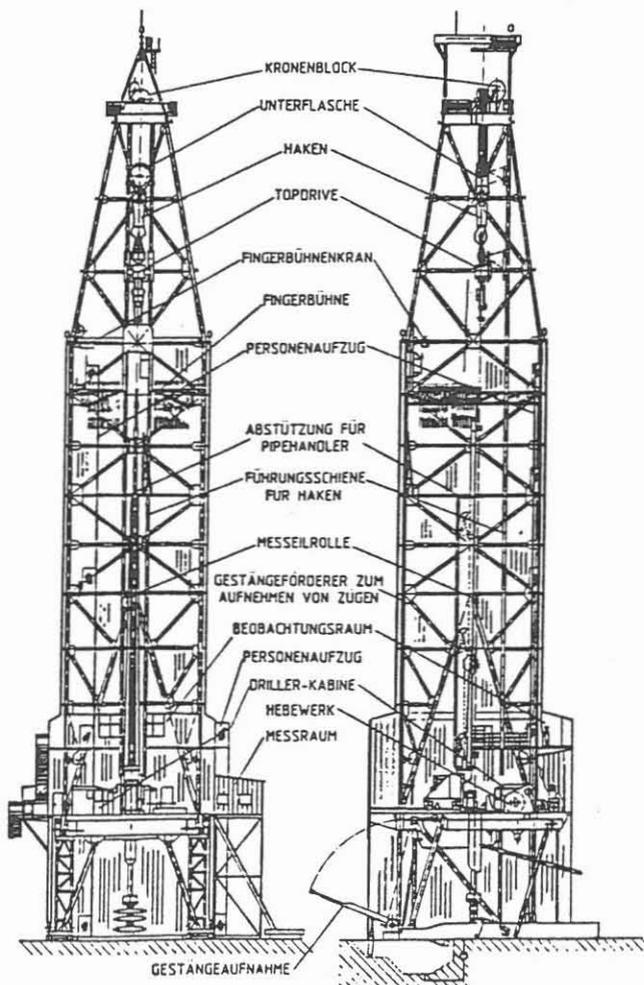
2.1 Bohrturm und Unterbau

Bei der Konstruktion des Klappmastes der Bohranlage T-47 lagen die folgenden Überlegungen zugrunde:

- Aufnehmen großer Hakenlasten
- große Mobilität bezüglich Montierbarkeit und Transportfähigkeit des Mastes

Der für die kontinentale Tiefbohrung konzipierte Bohrturm muß insbesondere den folgenden Anforderungen genügen:

- Aufnehmen großer Hakenlasten
- Unterbringung extra langer Gestängezüge in großer Anzahl
- Stationärer Einsatz über einen langen Zeitraum hinweg
- Einbau eines vollautomatischen Pipehandling Systems und Unterbringung eines Kraftdrehkopfes



Diese Anforderungen führten zur Konzeption eines Bohrturmes, der in Abbildung 2 in zwei Seitenansichten dargestellt ist.

Abb. 2: Bohrturm-Übersicht

Der neu konzipierte Bohrturm mit dem Eckstielmaß 12,192 m x 12,192 m ist auf den vorhandenen 10,970 m hohen Unterbau der Bohranlage T-47 montiert. Unterflasche, Haken und Kraftdrehkopf sind über ein Rückhaltesystem (Retraktor) an Führungsschienen geführt. Zu beiden Seiten der Bohrlochmittellinie ist genügend Fläche zum Abstellen von zwei kompletten Bohrsträngen von 14.000 m Länge vorgesehen. Während des Bohrens kann der zweite Bohrstrang für den Einsatz vorbereitet, (überprüft) und in den Bohrturm gestellt werden.

Das Kernstück der Bohrturmeinrichtung ist ein vollautomatisches Pipehandling System, bestehend aus Pipehandler, Verschraubeinrichtung und verfahrbaren Setback- und Fingerbühnenwagen. Der Pipehandler ist verfahrbar auf der Arbeitsbühne angeordnet (Abbildung 3), führt die Routinearbeiten, wie beispielsweise das Ausbauen bzw. das Einbauen des Gestänges jedoch stationär aus.

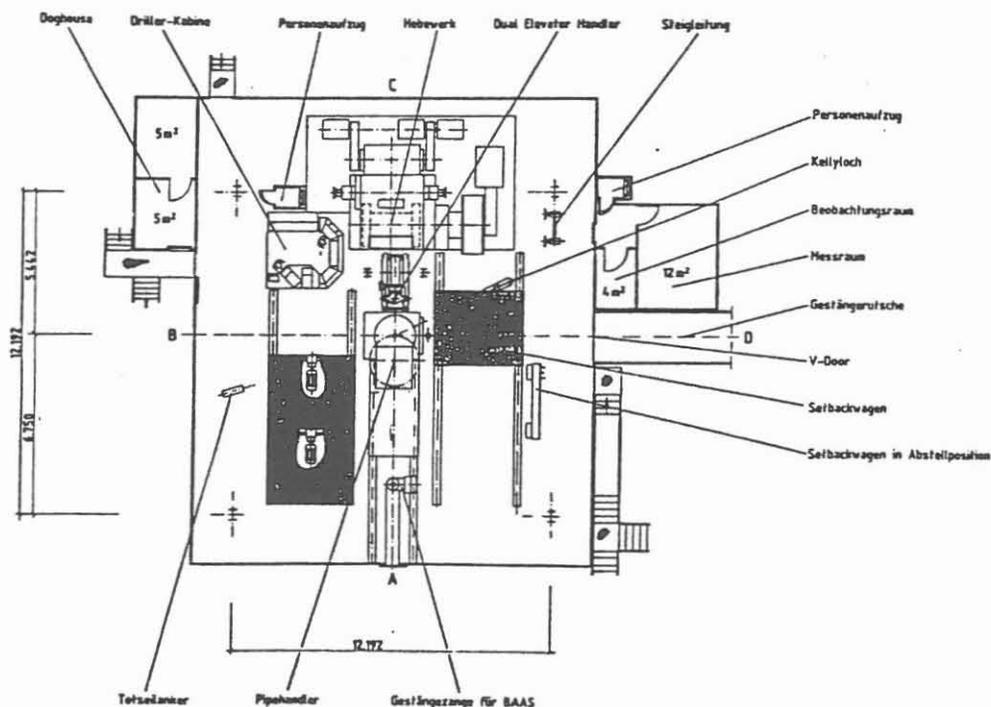


Abb. 3: Bohrturm - Arbeitsbühne

Auf der Seite hinter dem Pipehandler befindet sich eine Vorrichtung mit deren Hilfe das Bohrgestänge, aber auch die Kernrohre, in den Turm genommen bzw. aus diesem herausgelegt werden können.

Dieses Gestängeaufnahmesystem besteht aus einem schwenkbaren Mauselloch, einer Einschubvorrichtung, einem Hubmechanismus mit Greifarm (Zahnstangenförderer) und einer Verschraubeneinrichtung.

Weiterhin sind über der Fingerbühne ein Portalkran und an der Turmseite ein Personenaufzug angebracht. Auf der Arbeitsbühne sind das Hebewerk und der Leitstand für den Schichtführer und den Pipehandler-Operator installiert. Auf zwei gegenüberliegenden Seiten befinden sich ein Raum für die Bohrtechnik und ein Raum für die Wissenschaften. In erhöhter Position über dem Hebewerk ist ein weiterer Raum für die Wissenschaften und für Besucher vorgesehen. Arbeitsbühne und Beobachtungsraum können über Personenaufzüge und Treppen erreicht werden.

Bei der Konzipierung dieser Anlage wurde Wert darauf gelegt, daß trotz eines hohen Automatisierungsaufwandes der Bohrtätigkeit ein konventioneller, d. h. manueller Ablauf der Arbeiten möglich ist. Dieses ist aufgrund der besonderen Anordnung der Gestängeabstellflächen (verfahrbar) und trotz der wesentlich größeren Massen der zu bewegenden Gestängezüge möglich, wie im Abschnitt Pipehandling noch eingehender erläutert werden wird.

Die Anordnung der automatischen Gestängehandhabung, der Gestängeaufnahmevorrichtung und der Rutsche zum Aufnehmen und Ablegen von Futterrohren, Schwerstangen, Meßgeräten usw. beeinflussen die Gestaltung des Bohrplatzes im Bereich der Gestänge- und Futterrohrlager. Diese sind in einem rechten Winkel zueinander angeordnet. Für die Futterrohre ist auf dem Bohrplatz ein großes Lager vorgesehen - der längste Futterrohrstrang wird wahrscheinlich der 9 5/8" Casing-Strang mit ca. 10.000 m Länge sein - da dieses Lager jedoch nur während einer sehr kurzen Zeit der Gesamtbohrzeit benötigt wird, soll es erweiterungsfähig und demontierbar sein.

2.2 Das Spülungssystem

Die Auslegung des Spülungssystems wird durch mehrere Faktoren maßgeblich beeinflusst:

- Da die Bohrung ausschließlich wissenschaftlichen Zwecken dient, kommt dem Informationsträger Spülung eine besondere Bedeutung zu.

Am Spülsausrlauf befindet sich eine Meßstrecke, in der alle für die Wissenschaften relevanten Daten erfaßt werden können. Ein wesentlicher Aspekt ist, daß die Spülung und die in ihr enthaltenen Informationen aus den durchbohrten Formationen (z. B. Gasanteile) frühzeitig gemessen und analysiert wird, bevor Meßwertveränderungen eintreten. Die interessierenden Werte der in das Bohrloch gepumpten Spülung werden am Saugtank bzw. in der Druckleitung erfaßt.

- Die Feststoffkontrolle und die nachfolgende Spülsausrarbeitung ist darauf ausgelegt, ein 100 %iges Erfassen des Bohrkleins zu gewährleisten.
- Die Pumpen und das Druckleitungssystem werden den jeweils gegebenen Bedingungen angepaßt bzw. mit fortschreitendem Bohrfortschritt modifiziert. Die Hochdruckpumpen sind zunächst auf 350 bar max. Arbeitsdruck ausgelegt und werden nach Erreichen einer Bohrlochteufe von ca. 8.000 m durch Austauschen der Wasserteile auf 500 bar umgerüstet. Damit werden auch die Pumpraten bei kleiner werdendem Bohrdurchmesser und beim Kernen angeglichen. Die bereits vorhandenen Spülpumpen vom Typ National 12-P-160 können die genannten Anforderungen erfüllen.
- Zum Lagern der Reservespülung steht eine ausreichende Zahl an Hochtanks zur Verfügung, die nach Bedarf erweitert werden kann.
- Beim Erreichen größerer Teufen wird Erdwärme in großer Menge in der Spülung anfallen. Bereits ab einer Bohrteufe von ca. 4.000 m reicht sie aus, um an der Betriebsstelle genutzt zu werden. Es ist vorgesehen, Raumheizungen und die Temperierung der Reserve- und Meßspülung aus der Spülungswärme zu betreiben.

Der Einsatz eines Spülungskühlers am Auslauf ist nur dann vorgesehen, wenn es notwendig wird. Modellberechnungen haben gezeigt, daß bei Erreichen der Endteufe die Temperatur am Spülsausrlauf unter 100° C liegen wird.

2.2 Die Energieversorgung

Der langjährige Einsatz der Bohranlage auf der Lokation verlangt die Vorteile einer Energieversorgung aus dem Netz zu nutzen.

- Die Umwelt wird nicht durch Abgase und Lärm belastet.
- Durch günstige Energiepreise können Kosten gespart werden.
- Der Wartungsaufwand wird reduziert und es ergibt sich die Möglichkeit der Energierückspeisung.

Die maximal auftretende Dauerleistung für die gesamte Lokation wird auf 6-8 MVA veranschlagt, wobei 5-6 MVA auf die Bohranlage entfallen. Der Blindlastanteil muß sehr hoch angesetzt werden. Durch die Blindleistungskompensationsanlage kann ein Gesamt-cos-phi von ca 0,55 auf etwa 0,9 gebracht werden, wodurch sich der Leistungsbedarf von etwa 7.000 KVA auf 4.500 KVA reduzieren wird.

Damit Verzerrungen der Netzspannungen durch Stromrichter gespeiste Antriebe unterdrückt werden, wird eine Oberschwingungskompensation installiert. Für den Fall eines Stromausfalles muß gewährleistet sein, daß das Bohrwerkzeug bei verminderter Zirkulationsrate von Sohle gezogen werden kann und daß andere wichtige Verbraucher in Betrieb bleiben. Dafür ist eine Notstromversorgung vorgesehen, die insgesamt 2.400 kW erzeugen kann.

Für die Sicherung von Daten und Automatisierungseinrichtungen während einer Stromunterbrechung ist eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) vorgesehen.

Das Konzept der elektrischen Ausrüstungen ermöglicht Energierückgewinnung aus mechanischer Absenkenergie durch Umwandlung in elektrische Energie beim Hebewerksbetrieb. Die Hebewerksmotoren gehen dabei in generatorischen Betrieb über und wirken als elektrische Bremse.

Die Möglichkeiten und die Bedingungen der Energierückspeisung in das Netz sind mit dem zuständigen EVU zu klären. Die Energieverteilung erfolgt von einer 20 kV Schaltanlage, die die folgenden Komponenten enthält:

Zwei Einspeisetransformatoren (20 kV / 660 V),
Hauptschaltanlage, 660 V - 50 Hz zur Versorgung
der Stromrichtanlage und aller Drehstrommotore,
Blindleistungs- und Oberschwingungskompensation,
Schaltanlage für Stromrichteranlagen,
Notstromgeneratoren,
Verteilungsanlage für Drehstrommotoren
380/220 V - Ebene für Lichtkreise und Kleinver-
braucher.

3. DIE TECHNISCHEN BESONDERHEITEN DER BOHRANLAGE

3.1 Das Hebewerk

Das wichtigste Element einer Bohranlage ist das Hebewerk. Die ARGE schlägt vor, das vielfach bewährte, leistungsstarke Hebewerk Continental-Emsco C-3, Typ III mit einer Eingangsleistung von 2.220 kW (3.000 PS) einzusetzen. Dieses Hebewerk ist seit 1969 auf dem Markt und bislang in einer Stückzahl von über 134 gebaut worden.

Die ARGE hat sich aus folgenden Gründen für die Verwendung dieses Hebewerks entschieden:

- Die zur Verfügung stehenden Leistungen lassen schnelle Fahrgeschwindigkeiten und ausreichende Leistungsreserven zu.
- Es ist ein ausgereiftes, erprobtes und bewährtes Serienhebewerk.
- Geringe Investitionskosten
- Ersatzteile sind rasch und kostengünstig verfügbar.
- Sechs Schaltstufen gewährleisten eine optimale Anpassung der verfügbaren Leistung an die Leistungshyperbel der Antriebsmotore.
- Die Spulbedingungen an der Trommel sind sehr gut auf das Flaschenzugsystem abgestimmt.
- In der ARGE sind bereits drei Hebewerke dieses Typs vorhanden.
- Eine einfache und gute Anpassung des Hebewerktyps an die Erfordernisse des KTB-Projektes ist möglich.

Das auf der Tiefbohranlage einzusetzende Hebewerk wird dem hohen Grad der Automatisierung entsprechend und unter Berücksichtigung der 40 m langen Gestängezüge modifiziert.

1. Die Trommelbremsen, die an den Wangen der Fahrseiltrommel angebracht sind, werden durch außerhalb der Trommel-lagerung angebrachte Scheibenbremsen ersetzt. Scheibenbremsen sind gut für eine Automatisierung geeignet.
2. Ohne eine Veränderung des Grundrahmens kann durch den Wegfall der Bandbremse die Fahrseiltrommel auf 1981 mm verbreitert werden (von derzeit 1575 mm).
3. Durch diese Maßnahme wird erreicht, daß das Fassungsvermögen der Fahrseiltrommel den 40 Meter langen Gestänge-zügen angepaßt wird. Das 1 5/8" Fahrseil spult bis max. in die 4. Seillage.
4. Das Hebewerk bzw. das Flaschenzugsystem wird durch Meßwertaufnehmer und elektronische Steuerungen so weit auto-matisiert, daß dem bedienenden Mann ein Teil der Routinearbeiten abgenommen werden können. Dazu zählen eine Kontrolle der Fahrgeschwindigkeiten, das Beschleunigen und Abbremsen sowie die Notstopeinrichtung beim Einfahren des Bohrstranges im Bohrloch.
5. Der Kontrollstand des Hebewerkes ist nach modernen Gesichtspunkten für eine einfache Bedienung der Schaltvorgänge und eine übersichtliche Kontrolle der Arbeitsvorgänge gestaltet, z. B. durch Unterstützung mit dem Drilling Instrumentation System.
6. Das Antriebsystem des Hebewerkes wird mit einer Leistungsregelung ausgestattet, die es erlaubt, stets die Kraftreserven in den einzelnen Gängen auszunutzen.

3.2 Zuglängen und Roundtripzeiten

Die heutige Bohrtechnik erfordert es, daß ein Bohrwerkzeug am untersten Ende des Bohrstranges ausgetauscht werden muß, wenn es vom Bohrprozess abgenutzt ist. Zu diesem Zweck muß der gesamte Bohrstrang ausgebaut und schließlich wieder eingebaut werden. Die dafür notwendige Zeit wird mit zunehmender Bohrteufe größer und stellt eine echte Totzeit für den Bohrprozess dar.

Einer Reduzierung dieser Tripzeit auf ein vernünftiges Minimum kommt bei der Auslegung der Bohranlage eine vorrangige Bedeutung zu. Das Bohranlagenkonzept erreicht dies durch die folgenden Maßnahmen:

- a) Die Zuglängen werden von derzeit üblichen 27,5 m auf 40 m verlängert (Verwendung von API Range 3 Stangen, maximal 13,3 m lang).
- b) Zuglängen von 40 m reduzieren die Anzahl der zu verschraubenden Verbindungen für 14.000 m Gestänge, Ein- und Ausbau, von 509 auf 350.
- c) Die Zahl der möglichen fehlerhaften Verbindungen durch übermäßiges Verschrauben, wird in gleichem Maße reduziert.
- d) Ein voll automatisches und auf die Hakenbewegung wohl abgestimmtes Pipehandlingsystem läßt bei optimalen Bohrlochbedingungen Roundtripzeiten von 19,6 Stunden aus einer Teufe von 14.000 m zu. Anders ausgedrückt, reduziert sich die für solche Angaben übliche Vergleichsgröße derzeitiger Anlagen von 0,7 Stunden Roundtripzeit für 300 m auf etwa 0,42 Stunden. Eine wesentliche Begrenzung dieses Wertes ist aufgrund der Bohrlochbedingungen gegeben.

Durch diese Maßnahmen lassen sich nennenswerte Zeiteinsparungen bei Roundtrips erreichen.

3.3 DAS VOLLAUTOMATISCHE PIPEHANDLINGSYSTEM

Der Anteil der Roundtripzeit an der Gesamtbohrzeit erhöht sich mit zunehmender Bohrteufe infolge härteren Gesteins, höheren Temperaturen und kleinerer Bohrlochdurchmesser durch eine abnehmende Meißelstandzeit und längeren Roundtripzeiten pro Meißelwechsel. Erhebliche Kosteneinsparungen sind durch ein Verkürzen der einzelnen Roundtripzeiten möglich. Es wurde daher ebensoviel Sorgfalt auf die Optimierung des vorhandenen Hebewerkes Continental-Emsco C-3 im Hinblick auf Scheibenbremsen, Ausnutzung der größtmöglichen Fahrseiltrommellänge ohne Änderung der Basisabmessungen und Automatisierung des Fahrbetriebes verwendet wie auf eine Reduzierung der üblichen Vergleichsgröße "Roundtripzeit pro 300 m" durch eine Beschleunigung und Vereinfachung des Pipehandlings. Letzteres ist optimal, wenn die Totzeiten des Hakens minimiert werden, d.h. wenn die Zeit, die der Haken auf das Abnehmen bzw. Hinzufügen eines Bohrgestängezuges am Bohrstrang warten muß, möglichst ausgeschaltet wird.

Das Pipehandling im Turm ist so ausgelegt, daß langwierige Bewegungsabläufe eingespart werden (Setbackverschiebung). Damit werden die Geschwindigkeiten des Flaschenzugsystems bzw. des Bohrstrangs zum zeitbestimmenden Faktor und die Beanspruchung des Materials wird reduziert. Diese Setbackverschiebung in Verbindung mit dem Pipehandler ist zum Patent angemeldet worden.

Während der Haken, durch einen Retractor aus der Bohrlochmitte ausgelenkt, in die Ausgangsposition eines Arbeitszyklus zurückkehrt, löst der Pipehandler den Gestängezug und schwenkt ihn aus dem Arbeitsbereich des Klobens bzw. verschraubt ihn auf den Bohrstrang. Damit der Pipehandler selbst bei maximaler Hakengeschwindigkeit immer noch rechtzeitig wieder in der Ausgangsposition sein kann, wird ihm die zeitaufwendige Verfahrbewegung in das Setback zum Transport des Gestängezugs zwischen Bohrloch und Abstellfläche abgenommen, indem das Setback in Form von Abstellwagen und Fingerbühnenwagen so weit in Richtung Bohrlochachse vorgefahren wird, bis die zu befüllende bzw. zu entleerende Gestängereihe in Höhe der Drehachse des ortsfest installierten Pipehandlers zu stehen kommt. Der stationäre Pipehandler führt lediglich noch Schwenk- und Auslegebewegungen aus. Dieses Verfahren reduziert die Roundtripzeit wesentlich. Hebewerk und Piphandling sind damit optimal aufeinander abgestimmt.

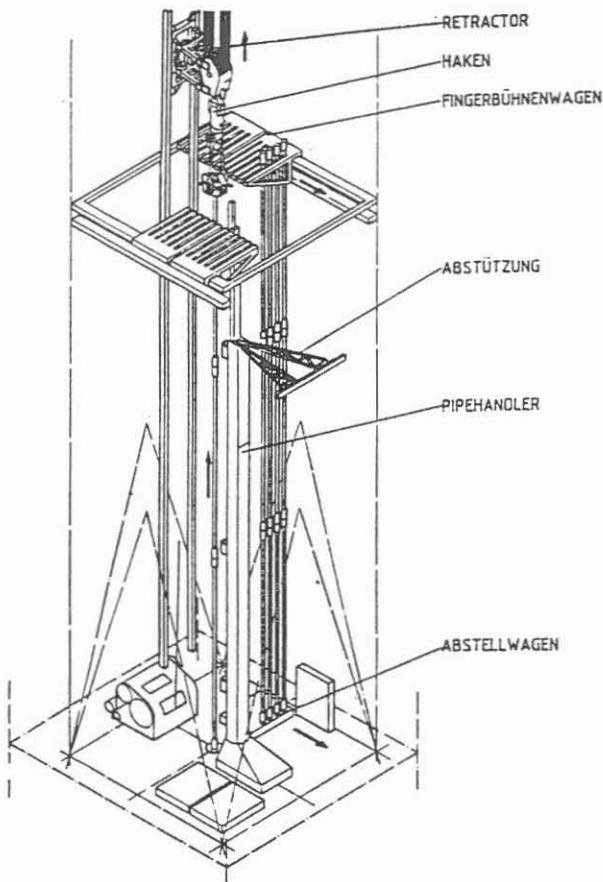
Die Gesamtzeit für den Ein- bzw. Ausbauzyklus eines 40 m-Zuges reduziert sich durch das von der ARGE entwickelte Pipehandlingsystem wesentlich. Wegen der voraussichtlich notwendigen kurzen Inspektionsintervalle des Gestänges (30-35 Tage ?) ist die Gesamtabstellkapazität im Turm auf 2 komplette 14.000 m Bohrstränge ausgelegt.

Das Pipehandlingsystem umfaßt:

- das vollautomatische Abfangen des normalen Bohrgestänges mit Keilen bzw. des hochvergüteten Gestänges mit Doppelselevator.
- das Haken-Retractor-System
- den automatischen Elevatorwechsel bzw. die exakte Positionierung der Tool-Joints zum Brechen, Kontern, Spinnen
- die vollautomatische Steuerung des Iron-Roughneck und der Spinning-Tools

- die selbständige Verriegelung der Gestängezüge in der Fingerbühne
- das vollautomatische Verfahren der Setback- sowie der Fingerbühnen-Pakete

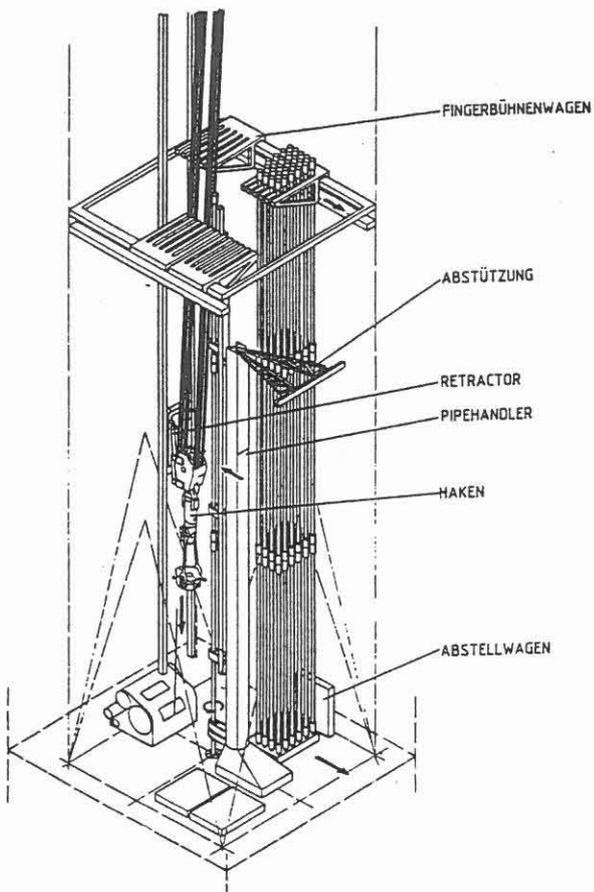
Das Zusammenwirken von Haken/Retractor, Pipehandler und Setbackverschiebung ist in den folgenden drei Bildern für den Gestängeausbau dargestellt.



Das Flaschenzugsystem zieht einen Gestängezug aus dem Bohrloch, während der Pipehandler vom letzten Arbeitsschritt zurück in Bereitstellungsposition schwenkt. Das Setback - bestehend aus Abstell- und Fingerbühnenwagen - ist soweit in Richtung Bohrlochmitte verfahren, daß sich die zu befüllende Abstellreihe, in der bereits vier Gestängezüge stehen, in Höhe der Drehachse des Pipehandlers befindet.

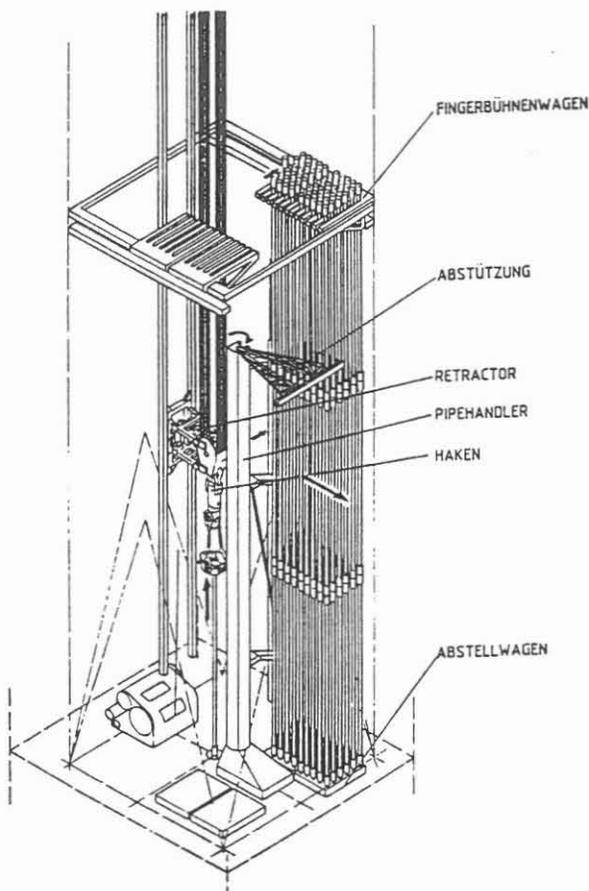
Wenn der Haken die höchste Position erreicht und der Driller sich entschieden hat, diesen Gestängezug abzuschrauben, dann wird durch einen Knopfdruck der folgende vollautomatische Arbeitsablauf in Gang gesetzt:

Abb. 4: Ziehen eines Zuges



Die automatischen Gestängekeile werden aktiviert und bei Lastaufnahme am Drehtisch wird ein Signal an den Pipehandler zum Greifen des Zuges gegeben. Ist dies geschehen, dann öffnet der Elevator, der Retractor wird aktiviert und der Kloben gleitet abwärts, während der Pipehandler mit dem Brech- und Entschraubvorgang beginnt. In der Zeit, die der Kloben zum Absenken um 40 m benötigt, entschraubt der Pipehandler den Gestängezug vollständig, hebt diesen aus der Muffe und schwenkt ihn durch eine einfache Drehbewegung aus dem Arbeitsbereich des Klobens. Dieser kann, am unteren Arbeitspunkt angekommen, durch den Retractor in Bohrlochmitte geschwenkt, mit dem Elevator den nächsten Zug aufnehmen.

Abb. 5: Entschrauben eines Zuges



Während das Flaschenzugsystem im nächsten Arbeitsgang den folgenden Gestängezug aus dem Bohrloch zieht, legt der Pipehandler, nachdem er die Drehbewegung vom Bohrloch weg um 90° ausgeführt hat, ohne daß er sich von der Stelle bewegt, mit dem Greifarm in die in Höhe seiner Drehachse befindliche Abstellreihe des Setback aus und stellt den Zug vor den letzten, dort abgestellten Zug. Die Setback- und Fingerbühnenwagen können 16 Gestängezüge in einer Fingerreihe aufnehmen. Sie müssen lediglich nach Ausbau von 16 Zügen um eine Fingerteilung (240 mm) verschoben werden.

Abb. 6: Abstellen eines Zuges

Die entscheidenden Faktoren dieses Pipehandlingsystems sind:

- Die nötigen Bewegungsabläufe zum Handhaben eines Gestängezuges werden auf ein Minimum reduziert. (Der Pipehandler führt keine Längsbewegungen in den Setbackbereich mehr aus. Eine wesentliche Zeiteinsparung ist die Folge).
- Der Aufbau des Pipehandlers dreht sich lediglich um $\pm 90^\circ$ zum Setback hin. Diese einfache Bewegung kann durch die stationäre und stabilisierte Anordnung des Pipehandlers (obere und untere Abstützung) mit größerer Geschwindigkeit ausgeführt werden.

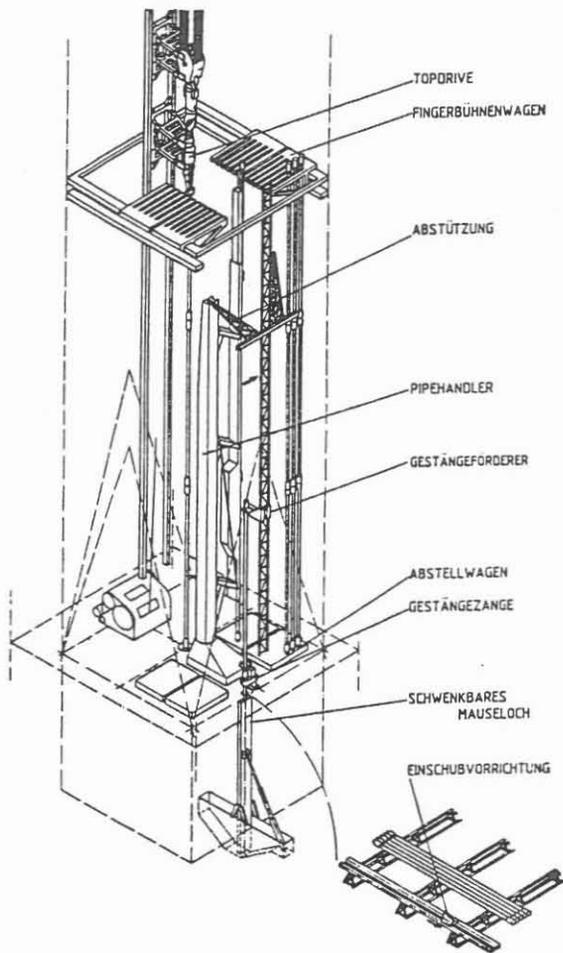
- Der vereinfachte Bewegungsablauf wirkt sich günstig auf die Automatisierung und Steuerung des Pipehandling aus, welche durch die Simatic S5-150 erfolgt, ein bereits in der Industrie vielfach bewährter Prozessor.
- Wegen der kurzen Wege zwischen Abstellposition und Bohrloch ist der Pipehandler nach Ausführung eines Arbeitszyklus frühzeitig wieder in Ausgangsposition.
- Die Minimierung der sich bewegenden Teile wirkt sich materialschonend auf das System aus. Ein reibungsloser Dauereinsatz wird begünstigt.
- Dadurch, daß der Absetzpunkt der Bohrgestängezüge im Setback in unmittelbarer Nähe der Bohrlochachse verschoben wird, können diese überhaupt erst bei Ausfall der Automatic manuell von einem Bühnenmann bewegt werden. Die infolge Schräglage der Gestängezüge vom Bühnenmann aufzubringenden Kräfte könnten andernfalls von diesem nicht mehr bewältigt werden. Eine manuelle Handhabung der Gestänge ist damit erst ermöglicht.

3.4 Das Bohrgestängeaufnahme- und Ablegesystem

Das Aufnehmen und Ablegen von einzelnen Bohrstangen wird auf Bohranlagen allgemein mit Hilfe von Winden, Mauseloch, Rutsche und dem Flaschenzugsystem durchgeführt. Das Auswechseln eines Bohrstranges ist damit eine zeitaufwendige Arbeit, die den Bohrbetrieb unterbricht bzw. die Roundtripzeit wesentlich verlängert.

Das Konzept der ARGE sieht vor, daß zwei komplette Bohrstränge im Turm untergebracht werden können, von denen einer zur Inspektion oder zum Auswechseln abgelegt werden kann. Bei einem Roundtrip kann damit ohne Unterbrechung ein Strang abgestellt und ein neuer eingebaut werden. Das Aufnehmen und Ablegen von Gestänge wird unabhängig von den Arbeiten des Flaschenzugsystems erfolgen, kann notfalls auch während eines Roundtrips durchgeführt werden. Es ist vorgesehen, auch Kerne bzw. Kernrohre in voller Länge (bis max. 27 m) mit der konzipierten Vorrichtung abzulegen.

Das Bohrgestängeaufnahme- und Ablegesystem (BAAS) ist in den folgenden drei Bildern erläutert. Die Funktionsweise ist am Beispiel "Aufnehmen eines Gestängezuges" dargestellt.



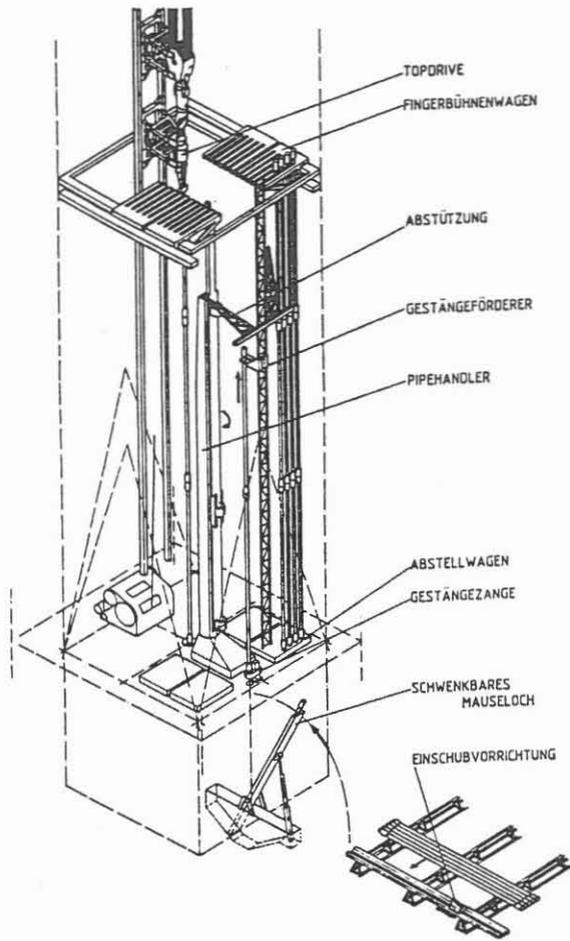
Das Bohrgestängeaufnahme- und Ablegesystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Einschubvorrichtung,
- schwenkbares Mauselloch,
- Gestängezange,
- Gestängeförderer,
- Pipehandler und Overheadkran.

Eine Bohrstange wird mittels einer Einschubvorrichtung vom Gestängelager in ein horizontal liegendes Mauselloch geschoben. Dieses ist drehbar im Unterbau angeordnet. Durch eine Schwenkung um 90° wird die Bohrstange aufgerichtet und von unten durch eine Öffnung in der Arbeitsbühne mittels einer Hubvorrichtung angehoben. Ein an der Innenseite der Turmwand in Bohrlochmitte montierter Gestängeförderer (Greifarm, der sich auf Zahnstangen bewegt) nimmt die Bohrstange auf und hebt sie an, bis der untere Verbinder über die Arbeitsbühne kommt (13,3 m).

Abb. 7: Gestängeaufnahme Nr. 1

Das schwenkbare Mauselloch ist jetzt entleert und wird zur Aufnahme der nächsten Bohrstange um die Horizontale geschwenkt. Diese Bohrstange wird von unten an die bereits am Gestängeförderer hängende Stange mit der auf der Arbeitsbühne montierten Zange angeschraubt und die Verbindung gekontert. Das Verschrauben wird von einer Drehmomentüberwachung kontrolliert.



Der Pipehandler wird für die Übernahme und für den Weitertransport des später komplett montierten Gestängezuges in das Setback an der Gestängeaufnahmeverrichtung plaziert und um 180° von dem Bohrloch zu dieser hingedreht.

Nachdem der Gestängeförderer die miteinander verschraubte erste und zweite Stange des Bohrgestängezuges über die Arbeitsbühne angehoben hat, führt das schwenkbare Mausloch die dritte Bohrstange hinzu. (Abb. 8)

Diese wird von unten mit den zwei bereits verbundenen Bohrstangen zu einem Gestängezug von drei Bohrstangen verschraubt. Der Gestängeförderer transportiert nun den gesamten Zug in den Turm auf Fingerbühnenhöhe.

Abb. 8: Gestängeaufnahme Nr. 2

Der Pipehandler übernimmt dann den fertig montierten Gestängezug vom Gestängeförderer und setzt ihn im Setback ab. (Abb. 9)

Dieser Arbeitsschritt kann auch - für den Fall, daß der Pipehandler anderweitig arbeitet (z. B. beim Roundtrip) - von dem Overheadkran ausgeführt werden, der den Gestängezug mit einem Krebsgreifer in der oberen Gestängemuffe faßt.

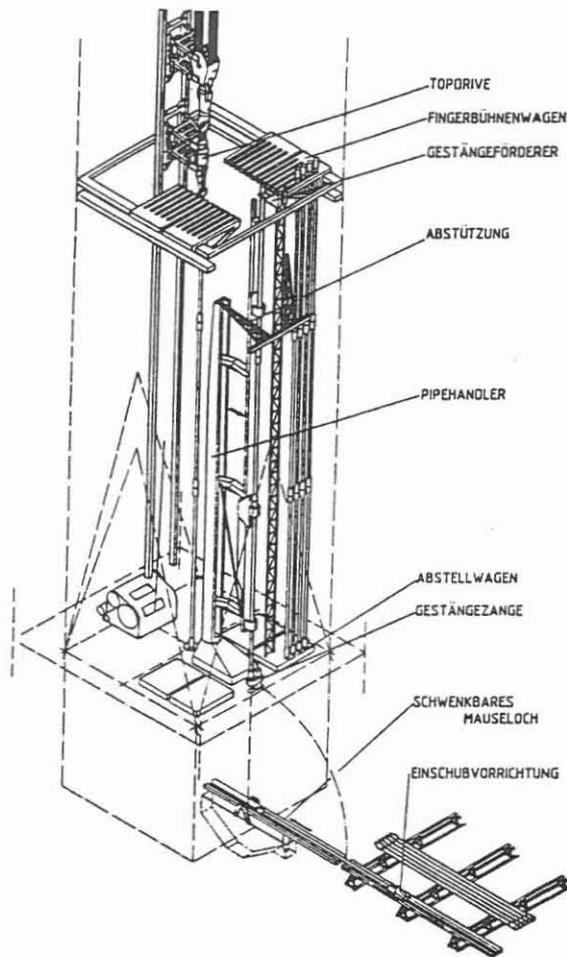


Abb. 9: Gestängeaufnahme Nr. 3

Das Bohrgestängeaufnahme- und Ablegesystem gewährleistet darüber hinaus einen schnellen und sicheren Transport der Kerne, in einem Stück von der Arbeitsbühne zum Bohrplatz und weiter zum Kernlabor.

3.5 Drilling Instrumentierung (DIS) und Automatisierung

Unter Drilling Instrumentation Systeme (DIS) wird die Bohranlageneinrichtung verstanden, die Meßwerte und Daten des Bohrprozesses und der Bohranlage aufnimmt, anzeigt und verarbeitet, die notwendig sind, um den aktuellen Stand des Bohrprozesses und der Bohreinrichtung zu erfassen, Regelprozesse durchzuführen und ausgesuchte Daten zu protokollieren.

Die Drillerkabine ist das Zentrum für die Bedienung und Überwachung des Bohrbetriebes. In ihr sind wesentliche Bestandteile des Drilling Instrumentation Systemes, kurz DIS, Markenname SIDRILL installiert. SIDDRILL ist ein Vielfach auf Offshore- und Onshoreanlagen erprobtes System. Das DIS erfaßt die Daten in Echtzeit und bewältigt die Datenverarbeitung, Datenanalyse, Datenspeicherung und alpha-numerische und graphische Darstellung von Bohrparametern und Prozeßzuständen für die Anlagenteile

- Bohrturm
- Hebewerk/Flaschenzugsystem
- Drehtisch/Topdrive
- Spülungssystem
- Tanklager
- Pipehandlingsystem.

Das DIS ist ein speicherprogrammierbares Prozeßautomatisierungssystem der Produktfamilie SIMATIC S 5-150 und löst Aufgaben, wie

- Steuern
- Regeln
- Rechnen
- Bedienen
- Überwachen
- Melden
- Protokollieren

für den gesamten Bohrprozeß und allen Nebenarbeiten.

Der Betrieb und die Bedienung des Automatisierungssystemes setzt eine leistungsstarke Software voraus.

Die angewandte Programmiersprache "STEP 5" bietet folgende Vorteile:

- Einfache Programmierung durch Strukturieren des Programmes, d. h. Aneinanderreihen von Programmbausteinen
- Vorhandene Standardsoftwarekomponenten für vielseitige Aufgaben
- direkte Programmeingabe mittels Programmiergerät
- indirekte Programmeingabe durch Einstecken des Speichermoduls
- Ausgabe der Programmdokumentation über Drucker

Die anfallenden Prozeßsignale werden über die Meßwertfassung- und -aufbereitungsanlage an das Automatisierungsgerät gegeben.

Erprobte und zuverlässige Meßfühler, vielfach in anderen Industriezweigen eingesetzt, nehmen die Meßgröße des Prozesses auf und wandeln diese in elektrische Signale um.

Meßwertumformer verstärken und normieren die unterschiedlichen Meßsignale in Stromwerte 4-20 mA und Spannungswerte 0-10 V.

Diese Signale werden entweder direkt an analoge Anzeige- und Registriergeräte geführt oder über Analogeingänge vom Automatisierungsgerät übernommen.

Je nach Verwendung erfolgt weitere Verarbeitung im Automatisierungsgerät wie:

- Glättung
- Mittelwertbildung
- Grenzwertbildung und ähnliches

Es werden ca. 200 Analog- und Binärsignale verarbeitet.

Das Instrumentenfeld in der Drillerkonsole enthält Analog- und Ziffernanzeigen sowie Meldeleuchten.

Ein Taster- und Schalterfeld erlaubt die Bedienung des Instrumentenfeldes. Haken und Meißellast werden konventionell angezeigt.

Bedienung und Überwachung des Prozesses erfolgt an Datensichtstationen über Tastaturen und Bildschirme.

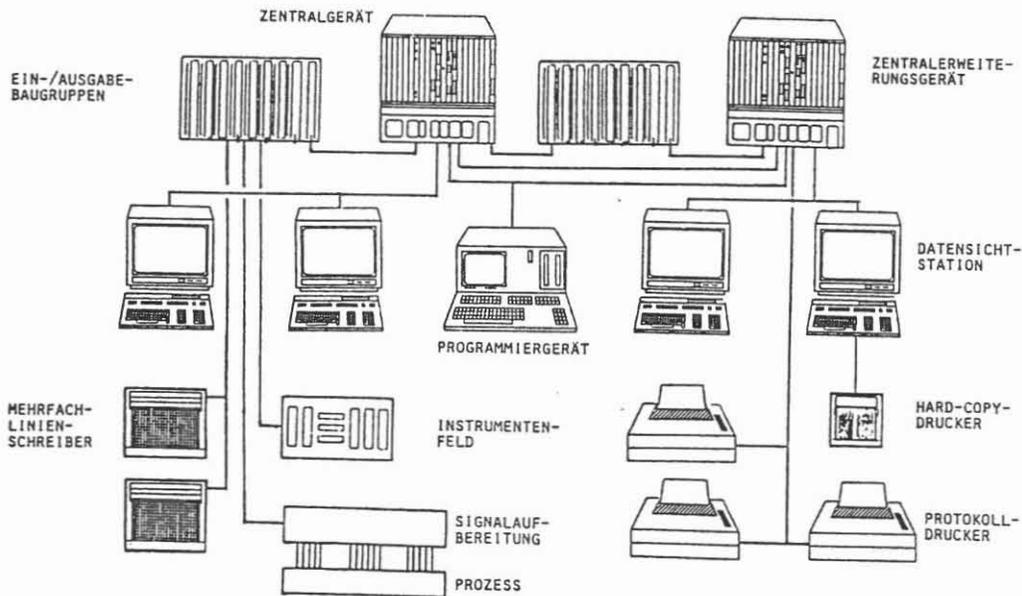
Auf Bildschirmen werden angezeigt:

- Alarm und Störmeldung
- Betriebszustände der Anlage, Prozeßdaten
- Prozeßübersichts- und Einzelblätter
- Tankinhalte

Prozeßdaten, Alarm- und Störmeldungen, Schichtprotokolle und historische Daten können über folgende Registriergeräte aufgezeichnet werden:

- Protokolldrucker
- Hardcopy-Videodrucker
- Mehrfachlinienschreiber

Die Gerätekonfiguration des vorgesehenen DIS zeigt Abb. 10:



Es handelt sich um die folgenden Geräte:

- Zentralgerät mit Zentralerweiterungsgerät
- Signalein- und -ausgabebaugruppen
- Programmiergerät
- Datensichtstationen
Drillerkabine, Oberbohrmeisterbüro, Operatorbüro,
wissenschaftlicher Arbeitsraum
- Mehrfachlinienschreiber
Drillerkabine, Oberbohrmeisterbüro
- Instrumenten- und Bedienfeld
- Signalaufbereitung
- Prozeßebene

Das vorgestellte System ist erweiterungsfähig, sowohl auf der Prozeßseite als auch an der Datenein- und -ausgabenseite bei zusätzlichen Aufgabenstellungen.

Es hat Schnittstellen für Datentransfer zu DV-Anlagen namhafter Hersteller.

Die im Energieversorgungsteil bereits erwähnte USV-Anlage sichert unterbrechungsfreien Betrieb.

Das vorgestellte DIS löst folgende prozeßspezifische Aufgaben:

- Hebewerksregelung beim Roundtrip durch Vorgabe von Geschwindigkeits- bzw. Drehzahl und Momentensollwerte an die Hebewerksantriebe
- Bohrhakensteuerung beim automatischen Pipehandlingbetrieb
- Erstellung und Führung eines Gestängebuches
- Darstellung der Spülungsvolumina und -flüsse im Bohrloch-Umlaufspiel und Reservetanksystem

- Früherkennung kritischer Bohrloch-Situationen
- Kicküberwachung durch Druckmessung
- Eingabe und Speicherung von Mischungsrezepturen für die Spülung
- Beschriftung und Etikettierung der Bohrkleinproben

Driller Kabine

Wie bereits erwähnt, ist das DIS in der Drillerkabine eingebaut.

Im U-förmigen Steuerstand sind die Anzeige- und Bediengeräte nach ergonomischen Gesichtspunkten angeordnet.

Für das Automatisierungssystem ist das folgende Anforderungsprofil vorgesehen:

- Erfassung aller relevanten Daten aus dem Bohrbetrieb
- Aufbereitung der Daten und Bereitstellung für wissenschaftliche Auswertung
- Überwachung der mit dem Bohrvorgang zusammenhängenden Parameter und Funktionen
- Erkennung und Meldung gefährlicher Betriebszustände
- Zeiteinsparung beim Bohrvorgang
- Unterstützung und Entlastung des Personals bei der Bedienung und Überwachung
- Entscheidungshilfen bei kritischen Operationsphasen
- Information der Betriebsführung
- Wirtschaftliche und sichere Durchführung der Betriebsführung
- Höhere Meßgenauigkeit, umfangreiche Meßausrüstung

Das so konzipierte Drilling Instrumentation System gewährleistet damit die folgenden zwei wesentlichen Forderungen;

- a) Eine lückenlose Erfassung und Aufbereitung wesentlicher Daten zur Auswertung für diese unter rein wissenschaftlichen Aspekten abgeteuften Bohrung.
- b) Eine weitgehende Automatisierung wesentlicher, häufig wiederkehrender Abläufe zum Erreichen der vorgesehenen Endteufe dieser Langzeitbohrung.

4. UMWELTSCHUTZ UND SICHERHEIT

Aufgrund des langen Einsatzes der Bohranlage für eine Bohrung und aufgrund des großen Interesses, das das Projekt weltweit genießt, sind Gesichtspunkte der Arbeitssicherheit und des Umweltschutzes zu einem wesentlichen Bestandteil der Konzeption geworden.

Dazu gehören insbesondere Lärmschutz, Schadstoffemission, Sicherheitsmaßnahmen und Arbeitsplatzgestaltung. Die Überlegungen zu diesen Bereichen sind im Einklang mit den zahlreichen bestehenden Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen.

Wesentliche Aspekte des Konzeptes zur Verhinderung von Lärm-entstehung bzw. zur Dämmung von Lärmemission sind hier aufgeführt.

- Unterbau und Turm sind bis über die Fingerbühne hinaus verkleidet. In den Bereichen der Arbeits- und Fingerbühnen ist die Verkleidung mit Schallabsorptionsisolierung versehen, um eine Dämmwirkung zu erzielen. Die Auslegung des Hebewerks mit hydraulischer Nachlaßvorrichtung und Scheibenbremsen verhindert die Entstehung von Bremsgeräuschen. Gleichen Zielen dient die Maßnahme, auf luftbetriebene Geräte, wie z. B. Lufthassel und Kelly-Spinner zu verzichten und diese durch hydraulisch betriebene Aggregate zu ersetzen.
- Die Tankanlage, das Spülmittellager und die Pumpen sind in geschlossenen Räumen untergebracht. Das Pumpenhaus ist mit Absorptionsisolierung versehen. In den Bereichen Schüttelsieb und Desilterschlitten sind zusätzliche Verkleidungen vorhanden. Alle Ansaugöffnungen für Fremdbelüftungen sind mit Kulissenschalldämpfern ausgerüstet.

Dies gilt auch für die Ansaugstutzen der Belüftungen der Antriebmotoren vom Drehtisch, Topdrive und Hebewerk sowie aller Kompressoren.

- Die Versorgung der Bohranlage mit elektrischer Energie erfolgt aus dem öffentlichen Netz. Damit entfällt die Geräuschestehung durch Erzeugung elektrischer Energie. Die drei Notstromaggregate sind in schallisolierten Containern installiert und mit Kulissenschalldämpfern versehen. Das gleiche gilt für die Anlage zur Druckluftherzeugung sowie für den Kompressorensatz, der für das Luftbohren vorgesehen ist.

Zur Verhinderung bzw. Eingrenzung der Schadstoffemission sind die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Voraussetzung zur sicheren Handhabung aller während der Bohrung anfallenden flüssigen Stoffe - besonders der Spülung - ist die Auslegung einer Lokation, die ein kontrolliertes Sammeln und Ableiten aller Flüssigkeiten möglich macht.
- Es wird empfohlen, den Bohrplatz in zwei Bereiche aufzuteilen. Der erste Bereich umfaßt Unterbau, Tankanlage mit Bohrkleinbehältern, Pumpen, Spülungs- und Rohrinnspektionslager. Er ist durch eine Einfassung begrenzt. Alle hier anfallenden Flüssigkeiten sind zu sammeln, aufzuarbeiten oder zu deponieren.
- Im verbleibenden zweiten Bereich fällt lediglich Oberflächenwasser durch Niederschläge an. Dieser Bereich soll von einem Grabensystem umgeben werden, das mit der Kläranlage verbunden ist. Kontrollschächte in der Fundamentierung dienen zur Überwachung der Dichtheit der Betondecke.
- Die Spülung, die bei Roundtriparbeiten auf der Arbeitsbühne anfällt, wird in Auffangkanälen und -wannen gesammelt und abgeleitet.
- Emissionen in Form von Abgasen von Dieselaggregaten treten nur sehr selten auf, da die laufende Energieversorgung aus dem öffentlichen Stromnetz erfolgt.

- Mit Anfall von Staub ist lediglich dann zu rechnen, wenn Luftbohrarbeiten zur Anwendung kommen. In diesem Falle ist geplant, am Ende der Austragsleitung den Gesteinstaub durch Wasser zu binden und für die geowissenschaftliche Auswertung zu sammeln.
- Der Dieseltank für die Notstromversorgung ist doppelwandig ausgeführt und mit einer Leckanzeige versehen. Schmieröle werden auf speziellen Schlitten gelagert, die mit Auffangwannen versehen sind und so ein sauberes Arbeiten ermöglichen. Für Altöl steht ein Tank zur Verfügung, der gekennzeichnet ist und regelmäßig gezielt entsorgt werden kann.

Die weitgehende Automatisierung vieler Betriebsabläufe kommt dem Sicherheitsdenken in vielen Bereichen entgegen. Das Fernhalten des Menschen aus komplizierten oder gefährlichen Arbeitsbereichen durch den Einsatz von automatisierten Geräten, reduziert eine eventuelle Unfallgefahr drastisch. Umfangreiche Überlegungen wurden angestellt zum Abschotten und Absichern solcher Bereiche gegen unbeabsichtigtes Eindringen.

Die Arbeitssicherheit wird durch folgende konstruktive Maßnahmen erhöht:

- Ausreichende Fluchtwege für bohrtechnisches und wissenschaftliches Personal sowie Besucher
- Gassensoren in den Bereichen Arbeitsbühne und Bohrturm steuern bei Gasanzeige die Lüftungsklappen im unteren Bereich der Arbeitsbühne. Die Kaminwirkung der oben offenen Bauweise sorgt für schnelles Abziehen der Gase
- Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen am Hebewerk für die beschriebenen Betriebsarten, Heben, Bremsen, Energierückgewinnung
- Unfallrisiko wird durch APS, BAAS und Topdrive reduziert
- Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung
- Aktiver und passiver Lärmschutz
- Einbau von Aufzügen

Die hohen Anforderungen an den Bohrarbeiter im Hinblick auf Projektdauer, Roundtripdauer, Schnelligkeit und Lasten beeinflussen in hohem Maße die Gestaltung der Arbeitsplätze.

Das hier erarbeitete Bohranlagenkonzept stellt neue Einrichtungen und Verfahrensweisen vor, die für die dazugehörigen Arbeitsplätze Verbesserungen und für deren Arbeitsinhalte geringere physische Belastungen gegenüber den heutigen aufweisen. Im Rahmen der hier gestellten Überlegungen sind Belastungen, die vom Arbeitsplatz auf den Mitarbeiter ausgehen, analysiert und unter Anwendung der heutigen Kenntnisse hinsichtlich der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen vermieden worden. Folgende Arbeitsplätze besitzen besondere Gestaltungsmerkmale:

- Arbeitsbühne
- Driller-Kabine (Driller- und Pipehandlerkonsole)
- Fingerbühne
- BAAS und BAAS-Bedienkonsole
- Unterbau
- Spülsaufbereitung
- Bohrgestängeinspektion

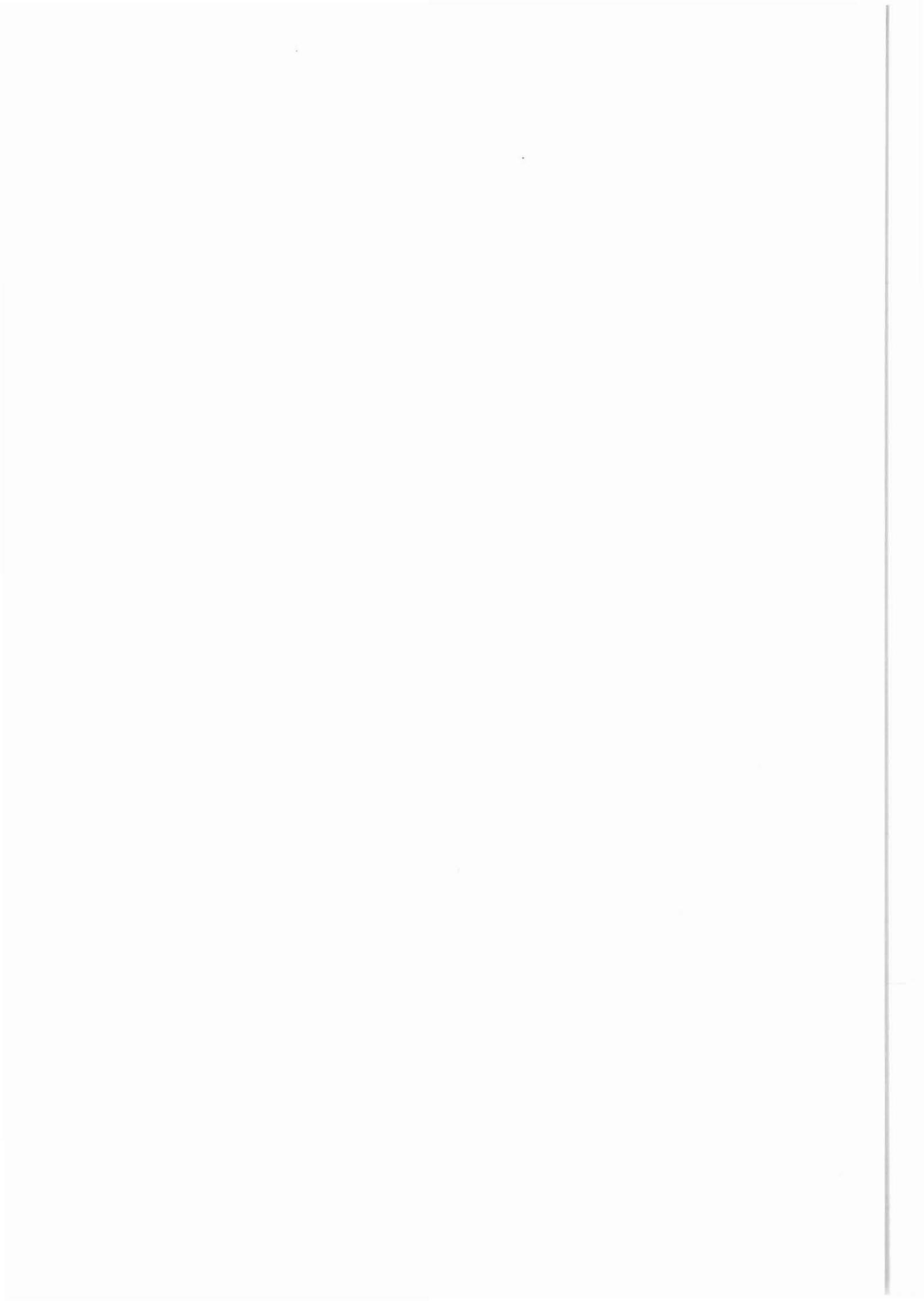
In der Driller-Kabine befinden sich die Arbeitsplätze für den Driller und den Operator des APS. Roundtripzeiten, die länger als eine Schicht dauern, binden beide für die gesamte Dauer ihrer Schicht an ihren Arbeitsplatz. Sie nehmen hier vornehmlich überwachende und steuernde Aufgaben wahr. Beide neu gestalteten Arbeitsplätze mit ihren Konsolen, Überwachungs- und Steuereinrichtungen tragen dem Rechnung.

Während des Aufnehmens des Bohrstrangs führt die Mannschaft lediglich überwachende und steuernde Aufgaben aus, denn ein Schub- und Zugmechanismus bewegt die Bohrstange in das kippbare Mauselloch. Von dieser Position aus verläuft das Zusammenstellen der Züge und Abstellen im Setback ohne Einsatz menschlicher Arbeitskraft. Entsprechendes gilt für das Ablegen.

Zwei Personenaufzüge verbinden die Arbeitsplätze in den unterschiedlichen Bohrturm-Ebenen, so daß ermüdendes Steigen von Treppen entfällt. Einer der Personenaufzüge führt bis zur Fingerbühne, so daß die regelmäßigen Inspektionen ohne Steigarbeit ausgeführt werden können.

Als Fazit der Studie kann gelten, daß unter Verwendung vorhandener und bewährter Geräte und Systeme, durch eine Optimierung im Hinblick auf den besonderen Einsatzzweck und durch eine Neuentwicklung von Systemen in wenigen Bereichen, eine Bohranlage konzipiert worden ist, die alle bisher auf dem Markt befindlichen Anlagen wesentlich verbessert. Wirtschaftliche Überlegungen und technische Erfordernisse rechtfertigen das Konzept.

D. Spülung, Bohrlochhydraulik
und Bohrlochkontrolle



DRILLSAFE GmbH

Postfach 13 20
4460 Nordhorn

Untersuchung zum Spülungssystem für die Vorbohrung

Dipl.-Ing. M. Bründer
Dipl.-Ing. T. Tran-Viet
H. Weghold
Dr. G. Wernado

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1.	Einleitung..... 426
2.	Die Bohrspülung..... 427
2.1	Aufgaben der Bohrspülung..... 427
2.2	Zusammensetzung einer Bohrspülung..... 428
2.2.1	Flüssige Phase..... 428
2.2.2	Feststoffe..... 438
2.2.2.1	Nützliche Feststoffe..... 429
2.2.2.2	Überflüssige Feststoffe..... 434
2.2.3	Polymere..... 435
3.	Anforderungen an eine Spülung beim Seil- kernbohrverfahren..... 437
3.1	Süßwasser-System..... 439
3.2	Süßwasser-Schmiermittel-System..... 439
3.2.1	Wasser-Öl-System (Öl-in-Wasser-Emulsion)..... 440
3.2.2	Wasser-Spezialschmiermittel-System..... 441
3.2.3	Einfluß verschiedener Faktoren auf das Süßwasser-Schmiermittel-System..... 442
3.2.4	Positive und negative Aspekte der Süßwasser- und Süßwasser-Schmiermittel-Systeme..... 443
3.3	Wasser-Polymer-System..... 444
3.3.1	Native Polymere..... 444
3.3.2	Halbsynthetische Polymere..... 450
3.3.3	Synthetische Polymere..... 461
3.3.4	Positive und negative Aspekte der Polymer- systeme..... 468
4.	XC-Polymer-Untersuchung..... 469
4.1	Testergebnisse..... 469
4.1.1	Fließwerte vor der Alterung..... 469
4.1.2	Fließwerte nach der Alterung..... 474
5.	Anhang..... 475
5.1	Kolloidale Lösungen..... 475
5.2	Testergebnisse und Diskussion..... 476
5.2.1	Ansatz von Testlösungen..... 476
5.2.2	Viskositätskurven bei verschiedenen Konzentrationen..... 476
5.2.3	Viskosität in Abhängigkeit zum pH-Wert..... 481
5.2.4	Viskositätsänderung durch Zugaben von Salzen... 482
5.3	Zusammenfassung des Anhangs..... 486
6.	Literaturverzeichnis..... 487

1 EINLEITUNG

Das Projekt der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) der Bundesrepublik Deutschland, bei Erbdorf eine ca. 14 000 m tiefe Bohrung abzuteufen, der eine 3 000 - 5 000 m tiefe Vorbohrung vorausgeht, dient der Grundlagenforschung. Es wird mit dem Ziel durchgeführt, neue Erkenntnisse über die chemischen und physikalischen Bedingungen und Abläufe in der Erdkruste sowie deren Aufbau zu erhalten. Dazu soll in Bereiche vorgestoßen werden, die durch bisherige Bohrungen noch nie erreicht wurden.

Bis zur voraussichtlichen geplanten Endteufe von 3 000 m soll die Vorbohrung zu 100 % im Seilkernverfahren gekernt werden. Eine derart große Kernstrecke bietet den Geowissenschaftlern eine einmalige Chance für ihre Untersuchungen, da Kerne die einzige Möglichkeit darstellen, ungestörte Proben aus der Formation zu erhalten.

Diese Ausarbeitung soll dazu beitragen, daß für die Vorbohrung die optimale Spülung zum Einsatz kommt.

2 DIE BOHRSPÜLUNG

2.1 Aufgaben der Bohrspülung

- Reinigung der Bohrlochsohle von Bohrklein und dessen Transport zur Oberfläche
- Kontrolle der Formationsdrücke
- Kühlung und Schmierung der Bohrwerkzeuge, des Bohrgestänges
- Halten des Bohrkleins in der Suspension, wenn die Zirkulation unterbrochen wird
- Stabilisierung des Bohrlochs durch Bildung eines undurchlässigen Filterkuchens auf der Bohrlochwand
- Übermittlung der hydraulischen Energie auf das Bohrwerkzeug
- Übermittlung von Bohrlochinformationen
- Vermeidung von Korrosion des Bohrgerätes

2.2 Zusammensetzung einer Bohrspülung

Bohrspülungen sind zumeist kolloide Medien, die aus verschiedenen Komponenten bestehen.

Um die beschriebenen wichtigen Funktionen zu erfüllen, muß die Bohrspülung entsprechende Eigenschaften aufweisen. Historisch gesehen haben Zwei-Phasen-Systeme (flüssig / fest) die breiteste Anwendung gefunden und insbesondere Spülungen mit Bentoniten (Montmorillonit-Tone) als Hauptkomponenten. Mehrjährige Erfahrungen haben gezeigt, daß die Präsenz von Feststoffen in Spülungen einige nützliche Eigenschaften stellt, gleichzeitig gibt es allerdings auch negative Aspekte.

Eine Bohrspülung besteht in den meisten Fällen aus folgenden Komponenten:

- Flüssige Phase
- Feststoffe
- Polymere

2.2.1 Flüssige Phase

Als flüssige Phase kommt sehr häufig Wasser, in selteneren Fällen Öl zum Einsatz. Wasser bietet aufgrund der problemloseren Beschaffung, zum Teil aus eigenen Brunnen der Bohrung, sowie aus sicherheits- und gesundheitlichen Gründen enorme Vorteile gegenüber Öl. Kann man mit Wasser als flüssige Phase die anstehenden bzw. erwarteten Probleme nicht bewältigen, so kommt Öl als flüssige Phase zum Einsatz. Dies ist gleichbedeutend mit einer totalen Umstellung der Bohrspülungschemikalien.

2.2.2 Feststoffe

In einem Spülungssystem vorhandene Feststoffe können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- nützliche Feststoffe
- überflüssige Feststoffe

Beide, nützliche und überflüssige Feststoffe, können entweder aktiv (Bentonite als nützliche Feststoffe, erbohrtes Ton- oder Tongesteinbohrklein als überflüssige Feststoffe) oder inert (Beschwerungsmaterial als nützliche Feststoffe, nicht-aktives Bohrklein als überflüssige Phase) sein.

2.2.2.1 Nützliche Feststoffe

2.2.2.1.1 Aktive Feststoffe

Zu den aktiven nützlichen Feststoffen zählt man die Tone, die vorsätzlich zu einem Spülungssystem zugesetzt werden. Sie werden als Spülungstone bezeichnet und sind Verwitterungsprodukte meist saurer, vulkanischer Glastuffe, Feldspate und Serpentin. Die besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Tonsuspensionen sind auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- innerkristalline Quellfähigkeit
- struktureller Aufbau, Morphologie der Kristalle
- Kationen-Austauschvermögen

Grundsätzlich können Tone wie folgt in zwei Gruppen untergliedert werden:

- Schichtentone
- Tone mit Doppelkettenstruktur

2.2.2.1.1.1 Schichtentone

Aus der Gruppe der Schichtentone sind für die Bohrindustrie fast ausschließlich die Montmorillonite (Bentonite) für den Einsatz in Spülungen interessant.

Der Montmorillonit ist ein kristallines, schichtförmiges Aluminium-Hydrosilikat, deren Silikatlamellen aus drei Schichtlagen mit einer SiO_4 -Tetraeder-, einer Aluminiumoxidhydro-Oktaeder- und einer SiO_4 -Tetraederschicht bestehen. Der Montmorillonitkristall ist aus vielen solchen Schichtpaketen zusammengesetzt und quillt in Anwesenheit von Wasser auf, und zwar lagern sich Wassermoleküle zwischen den einzelnen Schichtpaketen ein. Der Schichtabstand zwischen zwei Montmorillonitlamellen wächst dadurch beim Ca-Montmorillonit um ca. das Doppelte.

Dieses Phänomen der innerkristallinen Quellung stützt sich auf eine unausgeglichene Ladungsverteilung innerhalb der Schichtpakete. Wenn beispielsweise ein dreiwertiges Aluminium-Ion in der Oktaederschicht isomorph durch ein zweiwertiges Magnesium-Ion ersetzt wird, enthält die Oktaederschicht eine positive Ladung weniger bzw. besitzt die Oberfläche des Schichtpaketes eine negative Überschuladung. Auch der Austausch von Si^{4+} durch Al^{3+} in der Tetraederschicht bewirkt eine negative Überschuladung.

2.2.2.1.1.1.1 Der Einfluß des pH-Wertes auf eine Bentonit-suspension

Arbeitsschutz und Korrosionsschutz erfordern, daß der pH-Wert einer Spülung niemals unter 7,0 fallen darf. Daher wird hier der Effekt eines hohen pH-Wert (über 7,0) diskutiert. Innerhalb des pH-Bereiches 7,0 - 9,0 erhöht sich die Viskosität einer Wasser-Bentonit-Suspension leicht und erreicht ein Minimum bei einem pH-Wert von ca. 8,5. Das bedeutet, daß ein pH-kontrollierendes Mittel (normalerweise NaOH) als Dispergiermittel agieren kann, wenn dieses in niedrigen Konzentrationen beigelegt wird. Dieses liegt daran, daß die Hydroxid-Ionen die Bentonitteilchen anziehen und ihre gesamte negative Belastung erhöhen. In einer solchen Situation neigen diese Teilchen dazu, sich gegenseitig abzustößen und eine Verminderung der Viskosität kann beobachtet werden. Bei höheren pH-Werten (>9,0) erhöht sich die Konzentration an Hydroxid-Ionen und wahrscheinlich tritt ein Effekt der "Überlastung" an Bentonitteilchen auf. Die anziehenden Kräfte beginnen die Oberhand zu gewinnen, wodurch es zu einem drastischen Anstieg der Viskosität bei der Wasser-Bentonit-Suspension kommt.

2.2.2.1.1.1.2 Effekte wasserlöslicher anorganischer Elektrolyte auf Bentonitsuspensionen

Die Anwesenheit von wasserlöslichen anorganischen Elektrolyten in einer Bohrspülung kann verschiedene Ursachen haben. Sie können in eine Spülung gelangen, wenn Wasser mit einer hohen Gesamthärte zum Anmachen des Spülungssystems benutzt wird. Sehr oft gelangen anorganische Salze durch Zufluß von salzhaltigen Formationswässern in eine Spülung. Eine andere Quelle dieser Salze sind chemogenetische Formationen (Salz, Anhydrit, Gips) oder Zement nach Zementierungsarbeiten.

Wasserlösliche anorganische Salze werden oft vorsätzlich einer Spülung beigelegt, entweder als Inhibitoren oder als Beschwerungsmaterial. Normalerweise wird die Beständigkeit gegen Elektrolyte in zwei Gruppen aufgeteilt:

- Kontaminationen durch monovalente Ionen (Na, K)
- Kontaminationen durch divalente Ionen (Ca, Mg)

Kontamination durch monovalente Ionen

Monovalente Salze wie NaCl oder KCl haben keinen oder nur einen geringen Effekt auf Wasser-Bentonit-Suspensionen, wenn ihre Konzentration 1 Gew. % nicht überschreitet.

Kontamination durch divalente Ionen

Die Symptome der Kontaminationen durch divalente Ionen (hauptsächlich Ca^{2+} und Mg^{2+}) sind denen, die man im Fall von monovalenten Ionen beobachten kann, sehr ähnlich. So kommt es auch in ähnlicher Weise zu einer anfänglichen Gelierung des Systems, verbunden mit hohen Wasserverlusten und nachfolgender kompletter Flockung. Der Unterschied besteht darin, daß all diese Effekte im Vergleich zu den monovalenten Ionen bei viel niedrigeren Konzentrationen an divalenten Ionen auftreten. Außerdem ist der Kontaminationsprozeß anders. Der wahrscheinlichste Kontaminationsmechanismus durch divalente Ionen ist verbunden mit dem Kationenaustauschprozeß.

Die oben beschriebenen Kontaminationseffekte durch monovalente oder divalente Ionen können beobachtet werden, wenn die Ionen in eine bereits vorgequollene Wasser-Bentonit-Suspension gelangen. Die Situation stellt sich allerdings ganz anders dar, wenn einfacher Natrium-Montmorillonit-Bentonit einem Wasser beigefügt wird, das durch Ionen kontaminiert ist. Unter solchen Bedingungen schwillt einfacher Bentonit nicht an und bietet nicht die gewünschten Eigenschaften. In Fällen wie in diesen werden Tone der zweiten Gruppe, Tone mit Doppelkettenstruktur, eingesetzt.

2.2.2.1.1.2 Tone mit Doppelkettenstruktur

Wie bereits früher erwähnt, werden in manchen Fällen anorganische Elektrolyte wie NaCl, KCl, CaCl₂, Kalk oder Gips vorsätzlich einer Spülung beigelegt, entweder als Inhibitor oder als Beschwerungsmittel. In diesem Fall kann der einfache Bentonit nicht benutzt werden und eine besondere Art von Ton, der sog. Salzwasserton wie Attapulgit oder Sepiolith, kommt stattdessen zur Anwendung.

2.2.2.1.1.2.1 Attapulgit

Attapulgit baut Viskosität in jeder Art von Salzlösung auf, wenn er in trockenem Zustand beigelegt und genügend gesichert wird. Diese Art von Ton unterscheidet sich grundlegend von einfachem Bentonit. Während Bentonit plättchenförmig ausgebildet ist, ist Attapulgit nadelförmig. Der Mechanismus, durch den Attapulgit seine Viskosität aufbaut, wird durch die Bildung der sog. "Brush-Heap-Structure" bewirkt.

Attapulgituspülungen sind infolge ihres geringen Basenaustauschvermögens elektrolytbeständiger als Bentonit und bewahren ihre rheologischen Eigenschaften auch in Salzwasser.

2.2.2.1.1.2.2 Sepiolith

Wie der Attapulgit ist auch der Sepiolith nicht quellfähig und besitzt kein aufweitbares Gitter. Er wird als ein Glied der Mischungsreihe zwischen Fe, Al und Mg angesehen. Sepiolithe weisen ähnliche Eigenschaften wie Attapulgit auf und werden ebenfalls für salzbeständige Spülungen verwendet.

Erfahrungen an Geothermalbohrungen haben gezeigt, daß unter dem Gesichtspunkt der Temperaturstabilität Sepiolith im Vergleich zu anderen Tonen besser ist. Die Eigenschaften der Sepiolith-Suspension bleiben stabil bis zu Temperaturen von mind. 370 °C.

2.2.2.1.2 Inerte Feststoffe

Da der Formationsdruck in vielen Fällen mit einer Spülung der Dichte 1,10 - 1,25 kg/dm³ nicht zu beherrschen ist, werden der Bohrspülung Beschwerungsmittel zugesetzt. Beim Durchteufen von Salzen, die sich unter hohem Gebirgsdruck plastisch verhalten, beschwert man die Bohrspülung, um das Eindringen des Salzes in das Bohrloch zu verhindern. Bei diesen Beschwerungsmitteln handelt es sich um inerte nützliche Feststoffe. Diese Feststoffe dürfen die gewünschten Eigenschaften der Bohrspülung durch Reaktionen nicht nachteilig beeinflussen. Bei der Auswahl der geeigneten Beschwerungsmittel sind dessen Dichte, Korngrößenverteilung und Verunreinigungen zu berücksichtigen. Die optimale Korngröße des Beschwerungsmittels liegt zwischen 10 und 100 μ . Partikel größer als 100 μ sedimentieren leicht in der Spülung, während Partikel kleiner als 10 μ stark viskositätserhöhend wirken.

Tab. 1: In der Erdölindustrie Verwendung findende Beschwerungsmittel

Beschwerungsmittel	Chem. Formel	spez. Gew. kg/dm ³	Löslichkeit in Säure
Kreide/Calcit	CaCO ₃	2,6 - 2,7	löslich
Eisencarbonat	FeCO ₃	3,8	löslich
Schwerspat (Barit)	BaSO ₄	4,2 - 4,3	unlöslich
Hämatit (Eisenoxid)	Fe ₂ O ₃	5,2	löslich

2.2.2.2 Überflüssige Feststoffe

Als überflüssige Feststoffe in der Spülung bezeichnet man die ungewollt in das System eingebrachten Feststoffe aus der Formation, das Bohrklein. Das zutage geförderte Gestein sollte so effektiv wie möglich von der Spülung getrennt werden. Nur eine "saubere" Spülung behält ihre ursprünglichen Eigenschaften und hilft, Probleme zu vermeiden wie schlechter Bohrfortschritt, Spülungsverluste, Havarien, geschädigte Lagerstätten, hohe Behandlungskosten etc.

2.2.3 Polymere

Auf der Suche nach neuen Energieressourcen - Erdöl, Erdgas, Geothermik - werden Bohrungen in immer größere Tiefen und immer heißere Regionen der Erdkruste abgeteuft. Dadurch wachsen die Anforderungen, die sowohl an das technische Gerät als auch an die Bohrspülungen gestellt werden. Während zu Beginn dieses Jahrhunderts noch einfache Ton-Wasser-Spülungen verwendet wurden, gelangten etwa ab 1930 Polymere zur Optimierung der Spülungseigenschaften zum Einsatz.

Spülungstechnisch kommen fast ausschließlich wasserlösliche Polymere zur Anwendung. Wirklich wasserlösliche Polymere bilden reine Lösungen, und doch sollten auch jene Hydrokolloide dazugerechnet werden, die eher in Wasser dispergieren und quellen, statt sich zu lösen.

Wasserlösliche Polymere, die auch oft gleichzeitig Schutzkolloide sind, gehören heute zu den Hauptbestandteilen der Bohrspülung: Ohne sie ist eine Stabilität der feststofffreien Spülung oder eine ausreichend hohe oder schnelle Verdickung feststofffrei nicht möglich.

Die Herkunft eines Polymers kann natürlicher, modifizierter oder synthetischer Art sein. Natürliche Polymere sind jene, die ohne wichtige chemische Veränderungen der Polymerstruktur eingesetzt werden. Wenn chemische Modifikationen oder gar völlig neue Polymere durch ein oder mehrere Arten Monomere produziert werden, spricht man von Modifikationen oder synthetischen Polymeren.

Eine Klassifizierung von Polymeren kann wie folgt vorgenommen werden:

- natürliche Polymere (native)
- modifizierte natürliche Polymere (halbsynthetische)
- chemische hergestellte Polymere (synthetisch)

Im Laufe der Zeit hat sich für die in der Bohrspülung eingesetzten Polymere die Bezeichnung "Schutzkolloide" eingebürgert. Je nach ihrem strukturellen Aufbau erfüllen die Polymer jedoch unterschiedliche Aufgaben.

Tab. 2: Polymertypen und ihre Funktion in Bohrspülungen

Polymertyp	Funktion
<u>Nativ:</u>	
XC-Polymer	Viskositätsregulierung / Thixotropie
Guar Gum	Viskositätsregulierung
Stärke	Filtratreduzierung
<u>Halbsynthetisch, chemisch modifiziert:</u>	
modif. Stärke	Filtratreduzierung
Na-CMC	Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid
CMHEC	Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid
HEC	Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid
<u>Vollsynthetisch:</u>	
Polyacrylat	Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Dispergiermittel / Flockungsmittel
Polyacrylamid	Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Flockungsmittel / Toninhibierung
Polyacrylnitril	Filtratreduzierung/Viskositätsstabilisierung / Dispergiermittel
Polyvinylsulfonate/Copolymere	Filtratreduzierung/Viskositätsstabilisierung / Dispergiermittel

Von Polymeren sind in der Spülungstechnik zwei Kenngrößen von wesentlichem Interesse:

- Polymerisationsgrad: Unter diesem Begriff verstehen wir die Zahl der Monomere, die in einem Polymer vereinigt sind.

Der Polymerisationsgrad ist ein Maß für die Viskosität einer Polymerlösung.

- Substitutionsgrad (Verätherungsgrad): Der Verätherungsgrad gibt die Durchschnittszahl der aktiven Anionen pro Monomer an.

3 Anforderungen an eine Spülung beim Seilkernbohrverfahren

Das Seilkernbohrverfahren ist eine sehr vorteilhafte moderne Technik, die das Ziehen eines Bohrkerns ermöglicht, ohne daß der Ausbau des Bohrgestänges mit Kernwerkzeug notwendig wird. Das komplette Bohrgestänge muß nur ausgebaut werden, wenn das Kernwerkzeug verschlissen ist und durch ein neues ersetzt werden muß. Je höher die Standzeiten des Kernwerkzeuges, um so effektiver die Arbeiten. Dieses ist insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht von großer Bedeutung, da normalerweise sehr teure Diamantwerkzeuge benutzt werden.

Feststoffphasen wirken sich beim Seilkernverfahren wegen ihrer abrasiven Eigenschaften negativ aus. Aufgrund von Labor- und Felderfahrungen ist bekannt, daß die Lebensdauer eines Bohrwerkzeuges erheblich verlängert werden kann, wenn die Spülung gute Schmiereigenschaften aufweist und damit die Reibung zwischen Kernwerkzeug und Gestein vermindert wird. Beim Seilkernbohren ist der Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand immer sehr eng. Daraus folgt, daß auch das Bohrgestänge einem erheblichen reibungsbedingten Verschleiß ausgesetzt wird. Gleichzeitig muß man berücksichtigen, daß die Drehgeschwindigkeit des Bohrstranges, die beim Seilkernbohrverfahren angewendet wird, sehr hoch ist (150 - 250 U/min). Höhere Drehgeschwindigkeiten verursachen eine schnellere Abnutzung des Bohrgestänges, weshalb ein Spülungssystem mit guten Schmiereigenschaften eingesetzt werden muß. Geringer Ringraum zwingt dem Spülungssystem auch andere Einschränkungen auf, d. h. bei einem sehr engen Ringraum sollte das Absetzen eines dicken Filterkuchens nicht ermöglicht werden. Der Filterkuchen verringert einen bereits engen Ringraum, kann so ein übermäßiges Drehmoment bewirken und erhöht das Risiko, das Gestänge festzufahren. Schmäler Ringraum kann noch ein anderes Problem in Verbindung mit dem Fließwiderstand im Zirkulationssystem hervorrufen. Beim konventionellen Bohren ist der Druckverlust im Ringraum normalerweise kleiner als im Bohrgestänge. Beim Seilkernbohrverfahren ist die Situation entgegengesetzt. Sehr enger Ringraumplatz bewirkt einen viel höheren Fließwiderstand im Ringraum als im Bohrgestänge.

Es stellt sich die Frage, welches die optimale Geschwindigkeit der Spülungsflüssigkeit in einem so engen Ringraum ist. In einer aufsteigenden Spülung werden sich die erbohrten Partikel aufwärts bewegen, wenn die Geschwindigkeit der Flüssigkeit größer ist als die Sinkgeschwindigkeit der darin befindlichen Partikel. Die Partikel sinken jedoch in der aufsteigenden Spülung nach unten, so daß die Aufstiegsgeschwindigkeit des Bohrkleins geringer ist als die Ringraumgeschwindigkeit. Die Bohrlochsäuberung kann als sog. Transportquote durch folgende Formel definiert werden:

$$\text{Transportquote} = \frac{V_c}{V_a} = 1 - \frac{V_s}{V_a}$$

$$\text{da } V_c = V_a - V_s$$

Dabei ist V_c die Aufstiegs geschwindigkeit des Bohrkleins, V_a die Ringraumgeschwindigkeit der Spülungsflüssigkeit und V_s die Sinkgeschwindigkeit des Bohrkleins.

Normalerweise sollte eine Spülung, um übermäßigen Fließwiderstand zu vermeiden, eine niedrige Viskosität haben und keine bzw. wenig Feststoffe enthalten. Das beim Seilkernen erzeugte Bohrklein ist in der Regel von geringer Größe und die Austragsverzögerung ebenfalls niedrig, so daß es eigentlich nicht notwendig ist, sich über die Tragfähigkeit Gedanken zu machen. Als Folgerung kann man empfehlen, daß grundsätzlich feststofffreie Spülungen mit guten Schmiereigenschaften in Erwägung gezogen werden sollten, wenn Bohrungen mit dem Seilkernbohrverfahren geplant werden.

Die bisherigen Ausführungen führen zu dem Schluß, daß

- Süßwasser - Systeme
- Süßwasser - Schmiermittel - Systeme
- Süßwasser - Polymer - Systeme

berücksichtigt werden sollten. Nachfolgend werden all diese Systeme diskutiert und unter dem Aspekt ihrer Haupteigenschaft miteinander verglichen.

3.1 Süßwasser-System

Wasser ist das einfachste Spülungssystem, welches in vielen Fällen die grundsätzlichen Funktionen beim Bohren erfolgreich erfüllen kann. Die wahrscheinlich vorteilhafteste Charakteristik eines Wasser-Spülungssystems besteht darin, daß dieses System einen guten Bohrfortschritt erzielt. Da Wasser fast keine Viskosität aufweist, säubert es die Oberfläche des Bohrlochs sehr effektiv und ermöglicht einen festen Kontakt des Bohrwerkzeuges auf das zu durchteufende Gestein. Gleichzeitig, da ein reines Wasser-System keine Feststoffe enthält, wird auch kein Filterkuchen auf dem Bohrlochboden deponiert. Demzufolge ist der Bohrfortschritt im Vergleich zu feststoffhaltigen Spülungssystemen hoch.

Eine weitere vorteilhafte Eigenschaft des Wasser-Systems besteht darin, daß dieses System durch thermische Belastung nicht negativ beeinflusst wird, elektrolytbeständig ist und daher keine besondere Behandlung notwendig macht. Abschließend sei noch gesagt, daß das Wasser-System normalerweise leicht verfügbar und kostengünstig ist.

Andererseits hat dieses System eine Anzahl negativer Seiten, die seine Einsatzfähigkeit einschränken. Vor allen Dingen besitzt Wasser keine Schmierfähigkeit und kann einen sehr schnellen Reibungsverschleiß des Bohrwerkzeugs und -Gestänges nicht vermindern. Zweitens besitzt Wasser wie schon erwähnt keine Viskosität. Das ist zwar sehr vorteilhaft aus der Sicht des Bohrfortschritts, kann aber Schwierigkeiten hinsichtlich des Bohrkleintransportes im Ringraum mit sich bringen. Normalerweise müssen hohe Zirkulationsraten angewandt werden, um dieses Problem zu bewältigen. Natürlich bewirken hohe Zirkulationsraten Turbulenzen und ziemlich hohe Druckverluste im Zirkulationssystem. Das Fehlen jeglicher Thixotropie verursacht, daß die Cuttings sehr schnell absinken, wenn die Zirkulation unterbrochen oder gestoppt wird. Dies kann sowohl Probleme bei der Kernentnahme, als auch bei der Wiederaufnahme der Rotation des Bohrgestänges verursachen.

3.2 Süßwasser-Schmiermittel-System

Wie bereits erwähnt, ist es wünschenswert, daß eine fürs Seilkernen vorgesehene Spülung gute Schmiereigenschaften besitzt. Aus der Geschichte wissen wir, daß Dieselöl, emulgiert in Wasser, als erstes Schmiermittel eingesetzt wurde. Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Schmiermittel wurden entsprechende Spezial-Schmiermittel entwickelt, die z. T. wasserlöslich und biologisch abbaubar sind.

3.2.1 Wasser-Öl-System (Öl-in-Wasser-Emulsion)

Man hat angenommen, daß der Einsatz einer Öl-in-Wasser-Emulsion als Spülung mehrere Vorteile bieten würde, wie z. B. erhöhter Bohrfortschritt, längere Lebensdauer des Bohrwerkzeuges, verminderter Verschleiß des Bohrgestänges. Die Definition eines Öl-in-Wasser-Systems besteht darin, daß das Öl die unkontinuierliche Phase bildet, während das Wasser in der externen (kontinuierlichen) Phase bleibt. Um eine solche Emulsion herzustellen, reicht es aus, Öl kräftig mit Wasser zu mischen.

Eine unter solchen Bedingungen hergestellte Emulsion wird oft als mechanische Emulsion bezeichnet. Bei einer mechanischen Emulsion wird das Öl sehr lose emulgiert und die Emulsion ist verhältnismäßig beständig, solange kräftiges Mixen (z. B. durch Zirkulation) aufrechterhalten wird. Wenn die Bewegung unterbrochen wird, neigt die Emulsion innerhalb kurzer Zeit dazu, sich wieder in Öl- und Wasserphase zu entmischen.

Eine beständigere Emulsion kann durch Emulgierung des Öls mittels chemischer Emulgatoren geschaffen werden, die sog. chemische Emulsion. Emulgatoren, auch als Netzmittel, arbeiten auf zwei verschiedene Arten:

- die Oberflächenspannung wird reduziert, um die Bildung kleiner Öltröpfchen zu erleichtern,
- die Moleküle des Emulgators bilden einen sehr festen Film um die Öltröpfchen an der Kontaktfläche mit dem Wasser.

Unter dieser Voraussetzung ist die Emulsion unter statischen Bedingungen beständig.

Ein chemischer Emulgator besteht aus einer Kette, an der sich sowohl hydrophile als auch hydrophobe Gruppen befinden. Es werden zwei Arten von Netzmitteln als Emulgatoren eingesetzt:

- anionische Netzmittel
- nichtionische Netzmittel

Die nichtionischen Netzmittel sind vielseitiger und haben somit eine breitere Einsatzfähigkeit gefunden. Unter den nichtionischen Netzmitteln sind die bekanntesten auf Ethylenoxid und Nonylphenol basierende Verbindungen.

3.2.2 Wasser-Spezialschmiermittel-System

Es ist von Labortests und aus Felderfahrungen wohlbekannt, daß sogar die beste Öl-in-Wasser-Emulsion unzureichend ist für die Schmierung des Bohrgestänges unter extremer Belastung und hohen Drehzahlen. Auch einige andere Schmiermittel wie Graphit, Molybdänsulfit oder Silikonöle sind unter extremen Bedingungen für nicht gut genug befunden worden. Unter diesen Bedingungen muß ein Spezialschmiermittel angewendet werden, welches einen widerstandsfähigen Film auf reibenden Metalloberflächen bildet. Mehrere chemisch unterschiedliche Verbindungen können als Spezialschmiermittel benutzt werden, aber langkettige Alkohole, schwefelhaltige Fettsäuren und Mischungen von modifizierten Triglyzeriden und Alkohol haben den breitesten Anwendungsbereich gefunden. Diese Schmiermittel sind ohne den Einsatz von Emulgatoren leicht in Wasser emulgierbar. Versuche mit wasserlöslichen Polyalkylenglykolen haben ebenfalls zu sehr guten Ergebnissen bezüglich der Schmiereigenschaften geführt.

Ein paar Anmerkungen sollten auch zur Schmierfähigkeit einer Öl-in-Wasser-Emulsion gemacht werden. Felderfahrungen bestätigen alle vorher erwähnten Vorteile wie erhöhte Lebensdauer des Bohrwerkzeuges, verminderte Abnutzung des Bohrgestänges etc. Trotzdem ist es aus theoretischer Sicht ziemlich schwierig zu beweisen, daß all diese Vorteile ein Resultat der Schmierungseigenschaften des Öls sind. Man muß sich vor Augen halten, daß bei einer vernünftig emulgierten Emulsion Öl die interne Phase ist, die von Wasser umgeben ist. Einfach gesagt hat das Öl unter solchen Bedingungen keinen direkten Kontakt mit reibenden Oberflächen und daher kann eine Schmierwirkung des Öls auch nicht erwartet werden. Bis zu einem gewissen Grad ist der erwähnte Kontakt aber möglich, wenn das Öl nur leicht emulgiert ist. Diese Folgerungen sind mehrmals durch Labortests bestätigt worden. Es scheint, daß positive Felderfahrungen mit Öl-in-Wasser-Emulsionen das kombinierte Resultat mehrerer Effekte ist, wie das Vorhandensein von Öl, niedrige Oberflächenspannung, bessere Benetzbarkeit metallener Oberflächen und Schmierwirkung von Emulgatoren.

3.2.3 Einfluß verschiedener Faktoren auf das Süßwasser-Schmiermittel-System

Wie bei allen anderen Spülungen wird auch das Süßwasser-Schmiermittel-System negativen Einflüssen verschiedener Faktoren ausgesetzt.

3.2.3.1 Temperatur

Es ist allgemein bekannt, daß erhöhte Temperaturen erhöhte Mobilität der flüssigen Moleküle mit sich bringt und daher verringert sich allgemein gesagt die Beständigkeit der Öl-in-Wasser-Emulsion bei steigenden Temperaturen. Gleichzeitig bewirkt eine hohe Temperatur eine Änderung des hydrophilen Gleichgewichtes der Emulgatoren, welches darin resultiert, daß die Emulsion dazu neigt, wieder auseinanderzubrechen.

3.2.3.2 Elektrolyten

Im allgemeinen ist die Beständigkeit der Öl-in-Wasser-Emulsion gegen Elektrolyte eine Funktion des chemischen Charakters des zum Mischen der Emulsion benutzten Emulgators. Die nichtionischen Emulgatoren sind chemisch gesehen schwach reaktiv und daher tolerieren solche Emulsionen allgemeine Kontaminationen durch mono- und divalente Ionen ganz gut. Problematisch kann es bei sehr hohen Kontaminationskonzentrationen werden, da eine Ausfällung des Emulgators stattfinden kann mit nachfolgender Enstabilisierung der Emulsion.

3.2.3.3 pH-Einfluß

Die Wasser-Schmiermittel-Systeme arbeiten zufriedenstellend in einem ziemlich breiten pH-Bereich, d. h. von 6 - 13.

3.2.3.4 Scherstabilität

Ein Scherstabilitätsproblem hinsichtlich Öl-in-Wasser-Emulsion ist noch nie beklagt worden. Moderne Emulgatoren haben eine hochmolekulare polymerische Struktur und könnten theoretisch einem Abbau durch hohe Scherraten in der Zirkulation ausgesetzt werden.

3.2.3.5 Biologischer Abbau

Obwohl einige Biochemiker behaupten, daß es keine chemische Substanz gibt, die nicht von bestimmten Bakterienarten "konsumiert" werden könne, werden die Emulgatoren in einer Öl-in-Wasser-Emulsion als nicht biologisch abbaubar angesehen. Der Grad des biologischen Abbaus hängt selbstverständlich von der chemischen Struktur der einzelnen Emulgatoren ab.

3.2.4 Positive und negative Aspekte der Süßwasser- und Süßwasser-Schmiermittel-Systeme

Alle bisher beschriebenen feststofffreien Systeme haben ihre bestimmten Vorteile, aber gleichzeitig auch negative Seiten. Ein reines Wasser-System hat z. B. keine Viskosität und keine Schmierung. Das Öl-in-Wasser-System hat eine bestimmte Viskosität aufgrund des Vorhandenseins von Öl, aber seine Schmierungseigenschaften sind etwas fraglich. Das Wasser-Spezialschmiermittel-System hat ohne Frage exzellente Schmiereigenschaften, dafür ist eine Viskosität so gut wie nicht vorhanden.

Die Tatsache, daß alle bisher beschriebenen Systeme keine Viskosität und überhaupt keine Thixotropie haben, ist sehr unvorteilhaft. Die Tragfähigkeit solcher Systeme ist sehr schlecht, daher müssen sehr hohe Ringraumgeschwindigkeiten angewandt werden, um einen ausreichenden Cuttings-Transport sicherzustellen. Offensichtlich verursachen sehr hohe Zirkulationsraten übermäßigen Druckverlust im Zirkulationssystem.

Im Falle einer Öl-in-Wasser-Emulsion und eines Wasser-Spezialschmiermittel-Systems ist die Gegenwart von Öl oder Spezialschmiermittel teilweise ein Schutz gegen Korrosion für die Bohrgarnitur. Das ist in einem reinen Wasser-System nicht der Fall. Der pH-Wert von Wasser, das als Spülung benutzt wird, kann von 6,5 bis 7,5 reichen, abhängig von den Typen und der Menge der darin gelösten anorganischen Elektrolyte. Ein reines Wasser-System ist daher etwas korrosiver.

3.3 Wasser-Polymer-System

Unter den feststofffreien Spülungen hat das Wasser-Polymer-System die breiteste Anwendung gefunden. Das liegt darin begründet, daß Polymere ein vielseitiges Material darstellen, welches gleichzeitig gewünschte Viskosität (rheologische Eigenschaften) und annehmbare Schmierung aufweist.

Es gibt viele Gruppen von Spülungspolymeren, die einige Verwirrung bei Klassifizierung verursachen können. In dieser Ausarbeitung werden die Polymere in drei Gruppen (Tab. 2) aufgeteilt:

- Native Polymere (Polymere natürlicher Herkunft)
- Halbsynthetische Polymere (modifizierte native Polymere)
- Synthetische Polymere (auf vollkommen synthetische Art produziert)

Zur Optimierung von wasserbasischen Bohrspülungen werden heute bevorzugt Guar Gum, Stärke, XC-Polymer, modifizierte Stärke, modifizierte Cellulose, Polyacrylate und Copolymere, sowie Vinylsulfonat/Vinylamid-Copolymere eingesetzt.

3.3.1 Native Polymere

3.3.1.1 Guar Gum

Guar Gum stammt aus dem Samen der Guar-Pflanze "Cyanopsis tetragonolobus Familie der Leguminosa". Die Studie der Guar Gum-Struktur zeigt, daß dies ein verzweigtes CoPolymer ist und das Rückgrat des Polymers aus MannoseEinheiten besteht. Jede Mannose-Einheit ist mit einem Galaktose-Zweig verbunden.

Die beiden Monomere - Mannose und Galaktose - sind einfache Kohlenhydrate. Guar Gum gehört zur Gruppe der Polysaccharide und wird fast ausschließlich als ein viskositätsbildendes Additiv eingesetzt. Schon bei geringer Einsatzkonzentration erhält man sehr hohe Viskositätserträge.

Die Viskosität eines Wasser-Guar Gum-Systems sowie die Reduktionseffekte hinsichtlich Scherverdünnung und Fließwiderstand können durch einen Vernetzungsprozeß mit Hilfe von Metallionen wie z. B. Bor, Chrom, Antimon, Titan oder Zirkonium verbessert werden. Vernetzte Guar Gum-Lösungen werden charakterisiert durch die herausragende Fähigkeit, eine Gelstruktur unter statischen Bedingungen zu entwickeln.

3.3.1.2 Stärke

Stärke ist ein polymerisches "Carboxydrat", bestehend aus Glucopyranose-Einheiten, die verbunden sind durch α -glucosidische Verbindungen.

Die chemische Formel ist $(C_6H_{10}O_5)_n$, wobei "n" von ein paar hundert bis über eine Million variiert. Stärke besteht aus Amylose (ein lineares Polymer) und Amylopektin (ein verzweigtes Polymer). Amylosemoleküle neigen dazu, sich zu orientieren und miteinander zu verbinden. Dieser Verbindungsprozeß, genannt "Retrogradation", führt zur Gelierung bei Abkühlung.

Amylopektin verbindet sich nicht geradlinig und bildet nur ein sehr schwaches Gel bei Abkühlung. Kommerzielle Quantitäten reiner Amylose oder Amylopektin sind nicht verfügbar. Alle Stärkearten sind eine Mischung der beiden Polymere. Unterschiede in den Eigenschaften, die sich auf Spülungen auswirken, sind wahrscheinlich auf Unterschiede des Amylose/Amylopektin-Verhältnisses zurückzuführen.

Wie Zellulosemoleküle sind die primären und sekundären Alkoholgruppen der Stärke in der Lage, sich Veresterungen zu unterziehen, um Carboxymethylstärke hervorzubringen oder Hydroxyethylstärke und Hydroxypropylstärke herzustellen. In der Bohrspülungstechnologie werden Stärke und ihre Derivate aus zwei Gründen eingesetzt: (1) als Filtrationskontrollmittel und (2) als Viskositätsbilder. Die Fähigkeit der Stärke, Viskosität zu bilden, ist begrenzt und im Vergleich zu anderen natürlichen Polymeren ist der Viskositätsertrag in wäßrigen Lösungen der niedrigste. Die Stärkelösungen gehören zu den pseudoplastischen Flüssigkeiten, aber ihre Pseudoplastizität ist nur schwach betont. Als Konsequenz sind Reduzierungseffekte hinsichtlich Scherverdünnung unbedeutend. Schmierungseigenschaften des Wasser-Stärke-Systems werden in vorhandener Literatur nicht erwähnt.

3.3.1.3 Xanthan Gum

Xanthan Gum, oder auch XC-Polymer, gehört zur Gruppe der Polysaccharide. XC-Polymere sind hochmolekulare Polysaccharide, produziert durch die Einwirkung von Xantomonas-Campestris-Bakterien auf Kohlenhydrate (Fermentation-Extraktion).

In der Erdöl- und Erdgasindustrie wird das XC-Polymer im Bereich Bohrspülungen sowie bei der tertiären Erdölförderung (EOR) eingesetzt.

Primäre Funktion des XC-Polymeres ist es, die Viskosität zu erhöhen, sekundär wirkt es als Filtratreduzierer.

Dieses Polymer hat mehrere einzigartige Eigenschaften, welche es von anderen Polymeren unterscheidet. Vor allen Dingen entwickelt XC-Polymer eine viel wirksamere Viskosität als andere Materialien.

Hinsichtlich seines rheologischen Charakters gehört das Wasser-XC-Polymer-System zu den pseudoplastischen Flüssigkeiten, die einen starken Scherverdünnungseffekt aufweisen.

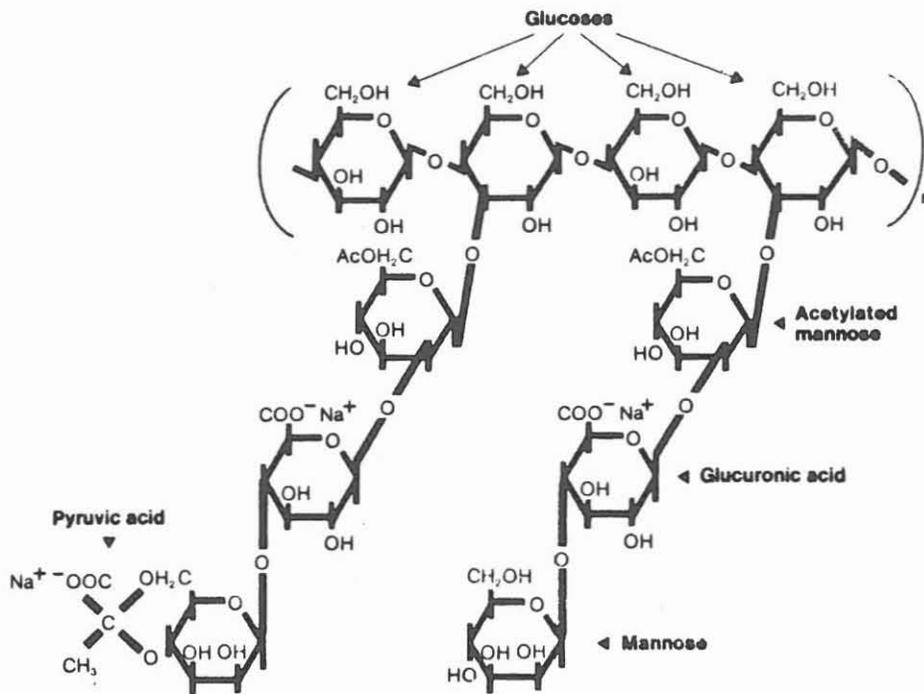


Abb. 2: Struktur von Xanthan Gum (M.G. ca. 2×10^6)

Eine weitere sehr attraktive Eigenschaft des XC-Polymeres ist seine Wirkung auf Druckverluste im Zirkulationssystem, d. h. die Fähigkeit Reibungsverlust zu reduzieren. Experimentelle Ergebnisse zeigen, daß das Wasser-XC-Polymer-System einen niedrigeren Zirkulationsdruck benötigt als das reine Wasser-System unter gleichen Strömungsbedingungen. Ferner hat das Wasser-XC-Polymer die Fähigkeit, unter statischen Bedingungen eine Gelstruktur aufzubauen. Obwohl diese Struktur mit dem stabilen Gel von Bentonit-Spülungen noch nicht zu vergleichen ist, ist es doch ein robusteres Gel als das der anderen Polymer-Systeme.

Die Viskosität und Gelstärke des Wasser-XC-Polymer-Systems kann erheblich erhöht werden durch einen sog. "Cross-Linking" Mechanismus. Dieser Mechanismus läuft in Gegenwart trivalenter Kationen wie Chrom, Bor, Aluminium ab und ist verbunden mit der Bildung eines "Olation Complexes".

3.3.1.4 Stabilitäten der nativen Polymere

3.3.1.4.1 Temperaturstabilität der nativen Polymere

Die Temperaturstabilität, oder genauer die Temperaturunbeständigkeit, ist der größte Nachteil der nativen Polymere. Der thermische Abbau der Polymere ist verbunden mit dem totalen Verlust der Viskosität und der Bildung von Korrosiven, sauer reagierenden Produkten. Der Abbau, thermische Depolymerisation, wird beschleunigt bei hohen pH-Werten und in Gegenwart von Sauerstoff.

Die thermische Depolymerisation erfolgt durch eine Spaltung der Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindung (acetal Linkage) der Polymerkette (Abb. 3) und ist ein irreversibler Vorgang.

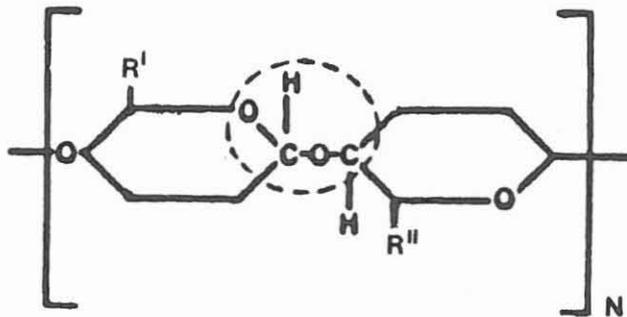


Abb. 3: Allgemeine Darstellung eines Einzelbausteines eines Polymers mit Acetal-Bindung.

Bezüglich der Grenzen der Temperaturstabilität der einzelnen nativen Polymere kann für Guar Gum 80 - 90 °C angegeben werden, Stärke und XC-Polymer sollten bei Temperaturen über 120 °C nicht mehr eingesetzt werden. Diese Werte wurden bestätigt durch zahlreiche Laborversuche und Felderfahrungen.

Die Temperaturstabilität dieser Polymer kann allerdings durch den Einsatz entsprechender Antioxidationsmittel, auch als Temperaturstabilizer bezeichnet, um bis zu 25 % gesteigert werden.

3.3.1.4.2 Elektrolytbeständigkeit der nativen Polymere

Die nativen Polymere zeigen eine außergewöhnliche Toleranz gegenüber Kontamination sowohl durch mono- als auch durch divalente Ionen. Hauptgrund für diese Eigenschaft ist der überwiegend nichtionische Charakter dieser Polymere.

Hohe Konzentrationen an gelöstem Kalzium werden weniger toleriert, vor allem bei pH-Werten die über 11 liegen. Bei Konzentrationen größer 300 g/l Kalziumchlorid und hohem pH-Wert wird z. B. Stärke ausgefällt, Guar Gum und XC-Polymer bilden ein Gel.

3.3.1.4.3 Einfluß des pH-Wertes auf die Eigenschaft der Polymere

Der optimale Viskositätsertrag von Guar Gum in wäßrigen Lösungen tritt ein bei pH-Werten zwischen 6 und 9. Bei höheren pH-Werten wird ein bestimmter Viskositätsabfall beobachtet. Dieses liegt wahrscheinlich an dem Zerbrechen der Polymeraggregate und den Veränderungen in der Geometrie der Mannose- und Galaktose-Ringe.

Das Wasser-Stärke-System arbeitet gut in dem gewöhnlich verwendeten pH-Bereich. In saurer Umgebung depolymerisieren die Stärkemoleküle sehr schnell (Hydrolyseprozeß). Leichte Spaltung der sauren Verbindungen durch Säuren resultiert in der Bildung einfacher Kohlenhydrate, deshalb sind pH-Werte im alkalischen Bereich (7 - 10) vorzuziehen. Wird dieses System allerdings über lange Zeit hohen pH-Werten (>10) ausgesetzt, führt das ebenfalls zum Abbau der Stärkemoleküle.

Der pH-Wert des Wasser-XC-Polymer-System sollte innerhalb eines Bereiches von 5,0 - 10,0 gehalten werden. Höhere Werte beschleunigen den thermischen Abbau und bewirken, daß die Kalziumkontamination weniger toleriert wird.

3.3.1.4.4 Beständigkeit der nativen Polymere gegenüber Scherkräften

Bei hohen Zirkulationsraten und hohen Drehgeschwindigkeiten des Bohrgestänges unterliegen alle Polymere mehr oder weniger einem Abbau. Das Wasser-Stärke-System überragt die anderen Polymersysteme hierbei in negativen Sinn, da es bei hohen Scherraten einen schnellen Abbau unterliegt. Das Guar-Gum-System unterliegt zwar auch einen Abbau, im Vergleich zu Stärke erhält man aber deutlich bessere Resultate. Die besten Ergebnisse erzielt man bei XC-Polymer. Die erhöhte Scherstabilität dieses Polymers kann man auf die längeren Seitenketten zurückführen, die das XC-Polymer stabilisieren. Diese Ergebnisse wurden durch Felderfahrungen bestätigt.

3.3.1.4.5 Biologischer Abbau

Als natürlich produzierte Polysaccharide sind die nativen Polymere nicht toxisch und vollständig biologisch abbaubar. Da diese Polymere äußerst empfindlich gegen bakteriellen Befall sind, müssen Spülungssysteme, in denen Polymere dieser Gruppe eingesetzt werden, ständig beobachtet werden. Bakterienbefall macht sich dadurch bemerkbar, daß die Viskosität des Systems absinkt, die Filtratwerte ansteigen, sowie der pH-Wert absinkt. Ein unangenehmer Geruch der Bohrspülung ist ebenfalls zu bemerken. Ist ein Spülungssystem befallen, oder soll es vor einem Befall geschützt werden, so muß diesem System ein Bakterizid zugesetzt werden, um einer Fermentation jeder Art vorzubeugen. Spülungssysteme mit hoher Salzkonzentration oder hohem pH-Wert bieten ebenfalls einen begrenzten Schutz vor Fermentation der Polymere. Vor allem bei der Einlagerung der Spülung kann auf eine Behandlung mit Bakterizid nicht verzichtet werden.

3.3.2 Halbsynthetische Polymere

3.3.2.1 Modifizierte Stärke

In der Erdöl- und Erdgasindustrie wird als modifizierte Stärke fast ausschließlich das Natrium-Amylopektinglycolat, auch als Carboxymethylstärke (CMS) bezeichnet, eingesetzt. Das Ausgangsmaterial für die Herstellung von Carboxymethylstärke ist Stärke und eine Monohalogenfettsäure.

Für die Herstellung der Carboxymethylstärke wird eine native Stärke, meist Kartoffel- oder Maisstärke, und Mono-Chlor-Essigsäure in alkalischem Milieu zur Reaktion gebracht (WILL-JAMSON-Äthersynthese). Unter diesen Bedingungen erhält man die CMS in der natürlichen Kornform der Stärke. Durch entsprechende Reinigungsvorgänge läßt sich die CMS von noch anhaftenden Chemikalien befreien und wird anschließend über Walzenstuhl oder Sprühtrockner getrocknet.

Der Substitutionsgrad der bei dieser Synthese erhaltenen Modifikationen ist relativ niedrig, er schwankt zwischen 0,1 - 0,2.

3.3.2.2 Natriumsalze der Carboxymethyl-Cellulose

Die Natriumsalze der Carboxy-Methyl-Cellulose, auch als Na-CMC bezeichnet, werden aus den Rohstoffen Cellulose und Mono-Chloressigsäure hergestellt. Diese Reaktion findet wie die Modifikation der Stärke in alkalischem Milieu statt. Je nach Kettenlänge der eingesetzten Cellulose wird niedrig-, mittel oder hochviskose Na-CMC hergestellt. Die Auswahl der Rohstoffe und des Syntheseverfahrens führen zur Herstellung verschiedener Qualitäten. Zur Zeit werden drei Qualitäten angeboten:

- technische Carboxy-Methyl-Cellulose (CMC-technisch)
- gereinigte Carboxy-Methyl-Cellulose (CMC-pure)
- Poly-Anionische-Cellulose (PAC)

Die Struktur aller drei Qualitäten ist identisch.

Bei der Synthese von Na-CMC entsteht als Nebenprodukt Natriumchlorid sowie freies Glycolat. Werden diese Nebenprodukte nicht durch einen Reinigungsprozeß entfernt, so wird diese Mischung als technische CMC bezeichnet.

Bei der Na-CMC pure handelt es sich um eine von diesen Nebenprodukten gereinigte technische CMC. Der Reinigungsprozeß bewirkt, daß das Endprodukt (CMC-pure) effektiver wirkt aufgrund der höheren Konzentration der aktiven Komponente. Die Produktion von Poly-Anionischer Cellulose erfolgt in speziellen Anlagen, in denen eine Qualität produziert werden kann, die in Lebensmitteln zum Einsatz kommt. Die hierbei verwendeten Rohstoffe werden sehr sorgfältig ausgesucht, und durch optimale Verfahrenssteuerung erreicht man eine höhere, gleichmäßigere Substitution. Na-CMC hat, wenn alle Hydroxylgruppen substituiert sind, einen Substitutionsgrad (DS) von 3,0. Gewöhnlich beläuft sich der DS auf einen durchschnittlichen Wert im Bereich von 0,70 - 0,90 für technische sowie gereinigte Na-CMC und Werten im Bereich von 0,90 - 1,2 für PAC.

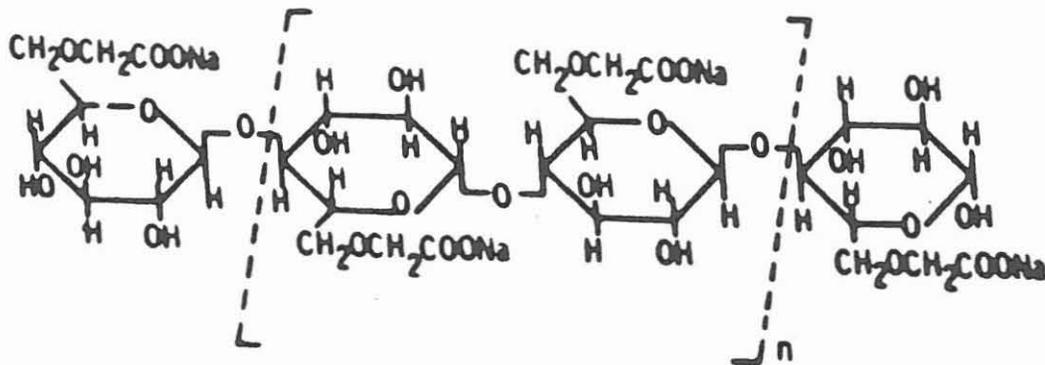


Abb. 4: Struktur einer Na-CMC mit DS = 1,0

In der Bohrspülungstechnologie wird CMC für die folgenden Zwecke eingesetzt:

- als Viskositätsbildner (Viskositätserhöhungsmittel)
- als Filtrationskontrollmittel (zur Kontrolle der Wasserabgabe aus der Spülung an die Formation)

3.3.2.3 Hydroxyethylcellulose

Hydroxy-Ethyl-Cellulose (HEC) gehört wie die Na-CMC zur Gruppe der Celluloseether, d. h. sie haben die gleiche Grundstruktur (Aufbau der Polymerkette auf Basis Cellulose). Je nach eingesetzter Rohstoff-Cellulose erhält man als Endprodukt eine niedrig-, mittel- oder hochviskose HEC.

Die Bildung eines HEC-Polymers erfolgt durch die Reaktion einer mit Natriumhydroxid versetzten Cellulose mit Ethylenoxid.

Obwohl Hydroxyethyl-Cellulose grundsätzlich auch ein Cellulosepolymer ist, unterscheiden sich seine Eigenschaften von denen einer wäßrigen CMC- oder PAC-Lösung. Bei CMC und PAC handelt es sich um Anionen-aktive-Polymere, wobei die Hydroxyethyl-Celluloseäther nichtionische Produkte sind.

Wie bei der Carboxymethyl-Cellulose besitzt ein vollständig substituiertes HEC einen Substitutionsgrad von drei. Der sog. Substitutionsgrad (DS) stellt die durchschnittliche Anzahl der Hydroxyl-Gruppen der Anhydroglucoseeinheit dar, die mit Ethylenoxid reagiert haben.

Die sehr gute und schnelle Wasserlöslichkeit wird durch einen hohen Substitutionsgrad und genau ausgewählten Reaktionsbedingungen erreicht. Die ideale Struktur eines HEC-Äthers besitzt einen DS=1,5 und MS=2 bis 2,5. In der Praxis werden HEC-Typen mit einem DS=0,9-1,0 und MS=1,8 2,5 eingesetzt. Je nach Herstellungsverfahren und eingesetztem Rohstoff kann HEC in verschiedenen Viskositätsgraden hergestellt werden. Wie beim Na-Salz der CMC unterscheidet man drei Viskositätsstufen: niedrig-, mittel- und hochviskose HEC-Polymere.

Ähnlich anderen Cellulosepolymeren wird HEC in der Bohrtechnik für die folgenden beiden Zwecke eingesetzt:

- als Viskositätsbildner (Viskositätserhöhungsmittel)
- als Filtratreduzierer (Schutzkolloid)

3.3.2.4 Carboxymethylhydroxyethylcellulose

Carboxy-Methyl-Hydroxy-Ethyl-Cellulose (CMHEC) kann als Mischäther bezeichnet werden. Sie enthält neben Hydroxyethyl-Gruppen noch Carboxymethyl-Gruppen, die diesem Polymer einen anionischen Charakter verleihen. Zur Herstellung dieser Mischäther verwendet man als Rohstoff die Cellulose, wie sie bei der Herstellung von Na-CMC und HEC eingesetzt wird. Nach der Reaktion der Cellulose mit Natriumhydroxid zu Alkalicellulose erfolgt entweder zuerst die Carboxymethylierung durch Umsetzung mit Chloressigsäure und anschließender Reaktion mit Ethylenoxid, oder man setzt zuerst Ethylenoxid ein und carboxymethyliert danach.

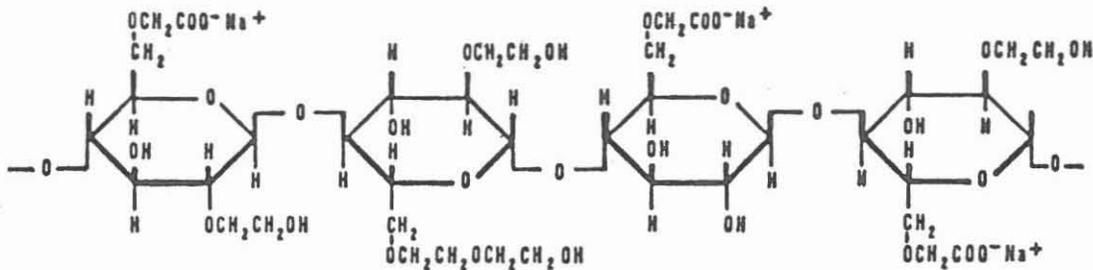


Abb. 5: Struktur einer Carboxymethylhydroxyethylcellulose

Der Verätherungsgrad an Carboxymethyl-Gruppen wird als DS bezeichnet, und gibt wie bei Na-CMC und HEC die durchschnittliche Anzahl der an der Reaktion beteiligten Hydroxyl-Gruppen einer Anhydroglucoseeinheit an. Durch die Umsetzung mit Ethylenoxid, kann wie bei der HEC eine Polymerisation zur Bildung langer Seitenketten erfolgen.

Wegen der nicht genauen Lokalisierung dieser Hydroxyethyl-Gruppen wird der Grad der Umsetzung als Massensubstitution (MS) bezeichnet. Je höher die MS, d. h. die Zahl der eingeführten Hydroxyethyl-Gruppen, desto ausgeprägter ist der hydrophile Charakter, und ein rasches Anquellen sowie die gute Löslichkeit in kaltem und warmem Wasser wird dadurch erreicht.

Bei den zur Zeit in Bohrspülungen eingesetzten CMHEC-Typen handelt es sich um technische Qualitäten, die bis zu 30 % Salze enthalten. Diese Salze entstehen als Nebenprodukte bei der Äthersynthese, können aber durch entsprechende Reinigungsverfahren entfernt werden. Genau wie bei der Na-CMC und HEC kann CMHEC als niedrig-, mittel- oder hochviskoses Polymer produziert werden.

3.3.2.5 Stabilitäten der modifizierten Polymere

3.3.2.5.1 Temperaturstabilität der chemisch modifizierten Polymere

Die Viskosität der wäßrigen Polymerlösung vermindert sich langsam mit steigender Temperatur. Das ist eine normale Eigenschaft und nicht unbedingt mit dem Thermalabbau zu verbinden.

Die Wirkung eines Polymers in Lösungen oder Bohrspülungssystemen geht ganz verloren, sobald diese Lösungen oder Systeme bei Temperaturen zum Einsatz kommen, bei denen die Polymerketten gespalten werden. Der thermische Abbau der Polymerketten erfolgt am leichtesten an der Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindung ("acetal Linkage") und wird durch hohe pH-Werte, sowie in Gegenwart von Sauerstoff beschleunigt.

Laut Theorie und nach Labortests wären Cellulosepolymere nicht für Einsätze bei denen eine Bohrlochsohlentemperatur (Bottom Hole Static Temperature, BHST) von mehr als 150 °C erwartet wird, geeignet, jedoch wurde in der Praxis z. B. Na-CMC bis 170 - 180 °C BHST mit Erfolg eingesetzt,...

- da die Zirkulationstemperatur im Bohrloch (Bottom Hole Circulating Temperature, BHCT) viel niedriger (ca. 20 - 30 °C niedriger) als die statische Temperatur im Bohrloch (BHST) ist,
- da der thermische Abbau bei erhöhter Temperatur nur einen Teil der gesamten Konzentration betrifft und man diesen durch Polymer-Zugabe übertage immer ersetzen kann,
- bei vorsorglicher Überbehandlung der Spülung, d. h. es werden höhere Konzentrationen des Polymers eingesetzt, als zum Erreichen der vorgeschriebenen Parameter nötig sind. Bei höheren Bohrlochsohlentemperaturen (BHST) verschafft man sich so eine gewisse Zeit- und Aktiv-Stoff-Reserve.

Die Temperaturbeständigkeit des Systems kann erhöht werden durch Zugabe von Antioxidanten (Sauerstoffängern) wie Natriumsulfit, Ammoniumbisulfit usw., der Einsatz von Polymerstabilizern erhöht in noch größerem Maße die Beständigkeit der Bohrspülungssysteme gegenüber thermischem Abbau.

3.3.2.5.2 Elektrolytenbeständigkeit der chemisch modifizierten Polymere

Die Beständigkeit der modifizierten Polymere gegenüber Elektrolyten hängt von der Iogenität der eingeführten Gruppen ab. Polymere, die einen stark ionischen Charakter besitzen, unterliegen einer wesentlich höheren Beeinflussung hinsichtlich ihrer Eigenschaften bis hin zum totalen Verlust. Aufgrund dieser Informationen kann man die modifizierten Cellulose-Polymere in drei Gruppen einteilen:

- Na-CMC, anionisch
- HEC, nichtionisch
- CMHEC, CMS, anionisch/nichtionisch

3.3.2.5.2.1 Na-CMC

Einige Quellen, insbesondere kommerzielle Informationen, behaupten, daß sich Na-CMC ganz gut in Gegenwart von mono- sowie divalenten Ionen bewährt. Das ist nur teilweise richtig. Die Viskosität einer wäßrigen Na-CMC Lösung wird nicht stark durch monovalente Salze wie NaCl oder KCl beeinflusst, obwohl sich der Viskositätsertrag und die Filtratreduzierung (Filtration) etwas verschlechtern, wenn die Konzentration von NaCl oder KCl 4 - 5 Gew.-% beträgt.

Ist Na-CMC vor einer Kontamination durch NaCl oder KCl vollständig in Wasser gelöst, so erhält man ein um vieles beständigeres System, als wenn nach einer Kontamination die Spülung mit Na-CMC konditioniert werden soll.

Bei Präsenz von divalenten Ionen (Ca^{2+} und Mg^{2+}) ist diese Situation aber nicht so günstig. Na-CMC hat einen anionischen Charakter in wäßrigen Lösungen und ist daher chemisch aktiv und reagiert z. B. mit Kalzium oder Magnesium durch die Bildung unlöslicher CMC-Salze. Folglich muß eine Viskositätsverminderung des Systems erwartet werden. Dieser Effekt hängt zu einem großen Teil von dem Substitutionsgrad (DS) ab, und zwar je größer der DS ist, um so größer ist die Anzahl der reaktiven Gruppen pro Einheit.

Wenn die Kalziumkontamination zum Problem wird, muß das Ca^{2+} -Ion aus dem System entfernt werden und zwar durch Ausscheidung in der Form von CaCO_3 mittels Natriumkarbonat (Soda) oder Natriumbikarbonat.

3.3.2.5.2.2 HEC

HEC ist ein Cellulosepolymer mit nichtionischem Charakter. Aufgrund dieser Tatsache hat HEC den Vorteil, daß man es in sehr vielen Salzlösungen lösen kann, in denen sich andere wasserlösliche Polymere nicht lösen. In Tab. 3 sind einige anorganische Salze angegeben, in deren Lösungen HEC eingesetzt werden kann.

Tab. 3: Salzlösungen, in denen HEC sich löst (Salzgehalt der Testlösungen: 50 % Sättigungskonzentration)

Aluminiumnitrat $(\text{Al}(\text{NO}_3)_3)$	Eisensulfat $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Ammoniumchlorid NH_4Cl	Magnesiumchlorid MgCl_2
Ammoniumnitrat NH_4NO_3	Natriumacetat $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO})$
Bariumnitrat $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	Natriumchlorid NaCl
Borax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	
Kalziumchlorid CaCl_2	Natriumdichromat $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Kalziumnitrat $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Silbernitrat AgNO_3
Chromnitrat $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	Zinkchlorid ZnCl_2
Chromsulfat $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	Zinnchlorid SnCl_2

3.3.2.5.2.3 CMHEC, CMS

Die Elektrolytbeständigkeit der Polymere aus der Gruppe CMHEC und CMS liegt zwischen denen der Na-CMC und der HEC. Die Stabilität der CMHEC gegenüber Elektrolyten nimmt mit steigendem MS, d.h. die Zahl der eingeführten Hydroxyäthyl-Gruppen ist hoch, zu. Ist die Zahl der Carboxymethyl-Gruppen, verantwortlich für den anionischen Charakter, gering, so erhält man ebenfalls ein elektrolytbeständiges Polymer. Bei der Produktgruppe CMS-Polymere ist der DS ein Maß für die Stabilität dieser Polymere gegenüber Elektrolyten. DS ist die Abkürzung für den Substitutionsgrad und gibt die durchschnittliche Zahl der pro Anhydroglucoseeinheit eingeführten Carboxymethyl-Gruppen an. Da der DS dieser CMS-Polymere nicht sehr hoch ist, besitzen sie keinen sehr ausgeprägten anionischen Charakter und somit eine gute bis sehr gute Beständigkeit in Gegenwart mehrwertiger Ionen.

Die CMHEC- und CMS-Polymere werden zumeist dort eingesetzt, wo mit dem Zufluß von Kalzium- und Magnesiumlaugen zu rechnen ist, oder in Systemen, bei denen der Einsatz von Kalzium- oder Magnesiumsalzen geplant ist (Mischsalzspülungen).

3.3.2.5.3 Einfluß des pH-Wertes auf die Eigenschaften der Polymere

Die modifizierten Polymere, wie sie in der Bohrindustrie eingesetzt werden, erzielen die besten Resultate bezüglich ihrer Eigenschaften im pH-Bereich 7 - 9. Sie können auch im sauren Bereich (bis pH = 2) sowie im alkalischen Bereich (pH = 10 - 11) eingesetzt werden. Bei den als Na-Salz vorliegenden Polymeren (Na-CMC, CMS, CMHEC) erfolgt ab pH = 5 eine geringe Verdickung der Lösungen (Abb. 6). Ab $\text{pH} \leq 5$ überwiegt die weniger lösliche, freie Säure und die Viskosität steigt durch die Bildung der ungelösten, gequollenen Säure an.

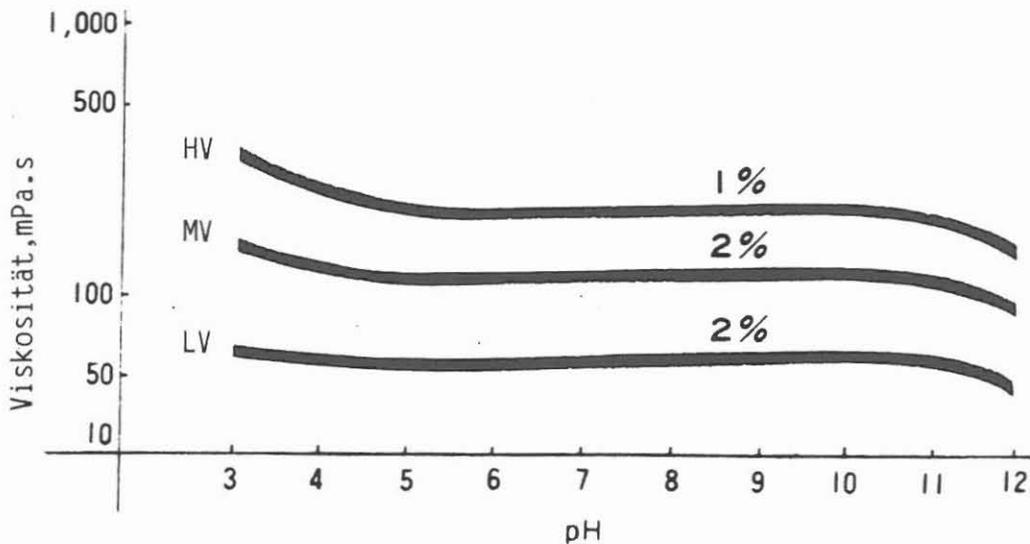


Abb. 6: Einfluß des pH-Wertes auf die Viskosität von Na-CMC-Lösungen

Ein Abbau der Celluloseketten kann durch saure Hydrolyse bei pH-Werten unter 2 erfolgen. Als Resultat erhält man wasserlösliche Polysaccharide, deren Bildung durch hohe Temperaturen beschleunigt wird. Abb. 7 zeigt am Beispiel von HEC den Viskositätsverlust einer Lösung (1 % HEC in 15 %iger Salzsäure) durch saure Hydrolyse.

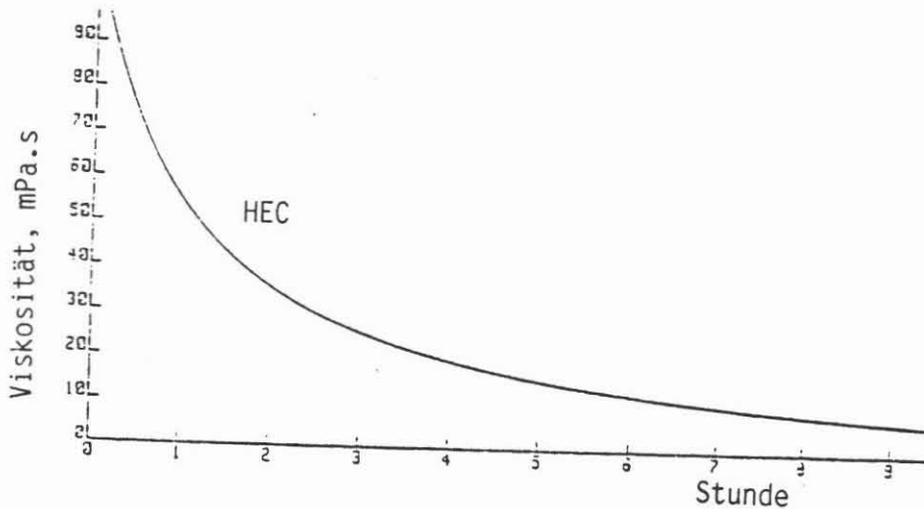


Abb. 7: Viskositätsverlust einer HEC-Lösung (1 % HEC in 15 %iger Salzsäure) durch saure Hydrolyse in Abhängigkeit von der Zeit

In hochalkalischen Systemen ($\text{pH} > 11$) erfolgt der Abbau der Celluloseketten in Gegenwart von Sauerstoff durch Oxidation. Hohe Temperaturen sowie hohe Sauerstoffkonzentrationen wirken stark beschleunigend und ein deutlicher Viskositätsabfall ist zu beobachten (Abb. 7).

3.3.2.5.4 Beständigkeit der modifizierten Polymere gegenüber Scherkräften

Fast alle Polymere, besonders die modifizierten Stärke- und Celluloseäther mit hohem Polymerisationsgrad werden durch hohe Scherkräfte, wie sie bei hohen Zirkulationsraten im System z. B. am Meißel auftreten, abgebaut. Ein deutlicher Abfall der Viskosität der Bohrspülung ist die Folge, ohne daß sich die Filtratwerte (Preßwasser) ändern. Der Grund für das Brechen der Polymerketten ist die Sauerstoff-Kohlenstoff-Bindung (Acetal-Linkage) durch die die einzelnen Einheiten miteinander verbunden sind. Durch den Abbau der Polymerketten erhöht sich der Sauerstoffgehalt in der Bohrspülung und somit auch die Korrosionsrate.

Die Beständigkeit der Polymere läßt sich durch höhere, gleichmäßige Substitution (PAC) sowie längere Seitenketten (HEC mit hohem MS) erhöhen. Bestätigt wurde dieses durch praktische Erfahrungen, besonders bei Viskositätsmessungen im Bereich der Feststoffkontrolle (Desander, Desilter, usw.).

3.3.2.5.5 Biologischer Abbau

Durch die chemische Modifikation wird die Widerstandsfähigkeit der Polymere gegenüber mikrobiologischem Angriff deutlich erhöht. Eine Immunität, wie sie in älteren Literaturquellen zum Teil angegeben wird, erreicht man dadurch jedoch nicht. Die biologische Abbaubarkeit hängt nicht unmittelbar mit dem Angriff von Bakterien zusammen. Sie wird von Enzymen verursacht, die von den Mikroorganismen abgesondert werden. Diese Enzyme (Zellulasen) bauen die Zelluloseketten in Zuckereinheiten ab, die wiederum für das Wachstum der Bakterien verantwortlich sind. Durch das Wachstum der Bakterien werden noch mehr Enzyme produziert und der Abbau der Polymer-Ketten erfolgt immer schneller. Ein totaler Verlust der durch den Polymerzusatz erhaltenen Systemeigenschaften (Viskosität, Preßwasser, ...) ist die Folge. Wenn eine infizierte Bohrspülung über einen längeren Zeitraum nicht behandelt wird, kann durch den Abbau der Polymerketten der pH-Wert bis in den sauren Bereich absinken und es kommt zu erhöhter Korrosion.

Die Gefahr eines mikrobiologischen Angriffes (Abbau der Polymere) kann auf verschiedene Arten vermindert, bzw. verhindert werden. Da nicht substituierte Anhydroglucose-Einheiten am leichtesten biologisch angreifbar sind, wäre der erste Schritt, ein Polymer mit möglichst geringer Anzahl nicht substituiertes Anhydroglucose-Einheiten einzusetzen. Eine hohe Salzkonzentration (120 - 150 g/l) sowie hohe pH-Werte (> 11) der Bohrspülungssysteme hat ebenfalls eine Stabilisierung gegenüber biologischem Abbau zur Folge.

Durch eine Erhöhung der Temperatur auf 80 - 100 °C erfolgt eine Zerstörung bzw. Desaktivierung der in die Bohrspülung eingeschleppten Zellulasen. So erreicht man bei einer Temperaturerhöhung auf 80 °C für die Dauer von ca. 30 Minuten oder 100 °C für eine Minute relativ gute Werte. Am einfachsten und erfolgreichsten ist aber immer der Einsatz von Bioziden wie Paraformaldehyd, Formaldehyd, Aldehydderivate oder quarternäre Ammoniumverbindungen. Wenn Bohrspülungen über einen längeren Zeitraum eingelagert werden sollen und Salzgehalt, pH-Wert sowie Lagertemperaturen, die zum Schutz eingehalten werden müssen, systembedingt nicht eingehalten werden können, ist es notwendig, ein Biozid hinzuzufügen. Über die genaue Anwendung sollten die Hersteller der Biozide konsultiert werden.

3.3.3 Synthetische Polymere

3.3.3.1 Polyacrylat

Die Bezeichnung "Polyacrylat" wird in dieser Studie nur für das Natriumsalz der Polyacrylsäure verwendet. Hergestellt wird Polyacrylat entweder durch radikalische Polymerisation der Acrylsäure zu Polyacrylsäure und anschließender Neutralisation mit Natriumhydroxid oder durch radikalische Polymerisation von Acrylnitril zu Polyacrylnitril. Durch Verseifung des Polyacrylnitril erhält man ebenfalls Polyacrylat.

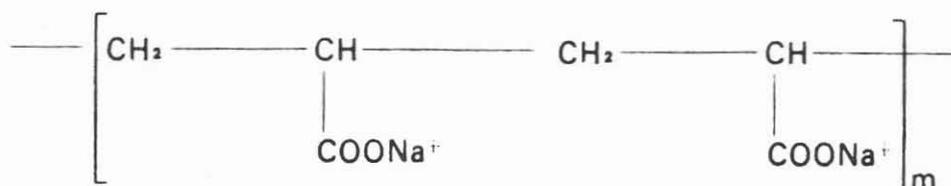


Abb. 8: Aufbau der Polyacrylatkette

Polyacrylat, ein vollkommen synthetisches Polymer wird in Bohrspülungssystemen zur Einstellung und Regulierung der Filtratwerte eingesetzt. Seine Eigenschaften als Dispergiermittel und Inhibitor gegen Ablagerungen (Scale Inhibitor) sind ebenfalls bekannt.

Polyacrylate zählen zu den anionaktiven Polymeren, sie lösen sich leicht und schnell in Wasser. Eine wäßrige Polyacrylatlösung besitzt pseudoplastischen Charakter mit der Fähigkeit, Reduzierungseffekte hinsichtlich Scherverdünnung und Druckverlust zu zeigen. Die Fähigkeit einer Acrylatlösung unter statischen Bedingungen ein Gel zu bilden ist unbedeutend, die Schmierwirkung ist mit der anderer Polymere vergleichbar.

3.3.3.2 Polyacrylnitril

Bei den in Bohrspülungen eingesetzten Polyacrylnitrilen handelt es sich um Copolymere, bestehend aus Acrylnitril und Acrylsäure. Diese Copolymere werden auch als teilweise hydrolysierte Polyacrylnitrile bezeichnet und werden in verschiedenen Spülungssystemen nach erfolgter Neutralisation mit Natriumhydroxid (Abb. 9) primär zur Kontrolle der Filtrationswerte eingesetzt.

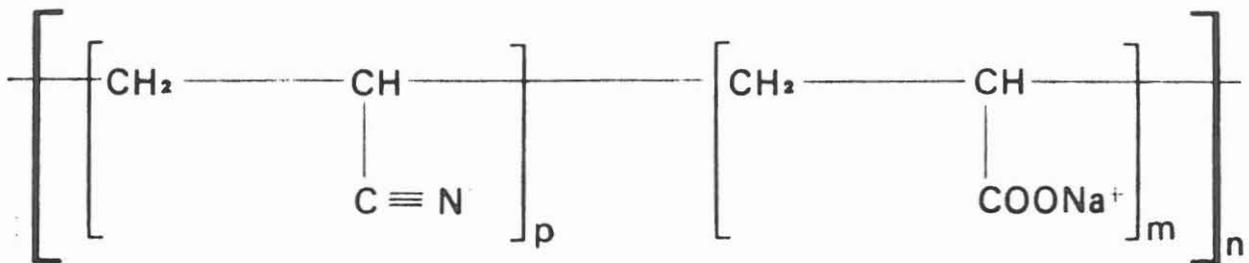


Abb. 9: Teilweise hydrolysiertes Polyacrylnitril

Je nach Kettenlänge und Hydrolysegrad werden Polyacrylnitrile auch als Dispergier- und Flockungsmittel eingesetzt. Da die chemische Struktur der von Polyacrylat ähnlich ist, unterscheiden sich die Eigenschaften der wäßrigen Lösungen nicht sehr. Wäßrige Polyacrylnitril-Lösungen besitzen wie Polyacrylatlösungen pseudoplastischen Charakter mit der Fähigkeit der Scherverdünnung und somit positive Beeinflussung der hydraulischen Werte. Die Fähigkeit, eine stabile Gelstruktur aufzubauen, ist nicht sehr ausgeprägt, wohingegen die Schmierungs-eigenschaft dieser Polymere vergleichbar mit anderen Polymer-systemen ist.

3.3.3.3 Polyacrylamid

Die am häufigsten eingesetzten synthetischen Polymere gehören zur Gruppe der Polyacrylamide und Copolymere. Hergestellt werden diese Polymere durch radikalische Polymerisation mit Molekulargewichten im Bereich von bis zu 2×10^7 . Die Viskosität einer wäßrigen Polymerlösung steigt proportional mit dem Molekulargewicht bei gleicher Einsatzkonzentration.

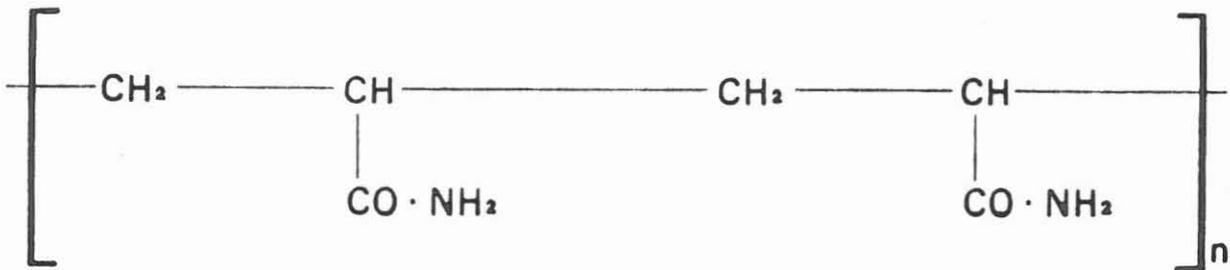


Abb. 10: Aufbau eines Polyacrylamid-Moleküls

Während der Isolierung des Polyacrylamid (Abb. 10) nach der Synthese oder in einem weiteren Verfahren findet die Hydrolyse einiger Amidgruppen statt. Durch entsprechende pH-Werteinstellung erhält man entweder Acrylamid/Acrylsäure oder Acrylamid/Acrylat-Polymerketten. Da die Polymere in Bohrspülungen mit pH-Werten im alkalischen Bereich eingesetzt werden, findet beim Einsatz von Polyacrylamid/-acrylsäure eine Neutralisation der Säure statt, so daß man beim Einsatz dieser Polymertypen allgemein von Polyacrylamid/-acrylat spricht.

Die chemische Struktur einer Polyacrylamid-/-acrylsäure-Kette ist identisch mit der von Polyacrylamid/-acrylat. Der Grad der Hydrolyse von Polyacrylamid hat einen großen Einfluß auf die Eigenschaften der wäßrigen Lösungen wie Viskosität, Adsorption an Feststoff und Bohrlochwand sowie Stabilität gegenüber Elektrolyten. Die Eigenschaften des Polyacrylamids hängen auch von seinem Molekulargewicht ab. Je nach Herstellungsmethode kann das Molekulargewicht von einigen hunderttausend bis zu mehreren Millionen variieren. Es ist offensichtlich, daß je höher das Molekulargewicht (MG) ist, desto besser ist sein Viskositätsertrag in wäßrigen Lösungen. Die Vielzahl möglicher Molekulargewichte/Hydrolysegrade bewirkt, daß in der Spülungstechnologie Polyacrylamide ein breites An-

wendungsgebiet gefunden haben. Je nach Modifikation werden Polyacrylamide und Copolymere zur Regulierung der Viskosität, zur Kontrolle der Filtratwerte, als Flockungsmittel im Bereich der Feststoffkontrolle oder als Toninhibitor eingesetzt.

Die Eigenschaft der Scherverdünnung erlaubt eine höhere Fließrate (Pumprate) und höheren hydraulischen Druck an den Meißeldüsen, was eine bessere Reinigung des Meißels und größeren Bohrfortschritt bewirkt. Zur Toninhibierung werden in Bohrspülungssystemen Polymere mit hohem Molekulargewicht ($MG = 10^6 - 10^7$) und hohem Hydrolysegrad (30 - 35 %) eingesetzt. Die Typen werden auch als "Encapsulating Polymer" bezeichnet und werden einem System in Konzentrationen von 0,5 - 1,5 g/l aktiver Substanz zugesetzt.

3.3.3.4 Spezielle synthetische Polymere

Wie bereits erwähnt sind die Polymere auf Acrylbasis die bekanntesten und am meisten eingesetzten synthetischen Polymere. Außer diesen sind aus der Literatur eine Vielzahl wasserlöslicher synthetischer Polymere bekannt, deren Einsatzmöglichkeiten aber aus verschiedenen Gründen stark begrenzt sind. Umweltschutz, Gesundheitsrisiken, Systemverträglichkeit, Produktionskapazitäten in Verbindung mit hohen Preisen schließen den Einsatz mancher Polymere aus.

Die ständig steigenden Ansprüche durch das Abteufen von Bohrungen in immer größere Teufen und damit verbundenen höheren Bohrlochsohlentemperaturen führten in den letzten fünf bis zehn Jahren verstärkt zu Studien und Untersuchungen, um wettbewerbsfähige Produkte zu finden, die ebenso gute oder noch bessere Eigenschaften hinsichtlich ihres Einsatzes in Bohrspülungssystemen aufweisen. Um die zu künftige Vermarktung dieser Produkte zu sichern, werden chemische Zusammensetzung und Struktur eines solchen Produktes von den Herstellern nicht preisgegeben oder nur allgemein beschrieben.

Zur Zeit findet die Einführung folgender synthetischer Polymere in Bohrspülungssysteme statt:

- Maleinanhydrid-Co-Polymere
- sulfonierte Polyvinyl-Co-Polymere
- sulfonierte Polystyrol-Co-Polymere

Die mit diesen synthetischen Polymeren im Feld durchgeführten Versuche zeigen sehr gute Resultate. Vor allem unter extremen Belastungen (Druck und Temperatur), bei denen die meisten anderen Polymere versagen, behielten die Spülungssysteme ihre durch die Polymere eingestellten Eigenschaften bei.

3.3.3.5 Stabilitäten der synthetischen Polymere

3.3.3.5.1 Stabilität synthetischer Polymere bei Temperaturbelastung

Die chemische Struktur der meisten synthetischen Polymere basiert auf einem Kohlenstoff-Kohlenstoff-Rückgrat (Hauptkette). Diese C-C-Bindung der Polymerkette ist thermisch sehr viel schwerer abzubauen als die Sauerstoff-Kohlenstoff-Bindung der natürlichen und chemisch modifizierten Polymere. Als Konsequenz liegt die Grenze der Temperaturbeständigkeit der Bohrspülungssysteme, deren Komponenten zum Teil aus synthetischen Polymeren bestehen, deutlich höher als beim Einsatz von natürlichen bzw. modifizierten Polymeren. Ein thermischer Abbau der Polymerketten ist verbunden mit einer unerwünschten Änderung bis hin zum totalen Verlust der Systemeigenschaften und Entstehung korrosiver, pH-Wert absenkender Zersetzungsprodukte.

Versuche im Labor, sowie praktische Felderfahrung haben gezeigt, daß synthetische Polymere auf Acrylbasis bei Temperaturen bis zu 200 °C in normalen Bohrspülungssystemen eingesetzt werden können. Spezieller aufgebaute Spülungssysteme, auf diese Polymertypen basierend, erreichen sogar Temperaturen von ca. 230 °C. Ab diesen Temperaturen müssen und werden dann spezielle synthetische Polymere eingesetzt, die diesen enormen Belastungen standhalten.

Der Abbau der Polymerketten durch Temperaturbelastung, oder, anders ausgedrückt, die Temperaturbeständigkeit eines Polymers hängt stark von folgenden Faktoren ab:

- Art und Konzentration von Feststoffen (aktive und inaktive)
- Anwesenheit und Konzentration anorganischer und organischer Salze
- pH-Wert
- Belastungsdauer (z. B. 1 oder 20 Stunden etc.)

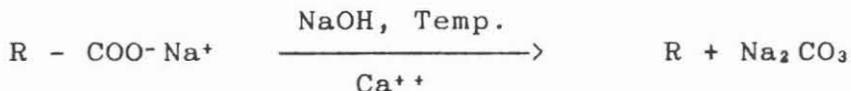
3.3.3.5.2 Elektrolytenbeständigkeit der synthetischen Polymere

3.3.3.5.2.1 Synthetische Polymere auf Basis Polyacryl

Wie bereits erwähnt, sind Polyacrylate, Polyacrylnitril, Polyacrylamid und Copolymere die am häufigsten eingesetzten synthetischen Polymere. Der Einfluß monovalenter Ionen auf die Eigenschaften dieser Polymere beschränkt sich auf den teilweisen Verlust an Viskosität. Ein Polymer mit hohem Hydrolysegrad, d. h. mit hohem anionischem Charakter, unterliegt einer stärkeren Beeinflussung, bis hin zu einem totalen Verlust der Viskosität. Andere Eigenschaften wie Filtratkontrolle, Schmierwirkung und Toninhibierung werden weniger beeinflusst.

Gelangen in diese "Spülungssysteme, die auf Acrylpolymeren aufbauen, höhere Konzentrationen von Kalzium- oder Magnesiumionen, wie sie durch Zufluß saliner Wässer auftreten können, dann genügt oftmals diese Konzentration um die Polymere auszufällen und bohrerspülungstechnisch unwirksam zu machen. Hierbei spielt das Kalzium eine größere Rolle als das Magnesium, da Magnesium bei $\text{pH} > 10$ als Magnesiumhydroxid gebunden wird, das Kalzium aber immer noch in ionischer Form vorliegt.

Bei Raumtemperatur ist z.B. ein Polyacrylat-/amid-Copolymer (Hydrolysegrad ca. 35 %) bei einer Kalziumkonzentration von 100 000 ppm Ca^{++} noch stabil, während bei ca. 140 °C ein Gehalt von 800 ppm Ca^{++} schon zu einer Decarboxylierung führt.



Reine Polyacrylate können in Systemen mit Kalziumkonzentrationen im Bereich > 300 ppm nicht mehr optimal eingesetzt werden. Die Grenze für Polyacrylnitril, Polyacrylamid und Copolymere liegt bei 500 - 800 ppm Ca^{++} . Die Kalziumkonzentration muß daher sorgfältig kontrolliert werden und das System notfalls mit Soda oder Bicarbonat vorbehandelt werden, um die freien Kalziumionen zu binden. Die Probleme beim Lösen der pulverförmigen Polymere in Gegenwart von Salz können durch Verwendung der flüssigen Emulsionen umgangen werden, da diese keinen zusätzlichen Lösungsaktivator oder Scherkraft benötigen.

3.3.3.5.3 Filtrierbarkeit von Polymerlösungen

Die Nachteile unerwünschter Feststoffe wurden bereits beschrieben. Ferner läßt die sofortige Entfernung der erbohrten Feststoffe eine eindeutige Zuordnung zu der gerade durchteuften Formation zu.

Theorie und Praxis zeigten, daß Bohrklein über ca. 140 μ (100 Mesh) durch ein Schüttelsieb ausgeschieden werden kann. Mit Desander und Desilter kann man dann Feststoffe mit einer Korngröße über ca. 40 μ abscheiden. Bei geringen Durchsatzmengen (Feed-Volume) kann man Feststoffe oberhalb von 10 μ und zum Teil kleiner als 10 μ mit Desilter aus dem Zirkulationsvolumen trennen. In unbeschwerter Spülung (feststoffarm) ist das Entfernen von Feststoffen bis 3 μ durch Zentrifugen möglich.

In der Praxis beim Rotary-Bohrverfahren kann man, trotz sehr effektiv eingestellter Feststoffkontrollgeräte (FGK) nie 100 % der erbohrten Feststoffe ausscheiden. Die Durchsatzmengen der FKG sind im Vergleich zu dem Zirkulationsfluß klein, z. B. beträgt der Durchsatz einer Zentrifuge beim Rotary-Bohrverfahren ca. 5 - 15 m³/Std. (83 250 l/min), wobei die Zirkulationsrate (Pumprate) von 60 - 120 m³/Std. (1 000 - 2 000 l/min) beträgt.

Anders beim Bohren im Seilkernverfahren, wo durch die geringere Pumprate von 6 - 15 m³/Std. (100 - 250 l/min) bei optimaler Planung bessere Chancen bestehen, den gesamten Zirkulationsfluß durch FKG feststoffarm zu halten.

Als Hilfe für die konventionellen FKG (wie Schüttelsieb, Desander, Desilter und Zentrifugen) sollte die Filtertechnik auch noch in Erwägung gezogen werden.

Die Effektivität der Filtertechnik hängt wie bei den FKG ab von: Durchsatzrate, Viskosität der Spülung, Öffnungsrate des Filters, Feststoffgehalt in der Spülung und der Korngrößenverteilung der Feststoffe.

Abhängig von der Art der Filtertechnik kann man die Spülung wieder fast völlig feststofffrei bekommen. Bei deren Einsatz spielt jedoch auch die Wirtschaftlichkeit eine Rolle. Dieser Punkt gehört jedoch nicht zur Thematik dieser Studie.

Polymere, die einer feststoffarmen Spülung zugegeben werden, haben die Aufgabe, die Viskosität des Wasser zu erhöhen, was gleichbedeutend ist mit der Reduzierung der Mobilität des Wassermoleküls. Die Wassermoleküle werden durch Bindung an Polymerketten "aufgefangen". Bei Anwendung der Filtrationstechnik werden folgende Probleme auftreten:

1. Die Filtrationsgeschwindigkeit der Spülung wird durch die Anwesenheit des Polymers verlangsamt.
2. Ein Großteil der Polymere wird auf dem Filterkuchen hängenbleiben und dadurch aus dem Zirkulationssystem ausgeschieden.

Bei Filtrierbarkeitsuntersuchungen - im Rahmen tertiärer Ölförderung - mit einem Filterdurchlaß von $1,2 \mu$ von verschiedenen Polymerlösungen kam man zu folgenden reproduzierbaren Ergebnissen: Polymere der Gruppe Polyacrylamid (PAA), Hydrolysiertes Polyacrylamid (HPAA) haben schlechte Filtrationseigenschaften. Mit steigendem Hydrolysegrad des PAA werden die Filtrationseigenschaften noch weiter verschlechtert. XC-Polymere zeigen ausgezeichnete Filtrationseigenschaften. Polymere der HEC-Gruppe zeichnen sich bei den Filtrationsuntersuchungen durch sehr gute Filtrationseigenschaften aus.

3.3.4 Positive und negative Aspekte der Polymer-Systeme

Ein Spülungssystem auf Grundlage wasserlöslicher Polymere besitzt wie jedes andere System seine Vor- und Nachteile. Gegenüber den in Kapitel 3.2. beschriebenen Systemen ohne Polymere bieten die feststofffreien Polymer-Systeme, d. h. wäßrige Polymerlösungen, bedeutend mehr Vorteile. Fast alle Polymer-Systeme besitzen neben einer guten Viskositätsausbeute auch Schmierungseigenschaften und in Kombination mit den erbohrten Feststoffen bildet sich ein das Bohrloch stabilisierender Filterkuchen. Da es sich bei den wäßrigen Polymerlösungen um kolloide Lösungen (Kolloiddispergierte Systeme) handelt, besitzen diese Systeme die Fähigkeit ein Gel zu bilden. Je nach Polymertyp ist diese Fähigkeit mehr oder weniger ausgeprägt. Durch die Zugabe trivalenter Kationen wird dieser Effekt der raumnetzförmigen Verbindung der Polymere verstärkt. Bei den beschriebenen Systemen besitzt das XC-Polymer die besten Thixotropieeigenschaften.

Trotz der vielen Vorteile, die ein Polymersystem bietet, gibt es zur Zeit keinen Polymertyp, der universell eingesetzt werden könnte.

4 XC-POLYMER-UNTERSUCHUNG

Aufgrund der literarischen Ausarbeitung und den Ergebnissen der Bewertung wurde das XC-Polymer auf seine rheologischen Eigenschaften untersucht.

Es gibt nach unserer Kenntnis weltweit 6 - 8 Hersteller, die spezielle XC-Polymere für die Anwendung in der Erdölindustrie produzieren.

Für unsere Untersuchungen wurde eine XC-Type ausgewählt, die sich schon jahrelang weltweit an Bohrungen bewährt hat.

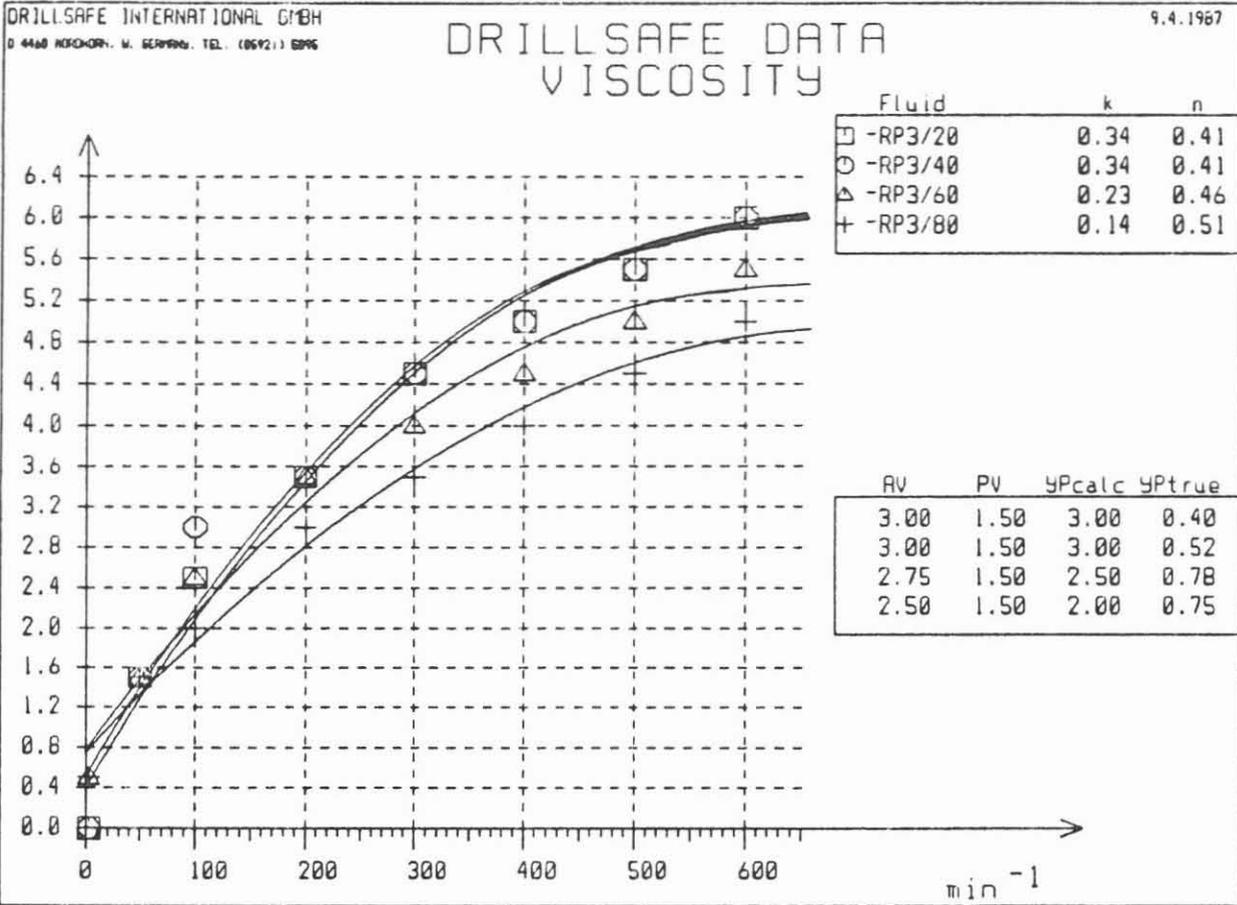
4.1 Testergebnisse

4.1.1 Fließwerte vor der Alterung

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Eigenschaften des XC-Polymers, wie wir sie im theoretischen Teil schon diskutiert haben. Zusammengefaßt wurden folgende Merkmale beobachtet:

- Die scheinbare Viskosität nimmt mit steigender Temperaturbelastung ab, wobei die plastische Viskosität und die Fließgrenze ziemlich konstant bleibt.
- Die Fließwerte in CaCl_2 -Lösung sind im allgemeinen höher als in Leitungswasser, da die Mobilität der Wassermoleküle durch die Lösung von CaCl_2 vermindert wird.
- Mit zunehmender Konzentration steigt der K-Wert an und der n-Wert fällt ab.

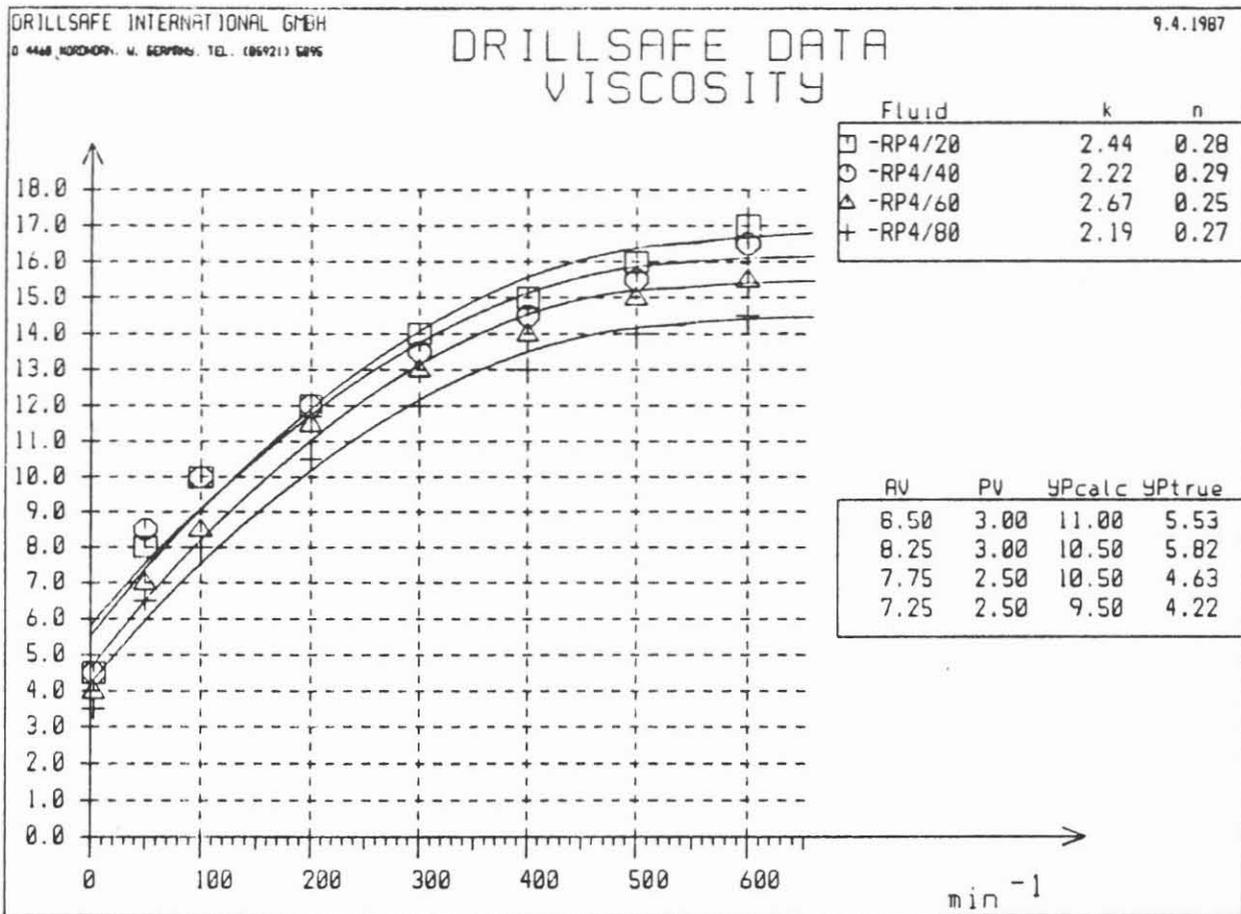
Die Meßwerte (Tab. 4 - 7) wurden mit dem Baroid-Multispeed-Viskosimeter ermittelt und per Computerprogramm graphisch dargestellt.



Tab. 4: Viskositätskurven von 0,1% XC-Polymer in Leitungswasser bei versch. Temperaturen (20, 40, 60, 80°C)

Tab. 4: 0,1% XC-Polymer in Leitungswasser

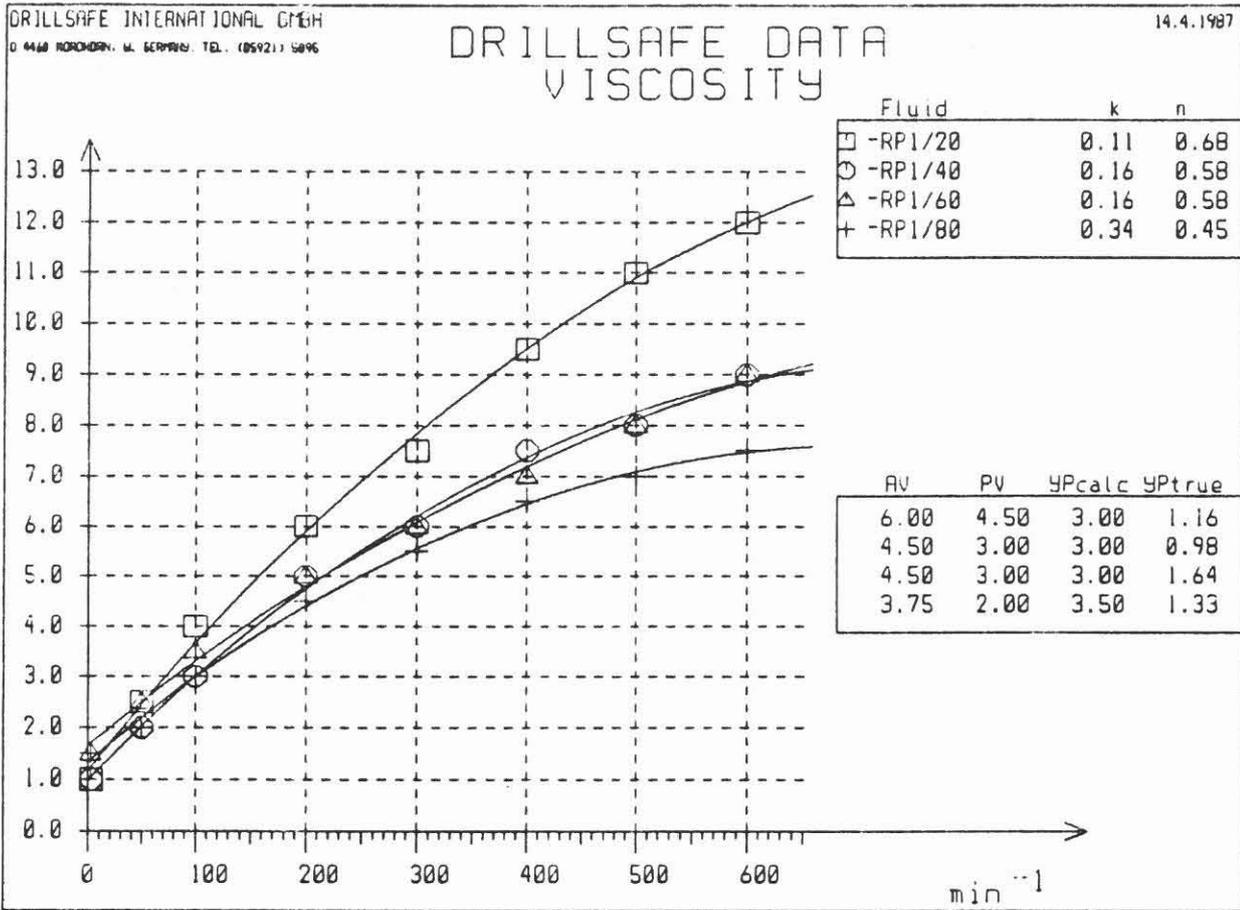
Temp. (°C)	20	40	60	80
3	1,0	1,0	1,0,5	1,0,5
6	1,0	1,0	1,0,5	1,0,5
8	1,0	1,1	1,1	1,0,5
10	1,0,5	1,1	1,1	1,0,5
15	1,1	1,1	1,1	1,1
20	1,1	1,1	1,1	1,1
30	1,1,5	1,1,5	1,1,5	1,1
50	1,1,5	1,1,5	1,1,5	1,1,5
60	1,2	1,2	1,2	1,1,5
80	1,2,5	1,2,5	1,2,5	1,2
100	1,2,5	1,3	1,2,5	1,2
125	1,3	1,3	1,3	1,2,5
150	1,3	1,3	1,3	1,2,5
175	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,2,5
200	1,3,5	1,3,5	1,3,5	1,3
250	1,4	1,4	1,3,5	1,3
300	1,4,5	1,4,5	1,4	1,3,5
400	1,5	1,5	1,4,5	1,4
500	1,5,5	1,5,5	1,5	1,4,5
600	1,6	1,6	1,5,5	1,5
k	1,0,34	1,0,34	1,0,23	1,0,14
n	1,0,41	1,0,41	1,0,46	1,0,51
AV	1,3,00	1,3,00	1,2,75	1,2,50
PV	1,1,50	1,1,50	1,1,50	1,1,50
YPcalc	1,3,00	1,3,00	1,2,50	1,2,00
YPtrue	1,0,40	1,0,52	1,0,78	1,0,75



Tab. 5: Viskositätskurven von 0,3% XC-Polymer in Leitungswasser bei versch. Temperaturen (20, 40, 60, 80)

Tab. 5: 0,3% XC-Polymer in Leitungswasser

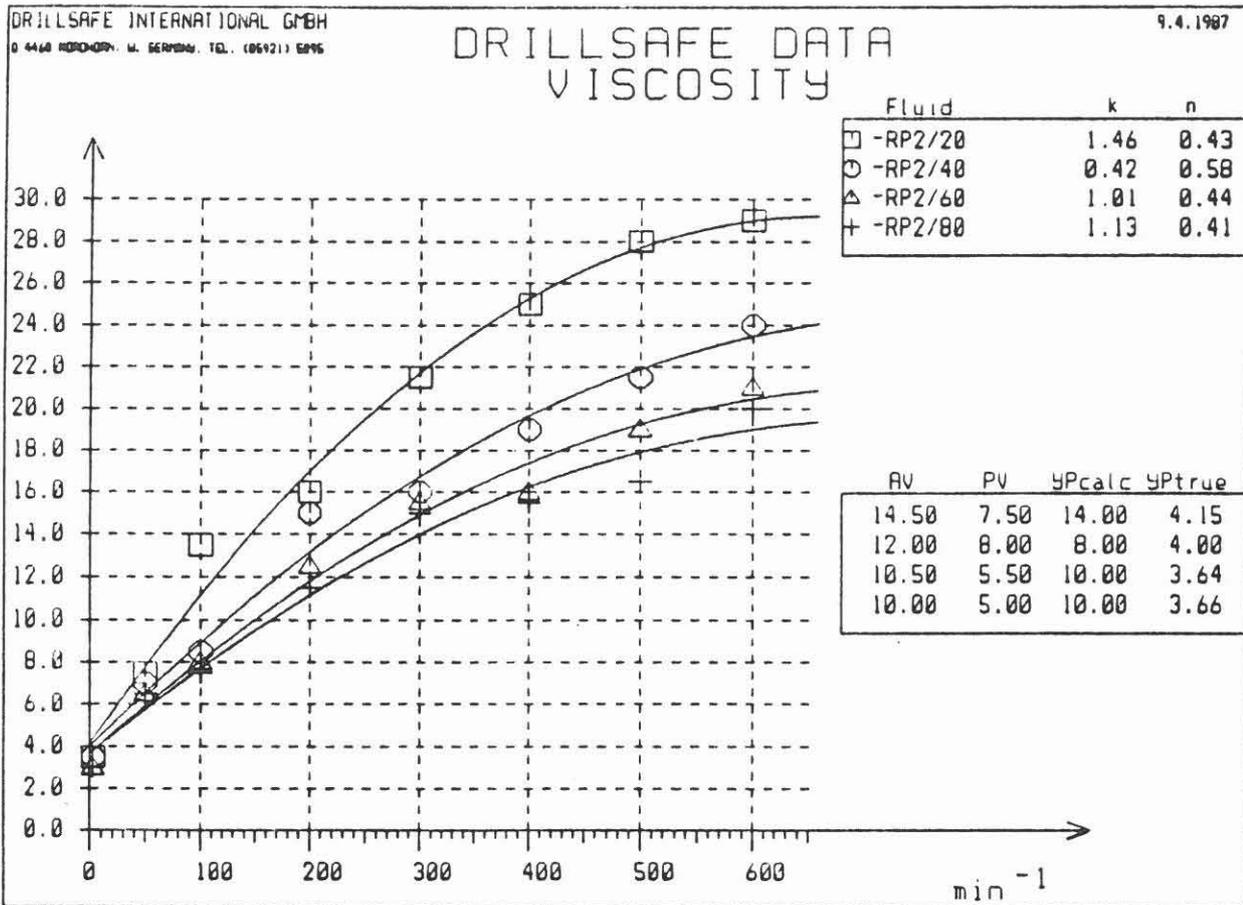
Temp.	20 C	40 C	60 C	80 C
3	4,5	4,5	4	3,5
6	5	5	4,5	4
8	5,5	5,5	4,5	4,5
10	6	5,5	5	4,5
15	6,5	6,5	5,5	5
20	7	7	6,5	5,5
30	7,5	7,5	7,5	6
50	8	8,5	7	6,5
60	8,5	9	8,5	7,5
80	9	9,5	9	8
100	10	10	8,5	8
125	10,5	10,5	10	9,5
150	11	10,5	10,5	9,5
175	11	11,5	11	10
200	11	11	11,5	10,5
250	11	11	11	11
300	11	11,5	11	11
400	11	11,5	11	11
500	11	11,5	11	11
600	11	11,5	11,5	11,5
k	2,44	2,22	2,67	2,19
n	0,28	0,29	0,25	0,27
AV	8,50	8,25	7,75	7,25
PV	3,00	3,00	2,50	2,50
YPcalc	11,00	10,50	10,50	9,50
YPtrue	5,53	5,82	4,63	4,22



Tab. 6: Viskositätskurven von 0,1% XC-Polymer in CaCl₂-Wasser bei versch. Temperaturen (20, 40, 60, 80)

Tab. 6: 0,1% XC-Polymer in CaCl₂-Wasser

Temp.	20 C	40 C	60 C	80 C
3	1	1	1,5	1,5
6	1	1	1,5	1,5
8	1	1	1,5	1,5
10	1,5	1,5	1,5	1,5
15	1,5	1,5	1,5	1,5
20	1,5	1,5	2	2
30	2	1,5	2	2
50	2,5	2	2,5	2
60	3	2,5	2,5	2
80	3,5	3,5	3	2,5
100	4	3	3,5	3
125	4,5	3,5	4	3,5
150	5	4	4,5	3,5
175	5,5	4,5	5	4
200	6	5	5	4,5
250	6,5	5,5	5,5	5
300	7,5	6	6	5,5
400	9,5	7,5	7	6,5
500	11	8	8	7
600	11,2	9	9	7,5
k	0,11	0,16	0,16	0,34
n	0,68	0,58	0,58	0,45
AV	6,00	4,50	4,50	3,75
PV	4,50	3,00	3,00	2,00
YPcalc	3,00	3,00	3,00	3,50
YPtrue	1,16	0,98	1,64	1,33



Tab. 7: Viskositätskurven von 0,3% XC-Polymer in CaCl₂ - Wasser bei versch. Temperaturen (20, 40, 60, 80°C)

Tab. 7: 0,3% XC-Polymer in CaCl₂ - Wasser

Temp.	20 C	40 C	60 C	80 C
3	13,5	13,5	13	13
6	14	13,5	14	14
8	14	14	14	14
10	14,5	14	14	14
15	15,5	14,5	15	14,5
20	15,5	15	15	14,5
30	16,5	16	16	15,5
50	17,5	17	16,5	16,5
60	18	17,5	17	17
80	110	18	17,5	17,5
100	113,5	18,5	18	17,5
125	114,5	110	19	18
150	115	111,5	110	19
175	115,5	114	111	110
200	116	115	112,5	111,5
250	119	115,5	115	114,5
300	121,5	116	115,5	115
400	125	119	116	115,5
500	128	121,5	119	116,5
600	129	124	121	120

k	1,46	0,42	1,01	1,13
n	0,43	0,58	0,44	0,41
AV	114,50	112,00	110,50	110,00
PV	7,50	8,00	5,50	5,00
YPcalc	114,00	8,00	110,00	110,00
YPtrue	4,15	4,00	3,64	3,66

4.1.2 Fließwerte nach der Alterung

Nach dem Ansatz wurde die Spülung 24 Stunden bei gewünschter Temperatur gealtert. Danach wurde sie abgekühlt auf Zimmertemperatur und die Fließwerte gemessen.

Tab. 8: Spülungswerte vor und nach Rollenofen

	XC-Polymer in Leitungswasser			
	0,1 %		0,3 %	
	PV mPa·s	FG lbs/100 ft ²	PV mPa·s	FG lbs/100 ft ²
vor Rollenofen	2,5	2	5	6
nach Rollenofen				
- bei 80 °C	3	0,5	5	5
- bei 100 °C	1	1	3	1
- bei 120 °C	1	1	2	2

	XC-Polymer in CaCl ₂ -wasser			
	0,1 %		0,3 %	
	PV mPa·s	FG lbs/100 ft ²	PV mPa·s	FG lbs/100 ft ²
vor Rollenofen	6	3	12	8
nach Rollenofen				
- bei 80 °C	6	1	10	9
- bei 100 °C	7	0	8	13
- bei 120 °C	5	3	8	9

Obwohl manche Daten in Tab. 8 nicht in die Reihe passen, kann man jedoch den Trend erkennen, daß:

- der Viskositätsabbau durch die langfristige thermische Belastung bei den in Leitungswasser angesetzten Spülungen größer ist als bei den in CaCl₂-Wasser angesetzten Spülungen,
- die Grenze der Temperaturstabilität des XC-Polymers allgemein zwischen 80 und 100 °C festgesetzt werden kann.

5 ANHANG

Zweck der KTB-Vorbohrung bzw. -Hauptbohrung ist die umfangreiche Untersuchung der Gesteinsproben und den darin enthaltenen Fluids unter anderem auch auf Kohlenwasserstoffe, daher ist die Anforderung des Geochemikers an den Praktiker/Bohrer, nach Möglichkeit keine Spülungsadditive, die auf Kohlenwasserstoffe basieren oder sie enthalten, während des Bohrens zu verwenden, um die Analysen nicht zu verfälschen. Aufgrund dessen wurden uns Proben eines kolloidalen anorganischen Verdickungsmittels zwecks rheologischer Untersuchung kurzfristig vor der Abgabe dieser Ausarbeitung zur Verfügung gestellt.

5.1 Kolloidale Lösungen

In der Bohrspülungstechnologie ist schon seit einiger Zeit bekannt, daß man mit anorganischen Lösungen, wie Kieselsäure-Dispersionen, Wasserglas-Lösungen etc., die Viskosität und das Preßwasser in positiver Weise beeinflussen kann.

Kolloidale Lösungen erbringen Viskosität und Fließgrenze durch ihren Feststoffanteil, der in sehr feinen Korngrößen in der Lösung vorhanden ist. Der Vorteil von solchen Lösungen ist die gute Schmiereigenschaft, verursacht durch die zumeist kugelförmigen Kolloide, die ähnlich dem Kugellager-Prinzip in flüssigen Medien arbeiten.

Da die zu untersuchenden Lösungen bzw. deren Inhaltsstoffe zu der Zeit, als die Ausarbeitung durchgeführt wurde, patentamtlich angemeldet wurden, haben wir keine Informationen über die chemische Zusammensetzung und deren Korngrößen hier vorliegen.

Es wurden folgende Testreihen durchgeführt:

- Grundviskosität des zu untersuchenden Produktes bei verschiedenen Konzentrationen in Leitungswasser und CaCl_2 -Lösung (350 g/l CaCl_2)
- Viskosität in Abhängigkeit vom pH-Wert
- Viskositätsänderungen bei Zugabe von Salzen (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , K_2CO_3)

5.2 TESTERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.2.1 Ansatz von Testlösungen

Das Produkt liegt in Pulverform vor. Zum Ansatz wurde es in vorgelegtem Wasser oder CaCl_2 -Lauge angesetzt und mit dem "Turbo Turax"-Dispergator für mindestens eine Stunde gerührt. Es wurden jeweils erst 2,5 % Stammlösung angesetzt, bei niedrigeren Konzentrationen wurde die Stammlösung entsprechend verdünnt.

Laut Hersteller und auch nach unseren Erfahrungen im Labor benötigt das Produkt sehr hohe Scherung beim Ansatz. Je länger es geschert wurde, desto höher war die Viskosität. Die "End"-Viskositäten waren aufgrund der erhöhten Lösungs-Temperaturen - bedingt durch die höheren Umdrehungen des "Turbo Turax" - nicht eindeutig feststellbar. Es kam noch dazu, daß die 2,5 %ige Lösung sehr schnell Gelstärken aufbaute, wodurch die Messung der Viskosität nach der Abkühlung nicht identisch mit der während des Rührens entstandenen Viskosität sein kann.

5.2.2. Viskositätskurven bei verschiedenen Konzentrationen

Aufgrund der oben genannten Eigenschaft - schneller Aufbau von Gelstruktur - wurden bei der Aufnahme von Viskositätskurven Werte bei steigenden (auf) sowie zurückgehenden Drehzahlen (ab) des Viskosimeters abgelesen.

In Leitungswasser zeigten die Lösungen mit einer Konzentration ab 0,5 % gute Fließwerte (mit echten Fließgrenzen). Bei Konzentrationen von 0,3 % und 0,1 % erhielt man kaum höhere Werte als bei reinem Wasser. Eine echte Thixotropie (Differenz zwischen 10" und 10' Gelstärken) wurde nur bei länger stehenden Lösungen optisch beobachtet. Es wurde beobachtet, daß die erste Gelstärke bei 2,5 %iger Lösung (10 Sekunden) sehr hoch war, jedoch die zweite Gelstärke (10 Minuten) fast identisch damit war.

In CaCl_2 -Lösung verliert das Produkt weitgehend seine Viskosität. Bei längerem und stärkerem Rühren war optisch zu erkennen, daß ein Viskositätsaufbau stattfand.

Das Fließverhalten der kolloidalen Lösung wird laut Hersteller durch das Modell von Casson gut beschrieben:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{FG} - \sqrt{PV} \cdot \sqrt{D}$$

τ = Schubspannung
 FG = Fließgrenze
 PV = Plastische Viskosität
 D = Schergefälle

Tab. 9: Viskositätswerte von anorganischen Verdickern bei verschiedenen Konzentrationen in Leitungswasser

Fann-Werte	Kolloidale Lösungen				
	2,5 %	0,8 %	0,5 %	0,3 %	0,1 %
3	71	5	3,5	0	0
6	73	6	3,5	0	0
100	95	9	4	0	0
200	95	10,5	6	1,5	0,5
300	95	11	7,5	1,5	1,5
600	95	15	12	3	2,5
600	95	16	12	3	2,5
300	95	12	7,5	2	2
200	94	11	5	1,5	1
100	89	10	4	0,5	1
6	78	8	4	0	0
3	77	8	3,5	0	0
PV, mPa·s	0	4	4,5	1,5	1
FG, lbs/100 ft ²	95	7	3	0	0,5
Gelstärke, "	75/79	8/9	3,5/3,5	0/0	0/0
pH	9,89	9,25	8,57	7,99	7,75
n, -	/	0,45	0,68	1	0,74
K, lb·s ⁿ /ft ²	/	0,45	0,68	1	0,74

Tab. 10: Viskositätswerte von anorganischen Verdickern bei verschiedenen Konzentrationen in CaCl₂-Lauge

Fann-Werte	Kolloidale Lösungen				
	2,5 %	0,8 %	0,5 %	0,3 %	0,1 %
3	0	0	0,5	0	0
6	0	0	0,5	0	0
100	3	1	2	1	0
200	4	1,5	2,5	1,5	0,5
300	5	3	2,5	2,5	1
600	9	5	5	4	3,5
600	9	5	5	4	3,5
300	5,5	3,5	3,5	2,5	2
200	4	2,5	3	2	1,5
100	3,5	2	2,5	1	1
6	1,5	1	1	0	0
3	1	1	0,5	0	0
FG, lbs/100 ft ²	1	1	0	1	0
Gelstärke, "	2/2	2/2	1/1,5	0/0	0/0
pH	7,16	7,48	7,85	7,8	7,92
n, -	0,85	0,74	1	0,68	1,81
K, lb·s ⁿ /ft ²	0,025	0,03	0,005	0,036	0,00001

Die Werte aus Tabelle 9 und 10 wurden in den Abbildungen 12 und 13 graphisch dargestellt.

Drillsafe Data Viscosity

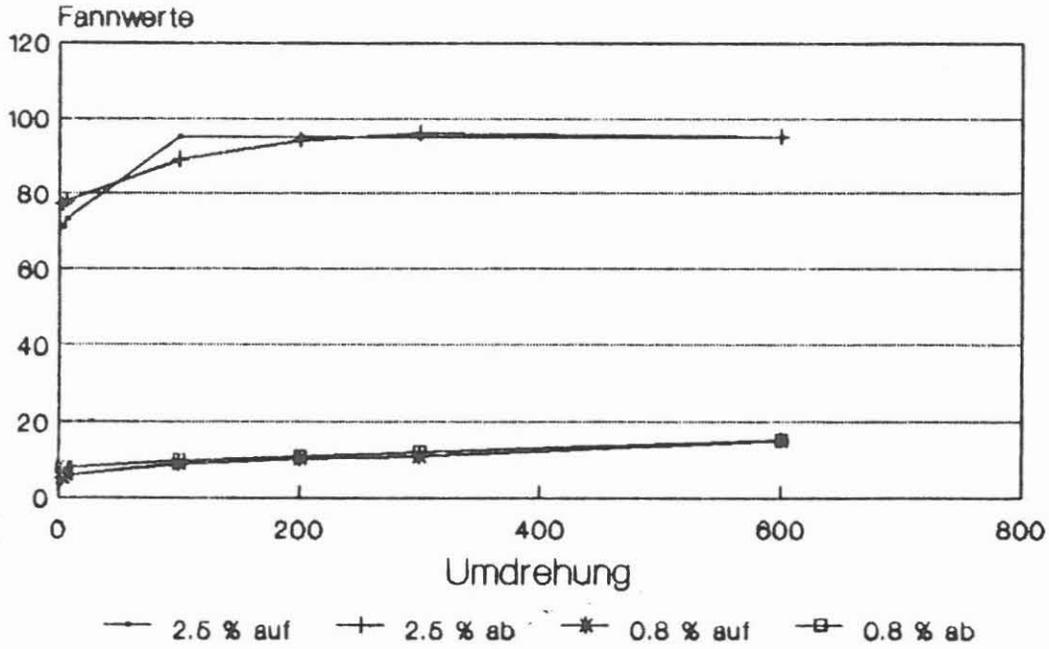


Abb. 11 : Fließkurven von kolloidalen Lösungen (2,5% & 0,8%)
in Leitungswasser

Drillsafe Data Viscosity

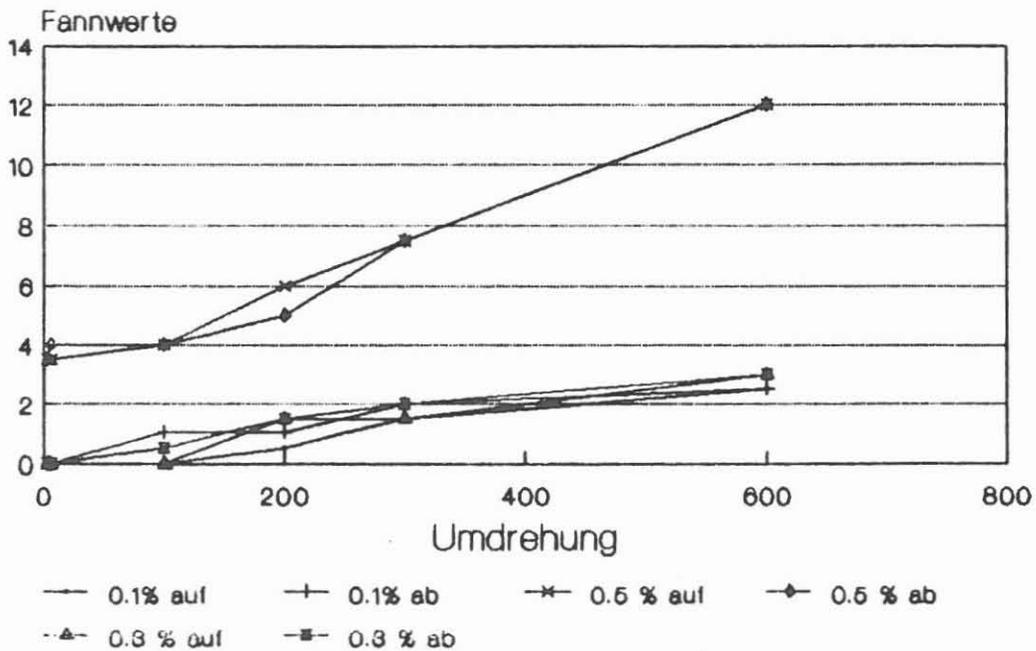


Abb. 11 : Fließkurven von kolloidalen Lösungen (0,5&0,3&0,1%)

Drillsafe Data Viscosity

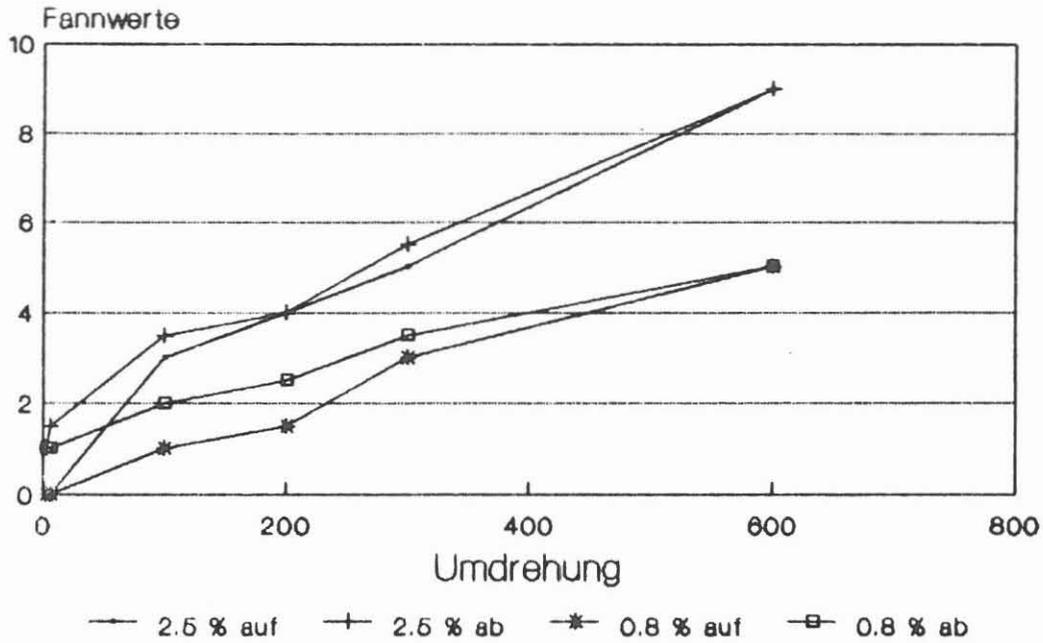


Abb. 12 : Fließkurven von kolloidalen Lösungen in CaCl_2 - Wasser
(2,5% und 0,8%)

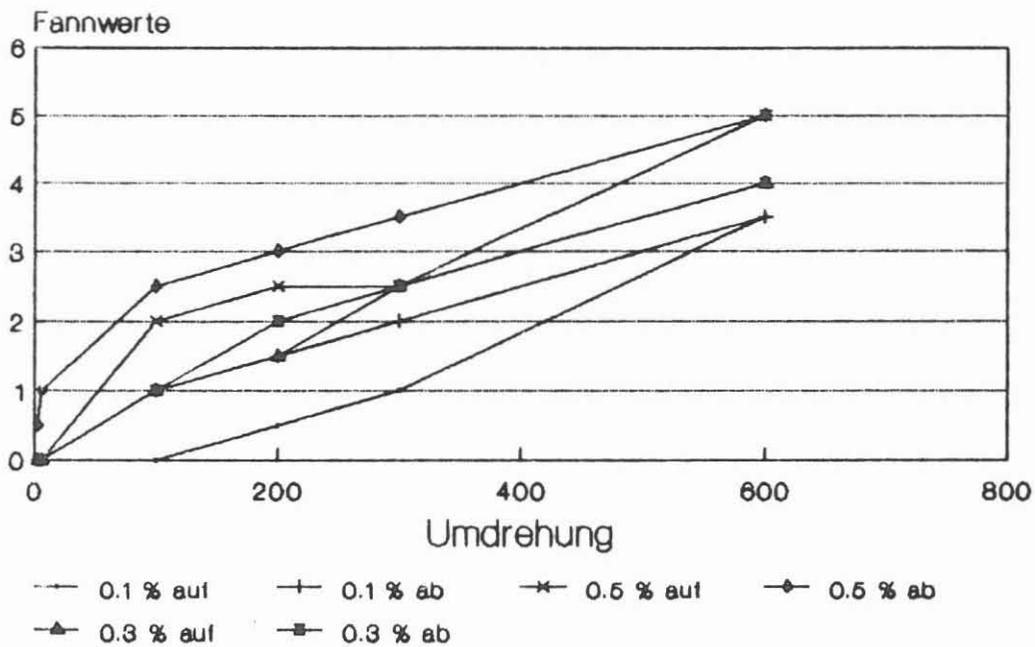


Abb. 12 : Fließkurven von kolloidalen Lösungen in CaCl_2 - Wasser
(0,5% , 0,3% und 0,1%)

5.2.3 Viskosität in Abhängigkeit vom pH-Wert

Um den Einfluß des pH-Wertes auf die untersuchte kolloidale Lösung zu ermitteln, wurde der pH-Wert durch Zusatz von HCl bzw. NaOH-Lösung zu einer 0,8 %igen Kolloid-Lösung variiert.

Tab. 11: Viskositätswerte von 0,8 %iger Lösung eines anorganischen Verdickers in Abhängigkeit vom pH-Wert

pH	600	300	200	100	3	PV mPa·s	FB lbs/ 100 ft ²	n	K lbs/ 100 ft ²
0,1	5,5	4	3	2	2	1,5	2,5	0,46	0,228
1,2	9	5	4	3	2	4	1	0,85	0,025
3,4	10	6	5	3	2	4	2	0,74	0,061
5,5	16	10	8	6	4	6	4	0,68	0,146
9,08	17	15	13	10	8	2	13	0,18	4,87
orig.									
10,1	11	7,5	6	5	2	3,5	4	0,55	0,23
11,1	12	8	6,5	4,5	3,5	4	4	0,58	0,21
13,08	9	5,5	4	2,5	0	3,5	2	0,71	0,066
13,97	6,5	3,5	2	0	0	3	0,5	0,89	0,013

Die angesetzte Lösung (mit Leitungswasser) hat einen pH-Wert von ca. 9. Bei pH-Werten unter 5 und über 10 zeigte sich deutlich eine starke Viskositätsabnahme. Bei pH-Werten von 8 bis 9 kann man wahrscheinlich die optimale Viskosität erhalten. Obwohl in der Praxis beim normalen Bohrvorgang kaum pH-Wert-"Bewegung" stattfindet, sollte man sich aber vorsorglich Gedanken darüber machen, daß durch Zementationen, Neutralisierung von H₂S etc. mit extrem hohen pH-Werten (über 11) gerechnet werden muß.

Es entbehrt jeder Grundlage weiterer Diskussionen über die Viskositätsänderung in Abhängigkeit vom pH-Wert, da uns, wie erwähnt, keinerlei Informationen über den Chemismus des Produktes vorliegen.

5.2.4 Viskositätsänderung durch Zugabe von Salzen

Es ist kaum damit zu rechnen, daß man während des Abteufens der Vorbohrung Salzformationen antreffen wird. Jedoch ist es möglich, über die Zugabe von Salz das spez. Gewicht der Spülung zu steuern, um bei drückenden Formationen oder Zufluß das Spülgewicht dem Druckgradienten anzupassen.

Es wurden vier typische wasserlösliche Salze: NaCl, CaCl₂, MgCl₂ und K₂CO₃ ausgewählt. Die Basis-Spülung war wie bei der vorherigen Testreihe eine 0,8 %ige Lösung in Leitungswasser. Die Salze wurden in Stufen von 50, 100 und 150 g/l zugegeben (siehe Tab. 12).

Es ist klar zu erkennen, daß die zweiwertigen Elektrolyte (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) eine stärkere Reduzierung der Viskositäten bewirken als die einwertigen (Na⁺, K⁺), wobei man die Beeinflussung (von leicht zu stark) wie folgt ordnen kann: K₂CO₃, NaCl, MgCl₂, CaCl₂. Das Produkt ist auf jeden Fall stark elektrolytempfindlich, nur bei 50 g/l K₂CO₃ zeigte es kaum Einfluß auf die Rheologie (Abb. 13 - 16).

Tab. 12: Viskositätswerte von 0,8 % anorganischem Verdicker bei verschiedenen Salzkontaminanten

Fannwerte	3	6	100	200	300	600	600	300	200	100	6	3	PV mPa.s	FG lbs / 100ft ²	Gelst. lbs/ 100ft ²	pH	n	k _n lbs ⁿ / 100ft ²
0.8 %ige Lösung (A)	2	3	5.5	9	10	19	19	10	9.5	8	5	4	9	1	3/4	9.17	0.93	.031
A + 50 g/l Na Cl	0.5	1	3	4.5	6.5	10	10	6.0	4.0	2.5	1	0	3.5	3	.5/.5	8.09	0.62	.135
A + 100 g/l Na Cl	0	0	1.5	4	6	10	10	5.5	4	2	1	0	4	2	.5/.5	7.89	0.74	.061
A + 150 g/l Na Cl	0.5	0.5	1.5	2.5	4	8	8	5	2.5	1.5	1.5	0	4	0	1/1.5	7.77	1.0	.0078
A + 50 g/l Ca Cl ₂	0	0	0	0.5	1.5	3	3	2	1	0.5	0	0	1.5	0	0/0	7.28	1.0	.0029
A + 100 g/l Ca Cl ₂	0	0	0	1	2	3.5	3.5	2	1.5	1	0	0	1.5	0.5	0/0	7.57	0.81	.013
A + 150 g/l Ca Cl ₂	0	0	0	1.5	2.5	2.5	4	4	3.5	1.5	0.5	0	1.5	1	0/.5	7.90	0.68	.036
A + 50 g/l Mg Cl ₂	1	1	3	3.5	5	8	8	5	3.5	3	1.5	1.5	3	2	1.5/2	8.52	0.68	.073
A + 100 g/l Mg Cl ₂	0	0	2	3	3	7	7	4	3	2.5	0.5	0.5	4	0	1/1	8.35	1.22	.0015
A + 150 g/l Mg Cl ₂	0	0	2	3	4.5	7.5	7.5	4	3.5	2.5	1	1	2	1.5	1/1.5	7.41	0.74	.045
A + 50 g/l K ₂ CO ₃	6	7	8.5	9	11	18	18	11.5	9.5	7	4	3	7	4	3/4	11.88	0.71	.131
A + 100 g/l K ₂ CO ₃	1	1.5	3	5	5.5	9	9	6	5	3	2	1.5	3.5	2	2/2	12.29	0.71	.066
A + 150 g/l K ₂ CO ₃	0	0	2.5	3.5	4	7	7	4	3.5	2.5	0.5	0	3	1	0/0	12.36	0.81	.026

Drillsafe Data Viscosity

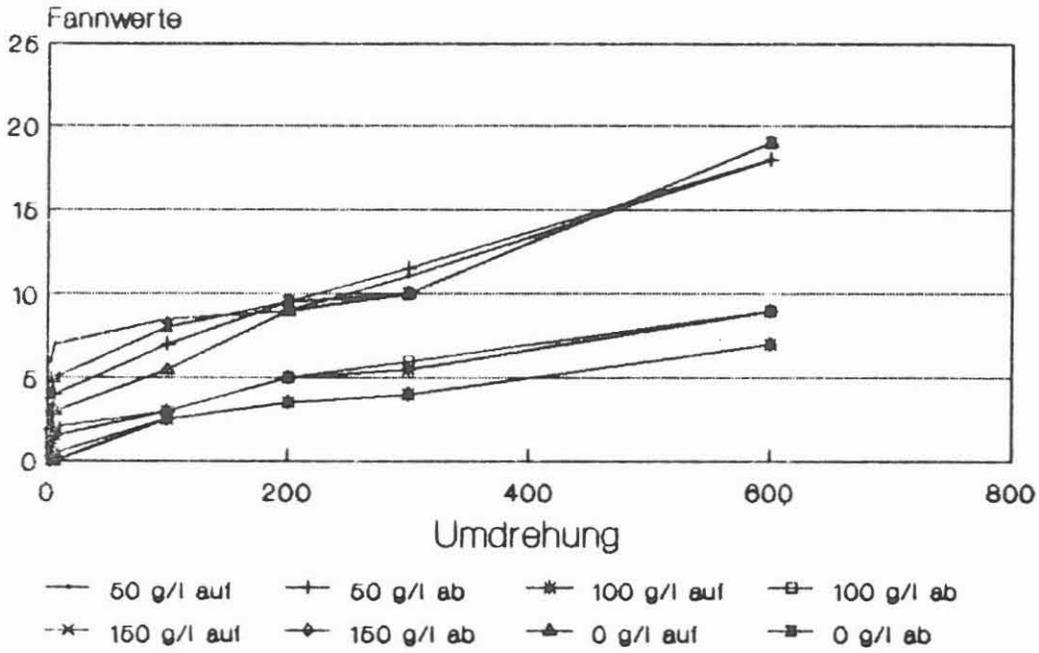


Abb. 13 : Änderung der Fließkurven einer 0,8%-igen kolloidalen Lösung bei Zugabe von K_2CO_3 (0, 50, 100, 150 g/l)

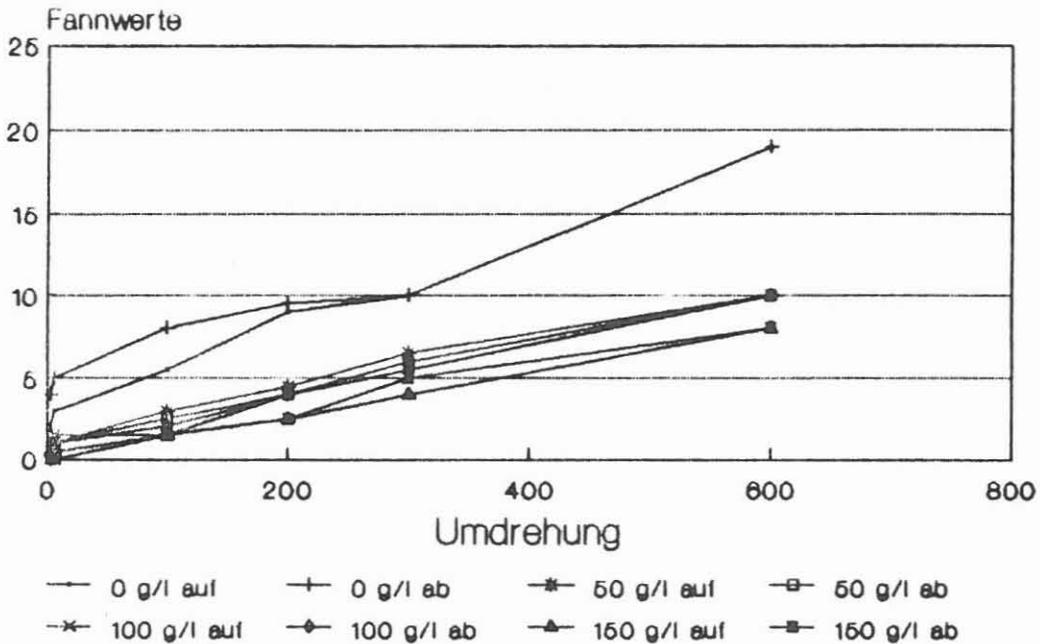


Abb. 14: Änderung der Fließkurven einer 0,8%-igen kolloidalen Lösung bei Zugabe von NaCl (0, 50, 100, 150 g/l)

Drillsafe Data Viscosity

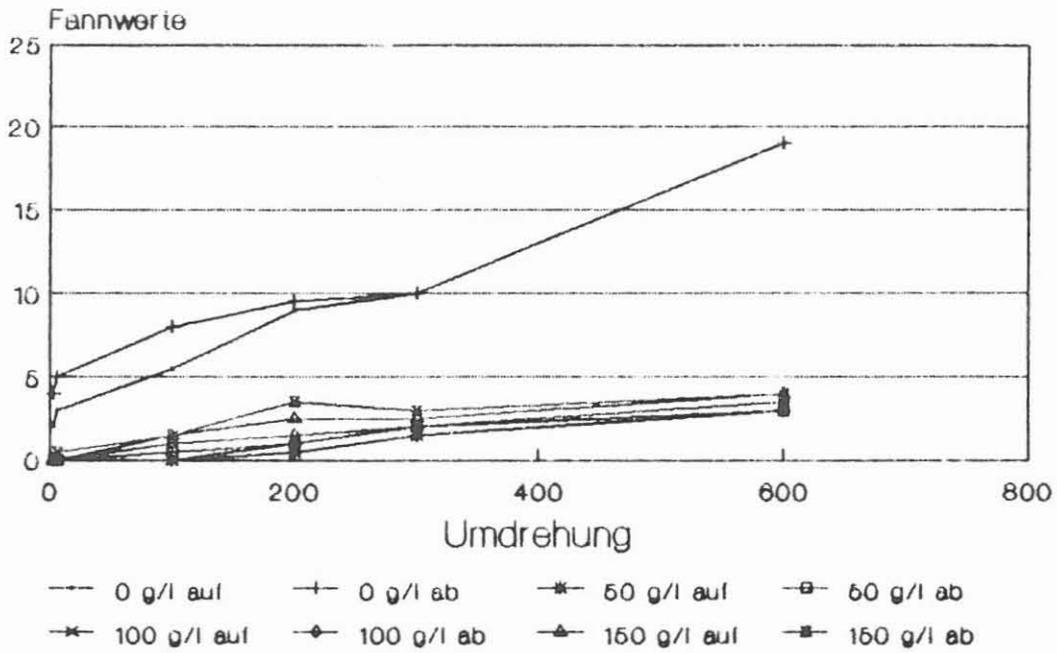


Abb. 15 : Änderung der Fließkurven einer 0,8%-igen kolloidalen Lösung bei Zugabe von CaCl_2 (0,50,100,150 g/l).

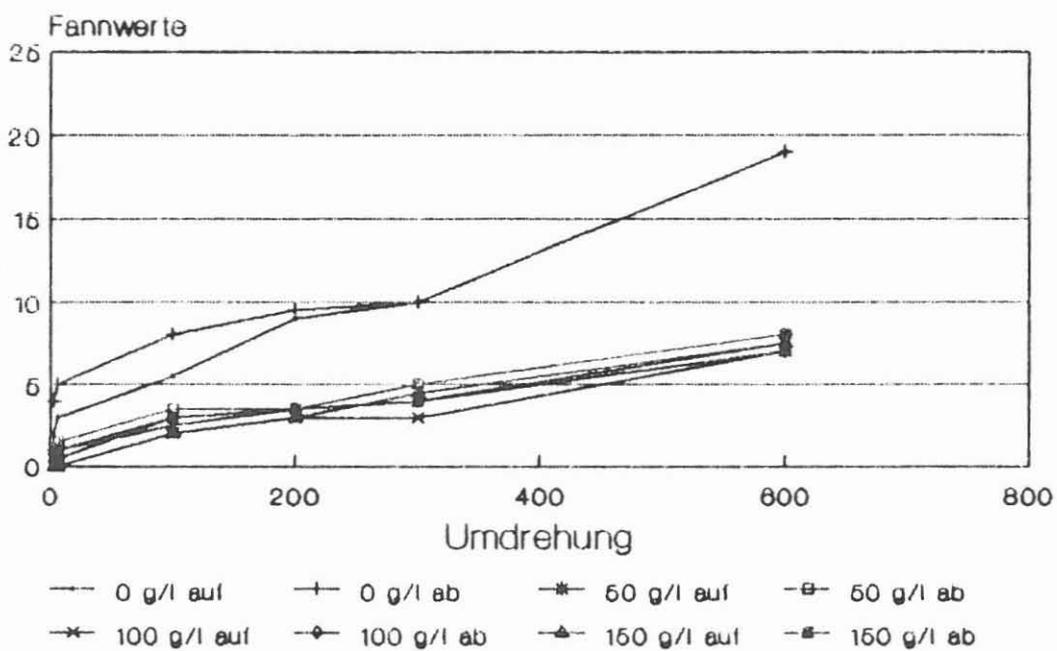


Abb. 16 : Änderung der Fließkurven einer 0,8%-igen kolloidalen Lösung bei Zugabe von MgCl_2 (0,50,100,150 g/l)

5.3 ZUSAMMENFASSUNG DES ANHANGS

Kolloidale Lösungen weisen folgende Merkmale auf:

- a) Sie enthalten keine Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die die Analytik der Geowissenschaftler belasten könnten.
- b) Sie haben eine exzellente Schmierwirkung; dadurch wird eine längere Lebensdauer der Bohrwerkzeuge und bessere Bohrfortschrittsleistung (weniger Tripzeiten etc.) erzielt.
- c) Das Produkt kann bei der Herstellung uniform (einheitlich) gehalten werden, um Schwankungen bei der Auswertung der geochemischen Analytik zu vermindern.
- d) Sie sind biologisch immun, d. h. das Problem des bakteriellen Abbaus ist nicht gegeben.
- e) Sie sind besser scher- und temperaturbeständig als Polymere.
- f) Ihre Viskosität ist pH-Wert-abhängig. Bei pH-Werten unter 5 und über 11 nimmt die Viskosität stark ab, was in manchen Fällen von Nachteil sein kann.
- g) Thixotropie und Fließgrenze treten erst bei höheren Konzentrationen und längeren Stillstandszeiten auf.
- h) Sie sind salzempfindlich, besonders gegenüber zweiwertigen, lediglich bei K_2CO_3 ist eine Konzentration bis ca. 50 g/l ohne Einfluß auf die Viskosität.
- i) Sie benötigen beim Ansetzen eine sehr hohe Scherkraft.

Es gibt viele Anhaltspunkte, die dafür sprechen, daß solche Produkte bei der Vorbohrung eingesetzt werden könnten. Andererseits sind auch noch Punkte offen, die auch nach der Abgabe dieser Studie aufgrund der z. Z. geringen verfügbaren Grundinformationen noch abgeklärt werden müssen.

Noch geklärt werden sollten z. B. Korngrößen, Verträglichkeit mit anderen Spülungsadditiven oder die Wechselwirkung mit den in der Formation vorkommenden Substanzen, Chemismus des Produktes etc.

Da das Produkt quasi neu auf dem Markt und noch nie in Feldversuchen gefahren worden ist, bedarf es, wie üblich, umfangreicherer und genauerer Untersuchungen, um jedes eventuell auftretende Risiko ausschalten zu können.

6 LITERATURVERZEICHNIS:

- AKSTINAT, M.H. (1978): Viskose Fluidmedien für die tertiäre Erdölgewinnung in hochsalinaren Systemen - Auswahlverfahren, Testmethoden und Versuchsergebnisse; Dissertation, TU Clausthal
- CHATTERJI, J., BORCHARDT, J.K. (Nov. 1981): Application of Water Soluble Polymer in the Oil Field; (J. Petr. Techn. 35, S. 2042 - 2056.
- CHILINGARIAN, V.G., VORABUTR, P. (1981): Drilling and Drilling Fluids; Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam, Oxford, New York.
- GRAY, G.R., DARLEY, H.C.H., ROGERS, W.F. (1980): Composition and Properties of Oil Well drilling Fluids; Gulf Publ. Company, Book Division, Houston, London, Paris, Tokio.
- MOHNAT, S.M. (Sept. 1985): Characterization and Controll of fine Particles involved in Drilling; J. Petr. Techn., S. 1622 - 1632.
- MOORE, P.L. (1974): Drilling Practices Manual; The Petroleum Publ. Co., Tulsa.
- RANNEY, M.W. (1979): Crude Oil Drilling Fluids; Noyes Data Corporation USA.
- THOMAS, D.C. (April 1982): Thermal Stability of Starch and Carboxymethyl Cellulose-based Polymer used in Drilling Fluids; J. Petr. Techn. 22, S. 171 - 180.
- N.N. (EXLOG STAFF) (1985): Theory and Application of Drilling Fluid Hydraulics; D. Reidel Publishing Company, Holland.
- N.N. (1979): Manual of Drilling Fluids Technology; NL Baroid (NL Industries).
- N.N. (1966): Mud Engineering Handbook; Magnet Cove Barium Corporation.
- N.N. (1981): Spülungshandbunch; Drillsafe GmbH, Nordhorn.
- N.N.: Diverse Informationsschriften von Polymerherstellern
- N.N.: Diverse interne Berichte, Mitteilungen, Ausarbeitungen der Fa. Drillsafe, Nordhorn.
- N.N.: Technical Manual for Drilling, Completion and Workover Fluids, International Drilling Fluids.

Deutsche Bohrmeisterschule

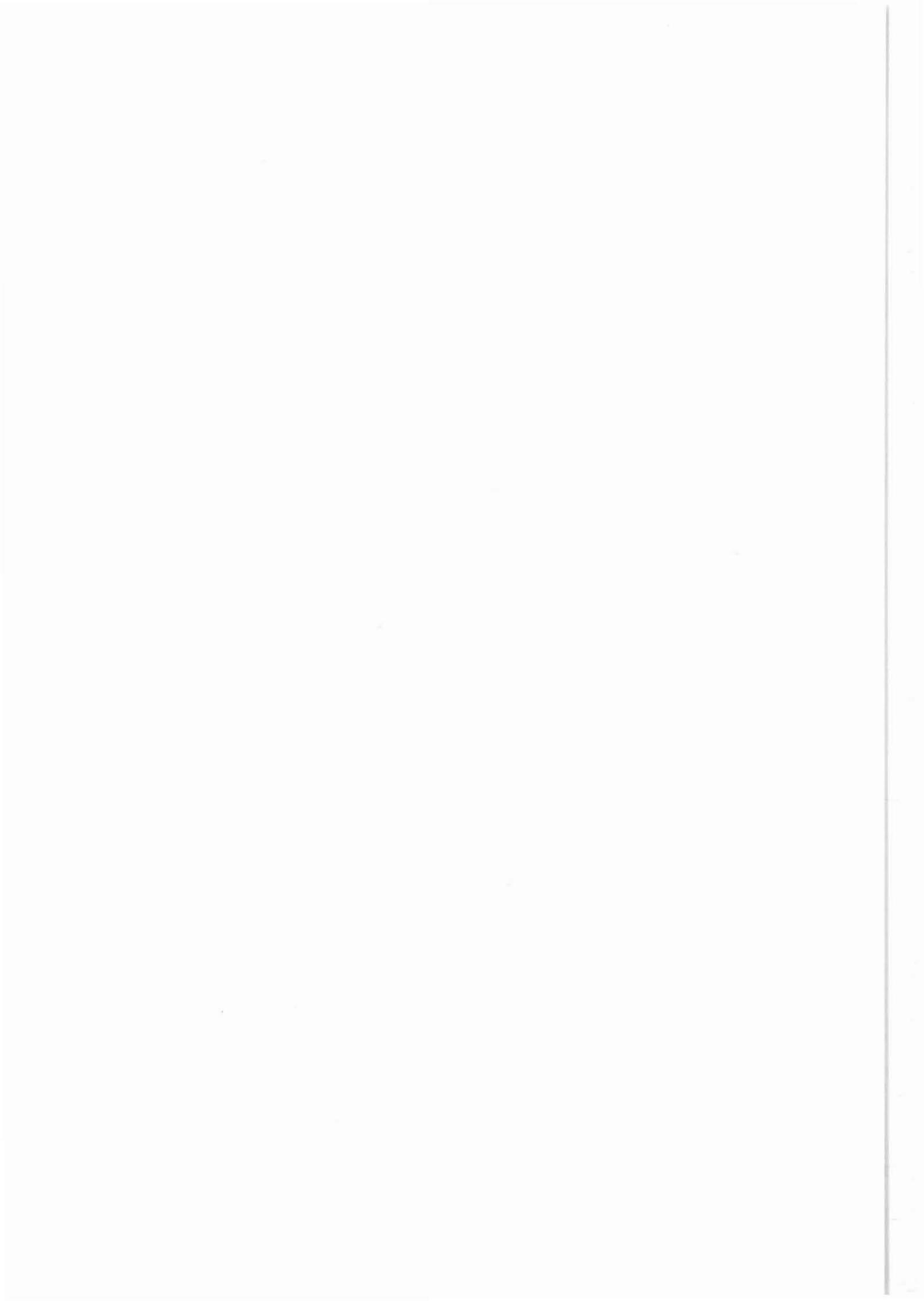
Breite Straße 1
3100 Celle

Studien Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle

Dr.-Ing. G. Schaumberg

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung.....	493
2. Einleitung.....	494
3. Kick-Entstehung.....	495
4. Kick-Erkennung.....	497
4.1 Allgemeines.....	497
4.2 Anzeichen während des Bohrens.....	497
4.2.1 Zunahme der Spülungs-Auslaufrate.....	497
4.2.2 Anstieg der Tankfüllstände.....	497
4.2.3 Ausfließen der Spülung bei abgeschal- teten Pumpen.....	497
4.2.4 Änderung der Bohrgeschwindigkeit.....	497
4.2.5 Verschnittene Spülung.....	498
4.2.6 Sonstige Anzeichen.....	498
4.3 Anzeichen während des Roundtrips.....	499
4.4 Anzeichen, wenn sich kein Strang im Bohr- loch befindet.....	499
4.5 Flow-Check.....	499
5. Bohrlochbeherrschung.....	499
5.1 Allgemeines.....	499
5.2 Einschließen von Bohrungen.....	500
5.3 Totpumpverfahren.....	501
5.3.1 Allgemeines.....	501
5.3.2 Totpumpmethoden mit Gestänge.....	503
5.3.3 Die volumetrische Methode.....	504
5.4 Andere Methoden.....	505
6. Sicherheitsberechnungen.....	506
7. Bohrlochkontroll-Rechner-Programm.....	507
8. Literaturverzeichnis.....	509



BOHRLOCH - KONTROLLE

I ZUSAMMENFASSUNG

Bohrlochkontrolle mit dem Ziel, einen Ausbruch (blowout) zu verhindern, ist in der Tiefbohrtechnik auf Kohlenwasserstoffe ein besonders wichtiges Thema. Eine Reihe von Vorschriften, die zum Teil bereits internationale Gültigkeit haben (entsprechende EG-Richtlinien), unterstreichen die Bedeutung und die internationale Wichtigkeit, die diesem Kapitel zugemessen wird. Beim KONTINENTALEN TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND spielt die Bohrlochkontrolle jedoch eine untergeordnete Rolle, da bei diesen Bohrung wegen der erwarteten geologischen Struktur, auf die die Bohrungen angesetzt wurden, kaum mit entsprechenden Lagerstätten und Zuflüssen aus diesen zu rechnen ist. Trotzdem gelten auch hier die allgemeinen behördlichen Auflagen, die verlangen, daß mit Bohrlochabsperrorganen gearbeitet wird, und daß die Bohrmannschaft und die Aufsichtspersonen mit deren Bedienung sowie mit den Grundlagen der Bohrlochkontrolle vertraut sind.

Das nachstehende Bohrlochkontroll-Programm versteht sich nicht als Lehrbuch für die Bohrlochkontrolle, sondern ist in erster Linie ein Rechenprogramm, das im Falle eines Kicks in schnellster Zeit die erforderlichen Daten, die zum Totpumpen der Bohrung erforderlich sind, liefert. Das Programm steht in GW-Basic unter MS-DOS und ist auf allen PC's mit MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig. Es ist ebenso anwendbar für Situationen, in denen eine Zirkulation möglich ist, wie auch für Situationen, bei denen eine Zirkulation nicht möglich ist (z.B. weil sich kein Gestänge im Bohrloch befindet). Daneben können Sicherheitsbeiwerte wie die Kick-Toleranz und der Druckverlauf im Ringraum, die Bohrlochsohlendrucke, die Drücke am Rohrschuh der letzten Rohrtour, die Choke-Drücke sowie das Zuflüßvolumen beim Auszirkulieren eines Gaskicks mit dem Kick-Severity-Programm berechnet werden. Da das Gesamt-Programm in Menüform geschrieben wurde, lassen sich die einzelnen Berechnungen unabhängig voneinander schnell durchführen. Ein Korrekturprogramm gestattet es, die einmal eingegebenen und separat abgespeicherten Grunddaten einer Bohrung jederzeit zu modifizieren bzw. den bohrtechnischen Gegebenheiten anzupassen.

2

EINLEITUNG

Bohrlochkontrolle und Ausbruchsverhütung (blowout-prevention) haben in der Tiefbohrtechnik einen besonders hohen Stellenwert, weil sie entscheidend mit dazu beitragen, Leben zu schützen, Energievorkommen zu schonen, Bohr- und Erschließungskosten zu senken und nicht zuletzt die Umwelt zu schützen. Aus diesen Gründen sind auch die, die Bohrlochkontrolle betreffenden Vorschriften, weltweit sehr eng gefaßt, so daß die Personen, die sich mit der Erschließung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen beschäftigen, gezwungen sind, sich intensiv mit den Fragen der Bohrlochkontrolle auseinander zu setzen und ihr Wissen um diese Dinge in entsprechenden Schulungen ständig aufzufrischen.

Beim Abteufen der Kontinentalen Tiefbohrung kann allerdings davon ausgegangen werden, daß Kohlenwasserstoffe nicht angetroffen werden, und daß Kicksituationen kaum eintreten dürften. Und wenn, dann könnte es sich höchstens um das Anbohren von gespannten Laugen handeln, die im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen wie Naturgas oder Erdöl vergleichsweise harmlos sind. Trotzdem müssen auch Bohrungen, bei denen die Kickgefahr kaum gegeben ist, wie beispielsweise Kavernenbohrungen oder geologische Aufschlußbohrungen, sofern sie der Bergaufsicht unterstehen, mit den in der KWSt-Bohrtechnik üblichen Bohrloch-Absperreinrichtungen versehen werden, damit im Falle eines Kicks die Bohrung eingeschlossen werden kann. Ausnahmen von dieser Regelung sind nur in Ausnahmefällen möglich.

Aus diesen Gründen ist es richtig, daß auch beim KONTINENTALEN TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND die Möglichkeit gegeben ist, eine Bohrlochkontrollsituation bewältigen zu können. Bohrloch-Absperreinrichtungen und deren Handhabung fallen in den Zuständigkeitsbereich des Bohrpersonals, das dafür entsprechend ausgebildet ist. Ebenso das Erkennen von Kicksituationen und die dann zu ergreifenden Sofortmaßnahmen wie das Einschließen und schließlich das Totpumpen der Bohrung. Deshalb sollen diese Fragen in der vorliegenden Studie auch nur kurz behandelt werden. Hauptzweck der Arbeit war es, mit den in der Tiefbohrtechnik üblichen und international anerkannten Berechnungsgrundlagen ein Rechnerprogramm aufzustellen, das die für die Bohrung Verantwortlichen im Falle eines Kicks in kürzester Zeit in die Lage versetzt, die zum Totpumpen der Bohrung notwendigen Daten zu ermitteln. Da es unterschiedliche Verfahren bei der Kickbekämpfung gibt, wurden diese in Menüform zusammengestellt, wobei alle festen Daten, sowie alle Daten, die sich nur selten ändern, nach einmaliger Eingabe auf Diskette abgespeichert werden und somit bei Bedarf sofort ausgelesen werden können. Dadurch wird die Berechnung beschleunigt und Eingabefehler vermieden.

Das Programm ist auf allen PERSONAL COMPUTERN unter MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig.

3

KICK-ENTSTEHUNG

Ein Kick tritt immer dann auf, wenn der Formationsporendruck, das ist der Druck, den die Porenfüllung eines Gesteins (im weitesten Sinn) auf die Bohrlochswand ausübt, größer ist als der auf die Wand wirkende Druck der Spülungssäule im Bohrloch (hydrostatischer Druck). Durch den Überdruck tritt der Inhalt der Formation (Öl, Gas, Lauge) in das Bohrloch ein und verdrängt dabei die Spülung, so daß es zu einem Überlaufen der Bohrung kommt (Kick).

Wird eine solche Situation schnell erkannt und die Bekämpfung sofort eingeleitet, so kann ein Kick eine verhältnismäßig harmlose Angelegenheit sein. Wird dagegen der Kick zu spät erkannt, so kann dieser leicht in einen Blowout mit allen seinen gravierenden Folgen übergehen.

Da eine Unterdruck-Situation in einem Bohrloch niemals bewußt herbeigeführt werden wird, soll im folgenden kurz aufgelistet werden, wie es zu einer solchen Situation kommen kann.

Einer der wesentlichen Gründe ist eine unzureichende Spüldichte, die allerdings auch wiederum nicht beabsichtigt sein wird, sondern sich im Laufe der Bohrarbeiten ergibt. Ursache hierfür können abnormale Lagerstättendrücke sein. Das kommt insbesondere in geologisch unbekanntem Gebieten, also bei Aufschlußbohrungen, vor, wo plötzlich Formationen angebohrt werden, die unter einem höheren Formationsporendruck stehen, als erwartet wurde. Solche Hochdruck-Lagerstätten können u.a. durch Kompaktion des Speichergesteins entstehen, durch thermische Expansion oder tektonische Vorgänge und sind i.a. nur schwer vorhersagbar.

Erschwerend kommt hinzu, daß in der modernen Bohrtechnik in der Regel druckausgeglichen gebohrt wird, d.h. mit einer Spüldichte, die einen hydrostatischen Druck ergibt, der nur wenige bar über dem erwarteten Formationsporendruck liegt. Dadurch kann ein möglichst hoher Bohrfortschritt erreicht werden, da dieser stark vom Differenzdruck auf der Bohrlochsohle abhängt. Bei diesem Vorgehen können naturgemäß selbst leichte Schwankungen des Formationsporendruckes zu einer Überdrucksituation und damit zu einem Kick führen.

Eine weitere, verbreitete Kick-Ursache ist ein unzureichend mit Spülung gefülltes Bohrloch. Ursache hierfür können beim Bohren Spülungsverluste sein, beim Roundtrip dagegen unsachgemäßes Auffüllen des Bohrlochs beim Ziehen des Stranges. Letzteres ist eine recht häufige Kick-Ursache, weshalb auf das sachgemäße Auffüllen des Bohrloches beim Ausbau des Stranges besonderer Wert gelegt werden sollte. Die Verwendung eines Trip-Tanks ist dabei auf jeden Fall zu empfehlen.

Kicks, die als Folge von Spülungsverlusten eintreten, können große Schwierigkeiten bereiten, da Spülungsverluste teilweise

nur schwer zu bekämpfen sind und Kicks i.a. sehr spät bzw. zu spät erkannt werden, da das Ansteigen des Spülungsspiegels im Bohrloch oft nicht registriert werden kann. Folge solcher Situationen können unterirdische Blowouts, also ein Umsteigen von Lagerstätteninhalten aus tieferen in höhere Formationen sein, die dann meistens außerhalb jeglicher Kontrolle sind.

Swab- und Surge-Effekte können ebenfalls zu Kick-Situationen führen, wobei unter den Swabben oder Ankolben zu verstehen ist, daß z.B. durch zu schnelles Hochfahren des Stranges, insbesondere bei engen Clearance-Verhältnissen, die Spülungssäule unterhalb des Stranges unterbrochen wird, so daß sich der hydrostatische Druck auf der Bohrlochsohle reduziert. Ursache für eine solche Unterbrechung ist, daß die Spülung besonders an den großkalibrigen Strang-Einbauteilen (Stabilizer, Meißel) nicht so schnell vorbei in den unteren Teil des Bohrloches strömen kann, wie der Strang nach oben bewegt wird (Blendeneffekt). Bei einer solchen Unterbrechung wirkt dann nur noch der Druck des unterhalb des Bohrwerkzeugs befindlichen Spülungssäule auf die Bohrlochsohle, was in der Regel völlig unzureichend ist, um den Formationsporendruck zu kompensieren. Abhilfe schafft hier ein langsames Fahren des Stranges.

Surge-Drücke, also Druckwellen, die sich beim schnellen Einlassen eines Stranges vor diesem aufbauen, können zum Fracen des Gebirges und damit zu Spülungsverlusten führen, die wiederum Ursache für Kicks sein können.

Vergaste Spülung (gas cut mud) wird als Kick-Ursache vielfach überbewertet, denn der Einfluß, den eine Vergasung und die damit verbundene Dichtereduzierung auf den Bohrlochsohlendruck hat, ist meistens relativ gering. Allerdings deutet vergaste Spülung darauf hin, daß eine gasführende Schicht durchteuft wurde. Sie ist also ein Anzeichen dafür, daß eine Kicksituation nicht ausgeschlossen werden kann, und daß entsprechende Vorsicht geboten ist. Auch sollte die Spülung bei der übertägigen Aufbereitung ordnungsgemäß entgast werden, da es ansonsten zu Gasansammlungen kommen kann, die dann tatsächlich zu bedeutungsvoller Dichte- und Druckreduzierung führen können.

Ein ganz entscheidender Punkt bei der Kick-Entstehung ist menschliches Versagen, das zusammen mit einer oder mehreren der genannten Ursachen zu Kicksituationen führen kann. Hier hilft nur eine gründliches Aus- und Weiterbildung der Bohrmannschaft, damit diese Kicksituationen jederzeit gewachsen ist und zum richtigen Zeitpunkt die richtigen Maßnahmen ergreift.

4 KICK-ERKENNUNG

4.1 Allgemeines

Kicks kommen meistens nicht überraschend, sondern kündigen sich durch eine Reihe von eindeutigen Signalen an. Diese zu kennen und zu erkennen ist wichtig, um schnell entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Nur durch schnelles und fachgerechtes Handeln kann eine Kicksituation erfolgreich abgewendet und damit die Gefahr eines Blowouts vermieden werden.

Bei den Warnsignalen, die auf einen Kick hindeuten, muß zwischen solchen Anzeichen, die ihre Ursache eindeutig in einer Kicksituation haben, und solchen, die auch andere Ursachen haben können, unterschieden werden. Erstere werden als primäre, letztere als sekundäre Indizien bezeichnet. Die sekundären Indizien sind jedoch deshalb besonders bedeutungsvoll, weil sie, wenn sie einmal Anlaß zu einer Fehldeutung waren, gern verharmlost werden, so daß dann, wenn sie tatsächlich auf einen Kick hinweisen, nicht ernst genommen werden.

4.2 Anzeichen während des Bohrens

4.2.1 Zunahme der Spülungs-Auslaufrate

Eine Zunahme der Spülungsfließrate bei konstanter Pumprate ist einer der ersten, deutlichen Hinweise auf eine Kicksituation, da hier ein Zufluß aus der Lagerstätte zum Spülungs-Zirkulationsvolumen hinzu kommt. Anzeigegerät ist das Flowmeter.

4.2.2 Anstieg der Tankfüllstände

Steigen die Spülungsspiegel in den Umlauftanks an, ohne daß neue Spülung dem Zirkulationssystem zugesetzt wurde, so zeigt das, aus den vorstehend beschriebenen Gründen, ebenfalls eine Kicksituation an. Anzeigegeräte sind die Tankstandsanzeiger.

4.2.3 Ausfließen der Spülung bei abgeschalteten Pumpen

Fließt auch bei abgeschalteten Pumpen Spülung aus dem Bohrloch aus, so zeigt das wiederum eine Kicksituation an, da der Zufluß aus der Lagerstätte die Spülung aus dem Bohrloch drückt.

4.2.4 Änderung der Bohrgeschwindigkeit

Eine plötzliche Änderung des Bohrfortschritts (sog. drilling break), ist ebenfalls ein Hinweis auf einen möglichen Kick. Der Grund hierfür ist, daß der Bohrlochsohlen-Differenzdruck umgekehrt wurde. Normalerweise liegt ein Überdruck des hydrosta-

tischen Druckes vor, was dazu führt, daß die vom Bohrelement mechanisch gelösten Gesteinsteilchen (Cuttings) durch diesen Druckanteil auf die Bohrlochsohle gepreßt werden. Überwiegt jedoch der Formationsporendruck (Kick), so wird das Cuttings-teilchen nach dem mechanischen Lösen in den Spülstrom geschleudert und abtransportiert. Das führt zu einer optimalen Bohrlochsohlenreinigung und damit zu gesteigertem Bohrfortschritt.

Allerdings kann für einen erhöhten Bohrfortschritt auch eine Änderung der Bohrbarkeit des Gesteins (Formationswechsel) verantwortlich sein, so daß es sich hier nur um ein sekundäres Indiz handelt. Ein Flowcheck wird Klarheit über die Ursache verschaffen.

4.2.5 Verschnittene Spülung

Verschnittene Spülung oder Cut Mud entsteht u.a. dadurch, daß gashaltige Cuttings mit dem Spülstrom nach oben transportiert werden und in druckschwächeren Zonen entgasen. Dabei ergeben selbst unter Lagerstättenbedingungen geringe Gasinhalte an der Oberfläche große Gasvolumina, was oftmals zu Fehldeutungen führt. Allerdings deutet vergaste Spülung immer auf Gasinhalte in der durchteuften Formation hin, wenngleich in der Regel die Permeabilitäten und/oder Porositäten so gering sind, daß es nicht zu einer Kicksituation kommen kann. Trotzdem ist auch bei diesem Alarmzeichen Vorsicht geboten, da sich ein Kick immer entwickeln kann.

4.2.6 Sonstige Anzeichen

Eine unproportional zum Vertiefen der Bohrung ansteigende Spülungstemperatur, sowie eine Zunahme der Salinität der Spülung seien aus Gründen der Vollständigkeit noch als Kickanzeichen genannt, obwohl sie in der Praxis bedeutungslos sind.

Als weitere Indizien für Kicks zählen die Abnahme des Pumpendruckes und die Zunahme der Pumpenhubzahl. Das liegt in der Dichtereduzierung der Zirkulationsspülung durch das zugeflossene, leichtere Medium aus der Formation begründet. Aus dem gleichen Grund wird es auch zu einer Änderung des Stranggewichtes kommen, da der Auftrieb, der auf den Strang wirkt, abnimmt.

Schließlich kann es noch zu einer Änderung der Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Drehtischs kommen, ausgelöst durch den schwankend erhöhten Bohrfortschritt (drilling break).

4.3 Anzeichen während des Roundtrips

Nimmt das Bohrloch während des Gestängeausbaus nicht die erforderliche Spülmengemenge auf, so deutet das darauf hin, daß ein Teil des Bohrlochs aus der Formation aufgefüllt wird, daß also ein Kick eingetreten ist. Gleiches gilt auch, wenn das Bohrloch während des Gestängeeinbaus stärker überläuft, als der Gestängeverdrängung entspricht.

4.4 Anzeichen, wenn sich kein Strang im Bohrloch befindet

Befindet sich kein Gestänge im Bohrloch, so gibt es nur ein Anzeichen für einen Kick, das Überlaufen des Bohrloches (Tankzufluß). Selbst wenn solche Kicksituationen selten sind, da die Bohrung normalerweise beim Bohren, spätestens beim Gestängeausbau hätte kicken müssen, sollte eine Bohrung auch dann, wenn sich kein Strang im Loch befindet, ständig auf Zufluß überwacht werden. Das geschieht am besten mittels eines Triptanks, der mit dem Spülsausrücklauf verbunden ist, da hier bereits kleinere Zuflüsse rechtzeitig erkannt werden können.

4.5 Flow-Check

Wird ein Kickanzeichen wahrgenommen, das nicht eindeutig auf eine Kicksituation zurückzuführen ist, so sollte mittels eines sog. Flow-Checks geprüft werden, ob ein Zufluß stattgefunden hat oder nicht.

Um einen Flow-Check durchzuführen, werden die Pumpen gestoppt (soweit sie bisher in Betrieb waren) und der Auslauf mit dem Triptank verbunden. Nun wird kontrolliert, ob aus dem Bohrloch Spülung ausfließt, was in dieser Situation normalerweise nicht geschehen dürfte. Tritt Spülung aus, so ist das ein sicheres Indiz für einen Kick, die Bohrung muß nun eingeschlossen und die Totpumpmaßnahmen müssen eingeleitet werden.

5 BOHRLOCHBEHERRSCHUNG

5.1 Allgemeines

Die Bohrlochbeherrschung, darunter sind die Maßnahmen zu verstehen, die zur Vermeidung eines Kicks bzw. eines Blowouts zu ergreifen sind, können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden.

Unter der primären Bohrlochbeherrschung versteht man, daß man sich jederzeit so verhält, daß es garnicht erst zu einer Kicksituation kommt. Das bedeutet, daß die Drucksituation in einer

Bohrung ständig beherrscht wird, sofern das technisch möglich ist.

Die sekundäre Bohrlochbeherrschung (vgl. Kap. 5.2) umfaßt alle Maßnahmen, die zu ergreifen sind, wenn ein Kick trotzdem eingetreten ist, um das Bohrloch wieder in einen stabilen Zustand zu überführen.

Der tertiären Bohrlochbeherrschung werden i.a. solche Maßnahmen zugeordnet, die zu ergreifen sind, wenn normale Methoden erfolglos bleiben oder sind. Hierzu zählen im wesentlichen Techniken wie das Einstrippen oder Einsnubben des Stranges oder das Einpumpen von Zement- oder Schwerspatstopfen, um eine Kick-situation zu beenden. Teilweise werden dieser Gruppe aber auch Methoden zur Blowout-Bekämpfung (Entlastungsbohrungen, Ausschießen brennender Sonden, Preventermontage auf eruptierende Sonden ...) zugerechnet.

5.2 Einschließen von Bohrungen

Tritt eindeutig ein Kick ein, so muß die Bohrung eingeschlossen werden. Nur so ist zu verhindern, daß aus dem Kick ein Blowout wird.

Art und Vorgehensweise beim Einschließen hängt im wesentlichen von Art und Ausrüstung der Bohranlage und von der Art der Preventeranlage ab. Außerdem spielt hier eine gewisse Philosophie des Einschließens eine entscheidende Rolle.

Allgemein ist man heute der Auffassung, eine Bohrung nach Eintritt eines Kicks so schnell wie möglich einzuschließen, unabhängig von der Größe des Kicks. Dabei kann entweder die Methode des sog. harten Einschließens mittels eines Backenpreventers oder des Ringpreventers angewendet werden, oder die Methode des sog. weichen Einschließens. Dabei wird zunächst die Hydraulik-Düse geöffnet und anschließend der Ringpreventer geschlossen. Durch dieses Vorgehen wird der sog. Wasserschlag, der beim harten Einschließen unvermeidbar ist, jedoch auch nicht überbewertet werden sollte, vermieden werden.

Welche Methode letztlich angewendet wird, hängt von der entsprechenden Einstellung des Betriebes zu Fragen der Bohrlochkontrolle ab. Hier muß jeweils auf die geltenden Betriebsanweisungen verwiesen werden. Gleiches gilt auch für die detaillierte Vorgehensweise beim Einschließen einer Bohrung.

Allerdings gibt es für das Einschließen von Bohrungen auch Grenzen, die dann erreicht werden, wenn sich nach dem Einschließen im Bohrloch Drücke aufbauen, die den Fracdruck an besonders gefährdeten Stellen des Bohrloches überschreiten. Als besonders frac-gefährdet wird i.a. der Bereich am Rohrschuh der zuletzt eingebauten Rohrtour angesehen. Da der kritische Druck an dieser Stelle nicht gemessen werden kann, bedient man sich des sog. MAASP (maximum allowable annular surface pressure).

Das ist der Ringraum-Kopfdruck, der zusammen mit dem hydrostatischen Druck zwischen Oberfläche und Rohrschuhteufe dem Fracdruck am Rohrschuh entspricht. Dieser Druck wird berechnet und gilt als Grenzwert. Wird er beim Einschließen überschritten, so muß entweder der Einschließvorgang unterbrochen werden, oder man nimmt einen möglichen Frac mit den entsprechenden Konsequenzen (unterirdischer Blowout) in Kauf. Wird der Einschließvorgang dagegen unterbrochen (Düse nur soweit schließen, bis der MAASP erreicht ist), so tritt weiter Lagerstätteninhalt in das Bohrloch ein. Gleiches gilt auch bei zu flach eingebrachten vorhergehenden Rohrtouren.

In beiden Fällen kann mittels der sog. LOW CHOKE Methode gearbeitet werden. Diese, zu den unkonventionellen Totpumpverfahren gehörende Methode, arbeitet so, daß man unter Berücksichtigung des MAASP so schnell wie möglich beschwerte Flüssigkeiten in das Bohrloch einpumpt, um so einen möglichst hohen Bohrlochsohlendruck und damit Gegendruck gegen den Formationsporendruck zu bekommen.

Ist die Bohrung eingeschlossen worden, so sind neben der Zuflußmenge der Gestänge- und der Casingeinschließdruck zu ermitteln.

Der Gestängeeinschließdruck (auch Steigleitungsdruck) kann nur ermittelt werden, wenn sich Gestänge im Bohrloch befindet und dieses auch bis auf Sohle eingebaut ist. Der Gestängeeinschließdruck ergibt zusammen mit den hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Strang den Formationsporendruck, also den Druck, mit dem der Kick eingetreten ist.

Der Casingeinschließdruck ergibt ebenfalls den Formationsporendruck, allerdings zusammen mit dem hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Ringraum plus dem hydrostatischen Druck der Säule des zugeflossenen Mediums. Da jedoch i.a. weder die Art und Dichte (besonders bei Gaskicks) des zugeflossenen Mediums, noch die exakte Höhe des Kicks im Ringraum bekannt sind, ist der Casingeinschließdruck nur von bedingter Aussagekraft. Dagegen liefert der Gestängeeinschließdruck den Formationsporendruck dann recht genau, wenn die Dichte der einzirkulierten Spülung bekannt ist, was stets der Fall sein sollte.

Aus den geschilderten Gründen wird der Gestängeeinschließdruck bei allen Totpumpoperationen als Meßgröße zugrunde gelegt. Er wird jedoch beim Totpumpen noch vom Zirkulationsdruck überlagert.

5.3 Totpumpverfahren

5.3.1 Allgemeines

Ist ein Kick erkannt und die Bohrung eingeschlossen worden, so beginnt die wesentliche Arbeit, das Totpumpen des Bohrloches.

Hierunter ist zu verstehen, daß das eingedrungene Medium kontrolliert aus dem Bohrloch auszirkuliert wird und gleichzeitig oder im Anschluß daran Maßnahmen ergriffen werden, die eine solche Situation im Bohrloch schaffen, daß ein weiteres Eintreten von Porenhalt in die Bohrung ausgeschlossen wird.

Ist die Kicksituation aufgrund zu leichter Spülung (zu geringer hydrostatischer Bohrlochsohlendruck) entstanden, so bestehen diese Maßnahmen darin, die Spülung entsprechend zu beschweren. Ist die Kicksituation jedoch eingetreten, weil ein Druckungleichgewicht auf Sohle durch z.B. abgesunkenen Spülungsspiegel entstanden ist, so braucht die Spülung nicht beschwert zu werden. In einem solchen Fall muß lediglich der Zufluß auszirkuliert und das Bohrloch anschließend gefüllt gehalten zu werden.

Nach dem Einschließen der Bohrung sind die Maßnahmen zum Totpumpen unmittelbar einzuleiten, da es - insbesondere bei Gas-kicks - aufgrund des großen Dichteunterschieds zwischen Spülung und Zuflußmedium zum Aufsteigen des Zuflußmediums im geschlossenen Bohrloch kommt. Man bezeichnet das als Percolation.

Bei der Percolation von Gas transportiert die Gasblase, da sie in einer eingeschlossenen Bohrung nicht expandieren kann, den Lagerstättendruck mit nach oben. Dieser wirkt nun wie ein Kolben nach oben und unten auf die Spülungssäule und schafft damit, je höher sie aufsteigt, umso kritischere Druckverhältnisse im Bohrloch. Aus diesem Grunde ist das Auszirkulieren eines Kicks auch so zu gestalten, daß der (Gas-)Zufluß stets expandieren kann, da nach den Gasgesetzen das Produkt aus Druck und Volumen stets konstant ist. Das bedeutet aber, daß bei größer werdendem Volumen (Expansion) der Druck zwangsläufig abnehmen muß.

Um eine Bohrung totzupumpen, wurden eine Reihe von einschlägigen Konzepten entwickelt, von denen die nachstehend aufgeführten die größte Bedeutung haben:

- * die Ein-Zirkulations- oder Warte-und-Beschwere-Methode
- * die Zweizirkulations- oder Bohrmeister-Methode
- * die Gleichzeitige Methode
- * die Volumetrische Methode
- * die Totpumpmethode mit reduziertem Gegendruck, auch Low Choke Methode genannt
- * die Über-Kopf-Totpumpmethode (bullhead squeezing)
- * die Totpumpmethode mit linksläufigem Spülungsumlauf (reversed circulating method)

5.3.2 Totpumpmethoden mit Gestänge

Als nahezu gleichwertige Totpumpmethoden für den Fall, daß durch den Strang zirkuliert werden kann, sind die Bohrmeister- und die Warte-und-Beschwere-Methode.

Die Warte-und-Beschwere-Methode ist nach Ansicht vieler Bohrtechniker die geeignetste Methode, um einen Kick unter Kontrolle zu bringen. Dabei wird Spülung mit einer dem Formationsporendruck entsprechenden, erhöhten Dichte mit konstanter Rate in das Bohrloch einzirkuliert bei gleichzeitigem Auszirkulieren des Kicks. Beide Arbeitsgänge erfolgen also während nur einer Zirkulation. Das erspart natürlich Zeit, wenngleich vor Beginn der Zirkulation die Spülung beschwert werden muß, was zuzüglich der dafür erforderlichen Berechnungen Zeit kostet. Somit spart man bei dieser Methode nicht die Hälfte der Zeit, die die Zwei-Zirkulationsmethode erfordert, sondern nur etwa ein Viertel.

Nicht angewendet werden kann diese Methode bei flachen Bohrungen, die einen Gaskick bekommen haben, weil das Gas mit einer Geschwindigkeit von im Mittel etwa 300 - 400 m/h in der eingeschlossenen Bohrung aufsteigt (percoliert), so daß die Zeit zum Ansetzen beschwerter Spülung in der Regel kaum ausreicht. In einem solchen Fall kommt die Bohrmeister-Methode zur Anwendung. Dabei kann unmittelbar nach dem Einschließen und der Stabilisation der Einschließdrücke (d.h. nach etwa 5 - 15 Minuten) mit dem Auszirkulieren des Kicks begonnen werden. Das Auszirkulieren geschieht mit der zum Zeitpunkt des Kicks im Bohrloch befindlichen Spülung. Ist der Kick auszirkuliert, muß die Bohrung nach wie vor geschlossen gehalten werden, da es nur durch Aufbringen eines Kopfdruckes möglich ist, den Formationsdruck zu kompensieren.

Während des Auszirkulierens kann nun separat beschwerte Spülung hergestellt werden, die dann in einer zweiten Zirkulation in die Bohrung eingepumpt wird und diese totpumpt. Obwohl der Zeitbedarf bei dieser Methode größer ist, läßt sie sich einfacher handhaben und ist deshalb auch die verbreitetste Totpumpmethode überhaupt.

Für beide Methoden gilt, daß die Bohrung dann als totgepumpt zu betrachten ist, wenn sich nach dem Verpumpen der beschwerten Spülung beim Einschließen kein Kopfdruck mehr ergibt und ein Flow-Check keinen Zufluß zeigt.

Wichtig bei beiden Methoden ist, daß auch während der Zirkulation ein konstanter Bohrlochsohlendruck beibehalten wird, der mindestens dem Formationsporendruck entsprechen muß, besser jedoch einige bar über diesem liegt, damit bei leichten Druckschwankungen kein erneuter Zufluß stattfindet. Da sich der Bohrlochsohlendruck auch beim Zirkulieren aus dem hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Strang zuzüglich dem Gestängeeinschließdruck zusammensetzt, muß der Reibungsdruckverlust im Strang zum Einschließdruck hinzuaddiert und der sich dann ergebende Kopfdruck konstant gehalten werden. Dazu muß

aber der Reibungsdruckverlust bekannt sein. Er wird in bestimmten Zeitabständen ermittelt, indem Spülung mit der Rate, die beim Totpumpen angewendet werden soll, durch das Bohrloch zirkuliert wird.

Die Zirkulationsrate beim Totpumpen wird gegenüber der beim Bohren angewendeten Rate reduziert, weil durch die Reduzierung der zeitliche Ablauf gestreckt wird, so daß die Vorgänge beim Totpumpen besser kontrolliert und gesteuert werden können. Außerdem werden die Reibungsdruckverluste bei reduzierten Zirkulationsrate erheblich reduziert, was mehrere Vorteile mit sich bringt. Zum einen kann im niedrigeren Druckbereich gearbeitet werden, was insbesondere die Absperrorgane der Bohrung schont, zum andern muß beim Totpumpen der Gestängeeinschließdruck zusätzlich zum Zirkulationsdruck von der Pumpe aufgebracht werden. Liegt der Zirkulationsdruck, einschließlich Druckabfall am Bohrwerkzeug, beim normalen Bohrbetrieb ohnehin schon nahe am zulässigen Pumpendruck, so besteht die Gefahr, daß die Pumpe den Einschließdruck nicht mehr aufbringen kann.

Die gleichzeitige Methode ist eine Kombination der Warte- und-Beschwere- und der Bohrmeister-Methode. Dabei wird nach dem Einschließen der Bohrung die Zirkulation mit der unbeschwerten Spülung sofort begonnen, jedoch wird gleichzeitig mit oder ohne System mit dem Beschweren der Spülung begonnen. In der Regel wird das Beschwerungsmittel direkt in den Saugtank gegeben, so daß die effektive Dichte der eingepumpten Spülung meistens nicht bekannt ist. Das Beschweren erfolgt solange, bis die aus dem Bohrloch austretende Spülung die berechnete, neue Dichte aufweist.

Die gleichzeitige Methode ist meistens sehr langwierig, da mehrere Umläufe der Spülung erforderlich sind, bis die angestrebte Spüldichte vorliegt. Sie hat allerdings den Vorteil, daß durch die sofort beginnende Teilbeschwerung die Einschließdrücke reduziert werden, was zur Schonung der Absperrorgane ebenso führt wie zu einer gesamten Druckentlastung des Bohrloches. Das kann dann von Bedeutung sein, wenn der MAASP vom Casingeinschließdruck nahezu erreicht und bei der Zirkulation überschritten wird. Ansonsten hat die gleichzeitige Methode keine große Bedeutung, zumal wenn versucht wird, sie kontrolliert durchzuführen, die Beschwerung der Spülung also mit System durchzuführen. Ein solches Verfahren ist zwar theoretisch möglich, jedoch für den praktischen Betrieb selbst bei Rechnereinsatz zu aufwendig und damit unrealistisch.

5.3.3 Die volumetrische Methode

Befindet sich bei Eintritt des Kicks kein oder nicht genügend Gestänge im Bohrloch, um den Kick von Sohle aus auszuzirkulieren, oder ist bei eingebautem Strang eine Zirkulation nicht möglich (blockierte Düse o.ä.), so muß die volumetrische Methode angewendet werden. Diese Methode basiert darauf, daß der Bohrlochsohlendruck leicht über dem Formationsporendruck

gehalten wird, während der Kick im Bohrloch aufsteigt. Dabei muß einem Gaskick die Möglichkeit der Expansion gegeben werden, indem Spülung kontrolliert aus der Bohrung abgelassen wird.

Die volumetrische Methode wird im wesentlichen bei Gaskicks angewendet, da es bei Flüssigkeitskicks i.a. andere, einfachere Methoden gibt, um den Zufluß aus dem Bohrloch zu beseitigen.

Nachdem der Kick die Oberfläche erreicht hat und abgelassen wurde, muß die zur Expansion eines Gaskicks abgelassene Spülung durch die Kill-Line wieder in das Bohrloch eingepumpt werden, und zwar in demselben Maße wie Gas abgelassen wird. Durch diese Maßnahme wird der Druck in Bohrloch konstant gehalten. Das Einpumpen der Spülung geschieht wie das Ablassen derselben in kleinen Volumeneinheiten, damit die Druckverhältnisse in der Bohrung im vertretbaren Rahmen bleiben.

Ein Beschweren der Spülung ist in der Regel bei solchen Kicks nicht erforderlich, weil ansonsten der Kick bereits beim Bohren hätte eintreten müssen.

5.4 Andere Methoden

Weitere Totpumpmethoden sind die LOW CHOKE Methode, auf die bereits eingegangen wurde (vgl. Kap. 5.2), sowie das Totpumpen über Kopf und die Linkszirkulation.

Das Totpumpen über Kopf (bullheading) wird beispielsweise bei Sauergaskicks angewendet, da Sauergas auf keinen Fall an die Oberfläche gelangen sollte. Dabei wird tunlichst beschwerte Spülung durch die Kill-Line in das Bohrloch gepumpt und versucht, den Kick zurück in die Formation zu drücken. Daß der Kick dabei nicht in die Formation geht, aus der er gekommen ist, sondern sich einen neuen Weg schafft, was die Gefahr eines unterirdischen Blowout in sich birgt, muß dabei in Kauf genommen werden.

Die Methode der Linkszirkulation (reversed circulation) kann nur dann angewendet werden, wenn sich im Strang kein Rückschlagventil befindet und tunlichst auch kein Bohrwerkzeug mit Düsen oder entsprechend kleinen Spülsaustrittsöffnungen, da bei diesen die Gefahr der Verstopfung durch Bohrkleinmaterial besteht. Deshalb wird die Linkszirkulation bevorzugt im Work-over-Betrieb angewendet, wenn mit unten offenen Strängen gearbeitet wird. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Drücke im Ringraum erheblich reduziert werden beim Auszirkulieren, was bei offenen Bohrlöchern und druckschwachen Formationen erhebliche Sicherheiten mit sich bringt.

6

SICHERHEITSBERECHNUNGEN

Neben den reinen Bohrlochkontrollmaßnahmen wie Einschließen und Totpumpen von Bohrungen, können auch noch einige Sicherheitsberechnungen durchgeführt werden. Diese haben mit der Bohrlochkontrolle nur indirekt zu tun, indem beispielsweise die Drücke im Ringraum beim Auszirkulieren berechnet werden, um ein Bild zu bekommen, wo Druckspitzen auftreten, die möglicherweise gefährlich werden können, oder um nach einer Totpumpaktion zu ermitteln, welcher Sicherheitsfaktor bei einer möglichen, neuen Kicksituation noch gegeben ist. Die Berechnungen sind bekannt unter den Bezeichnungen Kick-Severity und Kick-Toleranz.

Die Kick-Severity (Schwere des Kicks) ist ein Berechnungsverfahren, das die Übertagedrücke (Casingdrücke), die Untertagedrücke wie Bohrlochsohlendruck, Drücke an verschiedenen Stellen des Bohrloches beim Auszirkulieren des Kicks, Druck am Rohrschuh der letzten Rohrtour und die übertägige Volumenzunahme beim Auszirkulieren eines Kicks berechnet. Dabei ist zu unterscheiden, ob mittels der Bohrmeister- oder mittels der Warte- und-Beschwere-Methode auszirkuliert wird, da sich bei beiden Verfahren unterschiedliche Ringraumdrücke ergeben. Diese Art von Berechnung ist besonders wichtig, wenn ein Gaskick auszuzirkulieren ist, und wenn der Casingeinschließdruck bereits nahe am MAASP liegt, also ein relativ druckschwaches Gebirge ansteht oder ein großer Zufluß stattgefunden hat.

Unter der Kick-Toleranz ist praktisch ein Sicherheitsfaktor zu verstehen, zwischen der äquivalenten Spüldichte zuzüglich dem Chokedruck, ausgedrückt in Dichtewerten, im Falle des Einschließens der Bohrung bei einem erneuten Kick, und der tatsächlichen Spüldichte der im Bohrloch befindlichen Spülung. Dieser Sicherheitsfaktor führt oftmals zu Fehlinterpretationen, da angenommen wird, daß die Differenz zwischen tatsächlicher Spüldichte und Fracdruck (ausgedrückt in Dichtewerten) für einen neuen Kick bzw. für die Beschwerung der Spülung bei einer erneuten Kicksituation zur Verfügung stünden. Dabei wird vergessen, daß der Casingeinschließdruck oder Chokedruck wie eine Dichtesteigerung der Spülung wirkt (Kopfdruck + hydrostatischer Druck = Bohrlochsohlendruck), die bei der Berechnung der Sicherheitsmarge mit einbezogen werden muß. Der Chokedruck hängt aber von der Größe des Zuflusses, der Teufe der Bohrung, den Clearanceverhältnissen und anderen Faktoren ab und ist nicht überschlagsmäßig zu erfassen.

Das Toleranz- Berechnungsprogramm ermöglicht die Berechnung der max. zulässigen, äquivalenten Spüldichte sowie des max. möglichen Chokedruckes und des max. Formationsporendruckes bei einer bestimmten Kickgröße. Nach Ermittlung dieser Daten kann nun entschieden werden, ob die Sicherheitsmarge für eine erneute, eventuelle Kicksituation ausreichend ist, oder ob eine Zwischenverrohrung eingebracht werden muß.

7 BOHRLOCHKONTROLL-RECHNER-PROGRAMM

Das für KTB erarbeitete Bohrlochkontroll-Programm basiert in seinem allgemeinen Teil auf den international üblichen Berechnungsverfahren.

Das Rechnerprogramm ist in GW-Basic unter MS-DOS geschrieben und auf allen PC's mit MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig. Es wurde den bei KTB vorhandenen TANDY-PC's und dem OKI-Laser-Drucker speziell angepaßt.

Das Programm kann sowohl auf einer Festplatte installiert, wie auch auf Rechnern mit 2 Laufwerken betrieben werden. Es ist unterteilt in einen Programmteil und einen Speicherteil. Im Speicherteil werden alle Daten, die für eine Bohrlochkontroll-Berechnung erforderlich sind, gespeichert, so daß bei sich wiederholenden Berechnungen auf diese Daten zurückgegriffen werden kann. Der weitere Vorteil ist, daß alle Daten einer Bohrung, die sich nicht oder nur von Zeit zu Zeit ändern, vorweg eingegeben und gespeichert werden können, so daß im Falle eines Kicks nur 5 Werte eingegeben werden müssen, um eine komplette Kickkontroll-Berechnung durchführen zu können. Diese Eingabedaten sind:

- * Teufe des Zuflusses
- * Gestänge- und Casingeinschließdruck
- * Zuflußvolumen
- * Zeitpunkt des Kicks.

Die Speicherdaten werden automatisch mit dem Bohrungsnamen gekennzeichnet, so daß eine Verwechslung mit anderen Bohrungen nicht möglich ist.

Um eine höhere Effektivität zu bekommen, wurde das Programm als Menü-Programm geschrieben mit folgenden Einzel-Programmen:

- * Daten-Eingabe-Programm
- * Korrektur-Programm zur Änderung gespeicherter Daten
- * Rechenprogramme zur Berechnung der Totpumpmethoden nach der Bohrmeister- und der Warte-und-Beschwere-Methode
- * Rechenprogramm zur Berechnung der volumetrischen Methode
- * Rechenprogramme zur Berechnung von Kick-Toleranz und Kick-Severity

Die Eingabedaten für Rohr- und Bohrlochdurchmesser können in Zoll oder alternativ in metrischen Einheiten eingegeben werden. Umrechnungen entfallen somit. Der Anwender kann während der Arbeit mit dem Programm entscheiden, in welchen Einheiten gerechnet werden soll, unabhängig von den Einheiten der Eingabedaten.

Bei Anwendung des Kick-Severity-Programms stehen dem Benutzer

mehrere Möglichkeiten offen:

- * Berechnung der Ringraumdrücke bei einer bestimmten Höhe des Kicks (Gasblase) alternativ für die Bohrmeister- oder die Warte-und-Beschwere-Methode
- * kontinuierliche Berechnung des Druckverlaufs im Ringraum beim Aufsteigen des Kicks (Gasblase) in Tabellenform

Das Programm startet automatisch.

LITERATURVERZEICHNIS

2. CHENEVERT, M.E. and HOLLO, R. (1981) : Drilling Engineering Manual - Penn Well Publishing Comp., Tulsa (Okl./USA).
1. REHM, B. (1970) : Pressure Control in Drilling - The Petroleum Publishing Co. - Tulsa (Okl./USA) - Reprinted from the Oil & Gas Journal.
3. SCHAUMBERG, G. : Vorlesungsunterlagen und Scripten zum Thema 'Bohrlochkontrolle' (unveröffentlicht) - Deutsche Bohrmeisterschule, Celle.

Technische Universität Berlin
Institut für Bergbauwissenschaften
Straße des 17. Juni 135
1000 Berlin 12

Cuttings-Korrelations-Untersuchungen Austragsfähigkeit von Cuttings

Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Wolff
Dipl.-Ing. P. John

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielsetzung.....	514
2. Stand der Kenntnisse.....	514
2.1 Strömungsmechanische Grundlagen.....	514
2.2 Einflußparameter auf Feststoff-Fluid-Förderung.	515
2.2.1 Korngröße und Kornform.....	515
2.2.2 Partikelverteilung über den Rohrquerschnitt....	515
2.3 Austragsverhalten von Bohrspülungen.....	517
2.3.1 Bohrkleingröße.....	517
2.3.2 Geschwindigkeiten im Ringraum.....	518
3. Bohrkleinuntersuchungen an laufenden Bohrungen.....	518
3.1 Durchgeführte Bohrkleinbeprobung.....	518
3.2 Laborauswertung.....	520
3.2.1 Quantitative Analyse.....	520
3.2.2 Qualitative Analyse.....	524
3.3 Schlußfolgerungen.....	524
4. Ansätze für ein verbessertes Rechenmodell.....	528
5. Einflußgrößenuntersuchung.....	531
6. Untersuchungsergebnis und Schlußfolgerung.....	536
6.1 Bisher nicht oder nur unvollständig erfaßte Einflußbereiche.....	536
6.2 Nachbesserungsvorschläge.....	537
6.2.1 Betriebliche Untersuchungen.....	537
6.2.2 Experimentelle Untersuchungen.....	538
6.2.3 Theoretische Untersuchungen.....	539
Literaturverzeichnis.....	539

1 ZIELSETZUNG

Um aus Bohrlochausträgen eindeutige Rückschlüsse auf die von der Bohrung durchteuften Formationen ziehen zu können, muß das Aufstiegsverhalten der festen Bestandteile der Bohrspülung hinreichend exakt beschrieben werden.

Lösungsansätze zu dieser Problematik finden sich in der einschlägigen Literatur der Erdöl- bzw. Tiefbohrtechnik. Diese Ansätze sind zu überprüfen und ihre Einflußparameter zu wichten, um so ein Bestimmtheitsmaß für diese Lösungsmodelle zu ermitteln.

Begleitend zu diesen theoretischen Betrachtungen sollten praktische Versuche durchgeführt werden, deren Ergebnisse in die Rechenmodelle eingearbeitet werden sollten, um deren Aussagekraft zu erhöhen.

Als Ergebnis ist ein verbessertes Rechenmodell zum Bohrkleinaustrag bei Tiefbohrungen anzustreben, welches den einleitend skizzierten Anforderungen genügt.

2 STAND DER KENNTNISSE

Als Arbeitsgrundlage für die vorliegende Dokumentation wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche bei den Datenbanken "DOMA", "ENERGY", "COMPENDEX" und "GEOS" bzgl. des hydraulischen Feststofftransportes in sämtlichen Bereichen des Bergbaus durchgeführt.

2.1 Strömungsmechanische Grundlagen

Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge beim vertikalen und horizontalen Feststofftransport werden bzgl. des fluiden Transportmediums in verschiedenen Modellen beschrieben. Gemein ist diesen verschiedenen Modellen die Unterteilung des Transportmediums in Newton'sche und Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten. Ersteren wird bei verschiedenen Strömungszuständen, Drücken und Temperaturen eine konstante Viskosität zugeschrieben. Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten zeigen im Gegensatz dazu Veränderungen ihrer Viskosität in Abhängigkeit der o.a. Parameter. Dieses Stoffverhalten wird in diversen rheologischen Modellen, von denen das Bingham-Plastic und das Power-Law die am weitesten verbreiteten sind, beschrieben. Für die in Ringräumen auftretenden Scherraten gibt das Power-Law-Modell, welches zur Beschreibung der Viskosität die Größen k (Konsistenz-Index) und n (Power-Law-Exponent) benutzt, hinreichend genaue Resultate. Diese Auffassung teilen fast alle Autoren, die sich in der jüngeren Vergangenheit mit fluidmechanischen Problemen der Tiefbohrtechnik beschäftigt haben. Dagegen muß festgestellt werden, daß die Meinungen bei der Festlegung des Förderzustandes für maximale Austragsfähigkeit der Bohrspülung weit divergieren. So wird in der Literatur einerseits ein laminarer Strömungszustand bei hoher Viskosität des Fördermediums favorisiert; von anderen Autoren jedoch durch Experimente belegt, daß eine turbulente Strömung bei kleiner Viskosität entsprechende Resultate liefern soll.

2.2 Einflußparameter der Feststoff-Fluid-Förderung

Die in verschiedenen Bergbauzweigen realisierten Projekte, deren Anfänge bis in die zweite Hälfte des vorigen Jahrhunderts zurückreichen, sind in der Regel nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten konzipiert. Dies bedeutet, daß die technisch-konstruktiven Parameter dieser Anlagen (Rohrdurchmesser, Feststoffkonzentration, Korngröße und Strömungsgeschwindigkeit) unter der Prämisse der Kostenminimierung gewählt wurden.

2.2.1 Korngröße und Kornform

Eng miteinander verknüpft sind in der Regel die Parameter, Korngröße (bzw. Kornform) und Strömungsgeschwindigkeit. Lediglich Suspensionen mit Feststoffpartikeln im Bereich $< 30 \mu\text{m}$ werden als homogene Fluide angesehen. Für den Bereich der turbulenten Strömung wird daher von einer nahezu gleichmäßigen Feststoffverteilung über den Rohrdurchmesser ausgegangen; die Sedimentation des Feststoffes beginnt erst im Bereich der laminaren Strömung.

Von einer echten zweiphasigen Strömung wird dagegen erst bei Korngrößen ab $50 \mu\text{m}$ gesprochen. In diesem Fall muß bei allen Überlegungen die Wechselwirkung zwischen Feststoffpartikeln und Transportmedien berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wurde aufgrund experimentell/theoretischer Untersuchungen (Becker, 1959) für Feststoffpartikel ein Widerstandskoeffizient als Funktion der Partikel-Reynolds-Zahl eingeführt, der den viskosen und den Trägheitswiderstand berücksichtigt. Dazu wurde für die Feststoffpartikel ein sog. Formfaktor eingeführt.

2.2.2 Partikelverteilung über den Rohrquerschnitt

Auch hier muß zwischen vertikalen und horizontalen Feststofftransport klar differenziert werden. Bei der Vertikalförderung ist für kreisrunde Rohrquerschnitte das Phänomen zu beobachten, daß die Feststoffpartikel vermehrt zum Rohrinne hin konzentriert sind. Dieser Umstand verdient bei der Transformation der Erkenntnisse betreffs des hydraulischen Rohrtransportes auf die spezielle Problematik des Bohrkleinaustrages bei Tiefbohrungen besondere Beachtung. Ein weiterer, wichtiger Parameter ist sicherlich die Feststoffkonzentration, die einen entscheidenden Einfluß auf die zu beobachtenden Aufstromgeschwindigkeiten hat; im Extremfall kann sogar das Strömungsprofil bzw. der Strömungszustand von zu hohen Feststoffkonzentrationen erheblich gestört werden.

In der Literatur wird an verschiedenen Stellen auf die Gefahr einer Verstopfung des Förderrohres bei zu hohen Feststoffkonzentrationen hingewiesen. Es darf jedoch nicht verschwiegen werden, daß diese Problematik bei Tiefbohrungen durch das rotierende Gestänge und die Geometrie des Ringraumes im Vergleich zum hydraulischen Feststofftransport in Rohrleitungen gänzlich verschieden ist.

Tab. 2-1

Charakteristische Größen bei der hydraulischen Förderung mineralischer Rohstoffe
(nach Wasp 1977)

Mineral	Feststoff- dichte (Kg/dm ³)	max. Korn- größe (mm)	Feststoff- konzentr. (Gew. %)	Rohrleitungs- durchmesser (mm)	Transport- geschw. (m/s)
Kohle	1,4	1,0	50	255	1,6
Kalkstein	2,7	0,295	65	273	1,15
Magnetit	4,9	0,147	60	245	2,0
Baggergut dredgings	2,65	0,470	15	324	6,0

2.3 Austragsverhalten von Bohrspülungen

Die wichtigsten Einflußgrößen beim Bohrkleinaustrag sind die Spülaufstiegs- und Spüldichten. Diese Erkenntnis zieht sich unabhängig von Cuttingdurchmesser, Dichte etc. durch die entsprechenden Veröffentlichungen seit ca. 40 Jahren. Zu empirischen Untersuchungen der verschiedenen Bohrungen kamen experimentelle Analysen, die jedoch die Problematik der Auskesselungen etc. nur ungenügend erfassen. Als "Kernliteratur" läßt sich diesbezüglich sicherlich die Arbeit von William und Bruce (1951) bezeichnen, welche das Aufstiegsverhalten von Cuttings qualitativ und quantitativ erfaßt. Ergänzend dazu kann nach Zeidler und Chien (1972) festgestellt werden, daß die Rotation des Bohrstranges sowie eine turbulente Förderung im Ringraum den Bohrkleinaustrag begünstigen. Es scheint jedoch nicht zwingend notwendig, daß zur Förderung des Bohrkleins eine hochviskose, Nicht-Newton'sche Flüssigkeit notwendig ist, bzw. den Bohrkleinaustrag verbessert. Tatsache bleibt jedoch, daß nach den o.a. Untersuchungen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Partikel-Sinkgeschwindigkeit und der Quadratwurzel der Partikel-Durchmesser nachgewiesen werden konnte. Die optimale Ringraumgeschwindigkeit, Bohrlochsohlendruck, Bohrlochneigung, Bohrstrangrotation und Bohrstrangexzentrizität sind nicht berücksichtigt. Verallgemeinerungen bzgl. Cuttinggröße, Ringraumgeschwindigkeit und Spüldichte scheinen nach der recherchierten Literatur nicht zulässig.

Interessant erscheint den Verfassern der Ansatz von Casson, der eine Weiterentwicklung des Modells nach Power-Law darstellt. Hierbei werden Grenzbereiche der Scherraten erfaßt, die im konventionellen Power-Law-Modell keine Berücksichtigung erfahren. Dieses rheologische Modell ist jedoch in seinen Berechnungsgängen ungleich komplizierter als die Vorgehensweise nach Power-Law, so daß der erhöhte Rechenaufwand durch die etwas höhere "Trennschärfe" im Grenzbereich der Scherraten nicht gerechtfertigt erscheint.

Sicherlich herausragende Bedeutung bei der Bewertung des Gesamtproblems haben experimentelle Untersuchungen zum realen Bohrkleintransport in Tiefbohrungen. Hervorzuheben sind Ergebnisse von Tomren u.a. (1983/1986), die das Sedimentationsverhalten der transportierten Feststoffe in Abhängigkeit von Bohrlochneigungen und Ringraumgeschwindigkeiten beschreiben. Festzuhalten bleibt, daß der Einfluß der Bohrstrangrotation bei turbulenter Strömung gering ist.

Vergleichend zu den Resultaten von experimentellen Untersuchungen auf dem Gebiet der hydraulischen Feststoffförderung bleibt zu konstatieren, daß gering viskose Spülungen im turbulenten Strömungsbereich ein ähnlich gutes Transportverhalten zeigen, wie hochviskose Fluide im laminaren Bereich.

2.3.1 Bohrkleingröße

Unterschiedlich sind die Aussagen in der erdöltechnischen Literatur betreffs der Partikeldurchmesser. In den einschlägigen Berechnungen wird jeweils vom größtmöglichen Durchmesser ausgegangen, der sich in der Größenordnung von 1/8" bis 5/8" bewegt, wobei der mittlere Durchmesser mit 1/4" anzusehen ist.

2.3.2 Geschwindigkeiten im Ringraum

Sofern die Strömungsgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit ist, kommt es zu einer Aufwärtsbewegung der Bohrkleinpartikel. Mathematische Ansätze gehen davon aus, daß die Teilchen sich untereinander nicht beeinflussen; die Strömungsgeschwindigkeit sei die Geschwindigkeit des Fluids in unmittelbarer Umgebung des betrachteten Teilchens. Da dies in der Realität nicht der Fall sein kann, wird in der Praxis mit Durchschnittswerten bzgl. Geschwindigkeiten, Durchmessern und Konzentrationen gerechnet.

Die Aufströmgeschwindigkeit des Bohrkleins als Differenz, der Fluid- und der Sinkgeschwindigkeit wird bestimmt vom Schlupf zwischen diesen beiden Komponenten. Der Schlupf wiederum ist eine Funktion

- der Partikelgröße
- der Kornform
- der Feststoffdichte
- der Fluidichte
- der Strömungscharakteristik
- der rheologischen Spüleigenschaften
- der Strömungsgeschwindigkeit

3 BOHRKLEINUNTERSUCHUNGEN AN LAUFENDEN BOHRUNGEN

Da ausreichendes Datenmaterial betreffs Korngröße bzw. Kornverteilung beim Cuttingaustrag nicht zur Verfügung stand, wurden an verschiedenen Tiefbohrungen Proben aus dem Bohrlochaustrag gezogen.

Bei der Konzeption dieser Untersuchung wurde davon ausgegangen, daß über die Kornverteilung von Cuttings in Abhängigkeit von den bekannten Einflußgrößen wie Formation, Meißel, Spülung, Bohrfortschritt ausreichendes Datenmaterial vorliegt, auf dem aufgebaut werden könnte, um erste Korrelationsuntersuchungen an Tiefbohrungen zu beginnen. So sollten im Rahmen dieser Untersuchung an z.T. laufenden Bohrungen aus verschiedenen Teufenbereichen, aus unterschiedlichen Formationen und bei verschiedenen Meißelsystemen Cuttingproben entnommen werden, um in erster Linie Korngrößenverteilungen zu ermitteln. Eine erste Gegenüberstellung von Kern- und Cuttingmaterial ist erfolgt und wird kommentiert.

3.1 Durchgeführte Bohrkleinbeprobung

In der 2. Jahreshälfte 1987 wurden an vier Tiefbohrungen in Teufen von 1000 m bis 5000 m in den Formationen Kreide, Buntsandstein und Rotliegendes während des Einsatzes von Kernbohrkronen, Dia-, Warzen- und Rollenmeißeln Proben aus dem Spülungsumlauf entnommen mit dem Ziel, Korngrößenverteilungen zu ermitteln (Tab. 3-1).

Die Probleme der Entnahme repräsentativer Probemengen aus einem Feststoff-Flüssigkeits-Gemischstrom sind zwar bekannt, hatten sich durch die Überlagerung anderer Schwierigkeiten bei dem Bohrspülungsumlauf jedoch noch verstärkt.

Tab. 3-1 Angaben zu Bohrungen, auf denen Bohrklein-
Korngrößenverteilungen untersucht wurden

BOHRUNG	A	B	C	D
DATEN				
Teufe (m)	5.000	3.600	1.360	2.390
Bohrloch- durchmesser	5 7/8"	12 1/4"	17 1/2"	12 1/4"
Formation	Rotliegendes	mittlerer Bunt- sandstein	Oberkreide	Oberkreide
Meißelart	Dia-Kernbohrkrone Warzenmeißel	Warzenmeißel	Rollenmeißel	Rollenmeißel
Spülungsart	Ton-Salzwasser	Ton-Salzwasser	Ton-Süßwasser	Ton-Süßwasser
Spülungs- dichte (g/cm ³)	1,35	1,70	1,16	?
Spülrate (l/min)	620	2.200	3.640	?
Bohrfort- schritt (m/h)	0,75 / 0,5	1	12	3
Spülungs- temperatur (° C)	34	74	72	83
Verrohrungs- teufe (m)	4.674	2.760	?	?
Spülauf- stiegszeit (min)	?	110	50	75

Während die Probenahme und die Probenvorbereitung für Feststoffe genormt ist, wird in DIN 51 701 zur Probenahme von Feststoff-Flüssigkeits-Gemischen lediglich gesagt, daß die Probe entweder mit einem Schlitzgefäß am Auslauf des Gemischstromes zu entnehmen ist oder der gesamte Förderstrom kurzzeitig abzuleiten und zu proben ist. Letzteres entspricht den üblichen Auslaufmessungen beispielsweise zur Kalibrierung von Durchflußmeßgeräten. Die Umleitung des gesamten Spülstromes hätte Umbaumaßnahmen zur Folge gehabt, die aus unterschiedlichen Gründen in den vorliegenden Fällen nicht vorgesehen waren. Es verblieb somit die Entnahme von Teilmengen aus der gesamt umlaufenden Spülung. Hierzu wurde ein Schlitzprobenehmer entwickelt, der durch den Gutstrom hindurchgeführt wurde, um repräsentativ Proben zu nehmen.

Nach der Vorgabe

$G = 0,06 \cdot d$ $G =$ Gewicht der Einzelprobe in kg
 $d =$ max. Korngröße in mm
 0,06 = Faktor mit Einheit (kg/mm)

für das Mindestgewicht einer Einzelprobe bei Korngrößen < 120 mm wurde ein Schlitzprobenehmer entwickelt, bei dem sichergestellt war, daß kein Probenmaterial durch den starken Spülstrom wieder ausgespült wurde.

Ursprünglich war geplant, ausschließlich den Hauptförderstrom zu beproben. Wegen der auftretenden Schwierigkeiten bei der Probenahme, aber auch wegen der geringen erbohrten Feststoffmengen insbesondere beim Kernen und beim Diameißeleinsatz wurden zusätzlich Proben aus dem Überlauf und dem Durchgang der ersten Trennstufe, dem Schüttelsieb, entnommen.

3.2 Laborauswertung

3.2.1 Quantitative Analyse

Die Aufbereitung und Auswertung des Probenmaterials erwies sich wegen der großen Feinkörnigkeit als besonders schwierig. Die gezogenen Suspensionsproben wurden eingedampft, die Rückstandsmengen gewogen und anschließend naß gesiebt. Besondere Aufmerksamkeit galt der Agglomeration des Cuttingsmaterials, die die Siebkennlinien erheblich verfälschen. Desgleichen mußte beim Eindampfen der Suspensionen und dem Wieder-Anmischen mit Wasser eine nachträgliche Zerkleinerung vermieden werden. Das Problem der Agglomeration zeigte sich besonders deutlich im Ultraschallbad. Kurz nach Abschalten des Ultraschallbades setzte die Agglomeration wieder ein.

Die nach der Normenreihe 1 mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m, 63 μ m naßgesiebten Fraktionen wurden wiederum getrocknet und gewogen, um die Körnungskennlinien zu erstellen. Zur Beschleunigung des Eindampfens wurde ein Teil des Probenmaterials vorher zentrifugiert.

Für eine Bohrung ist in den Abb. 3-1 bis 3-3 das Ergebnis der Korngrößenverteilung einer Probe aus dem Gesamtrücklauf, dem Siebüberlauf und Siebunterlauf dargestellt. Siebüberlauf und Siebdurchgang wurden alle halbe Stunde geprobt. Insbesondere aus der Korngrößenverteilung des Siebüberlaufes wird das Problem der Agglomeration deutlich. Die dargestellten Korngrößenverteilungen sind beispielhaft ausgewählt, statistisch aber nicht gesichert.

Die Fraktion < 250 μ m wurde teilweise zusätzlich im Granulometer untersucht.

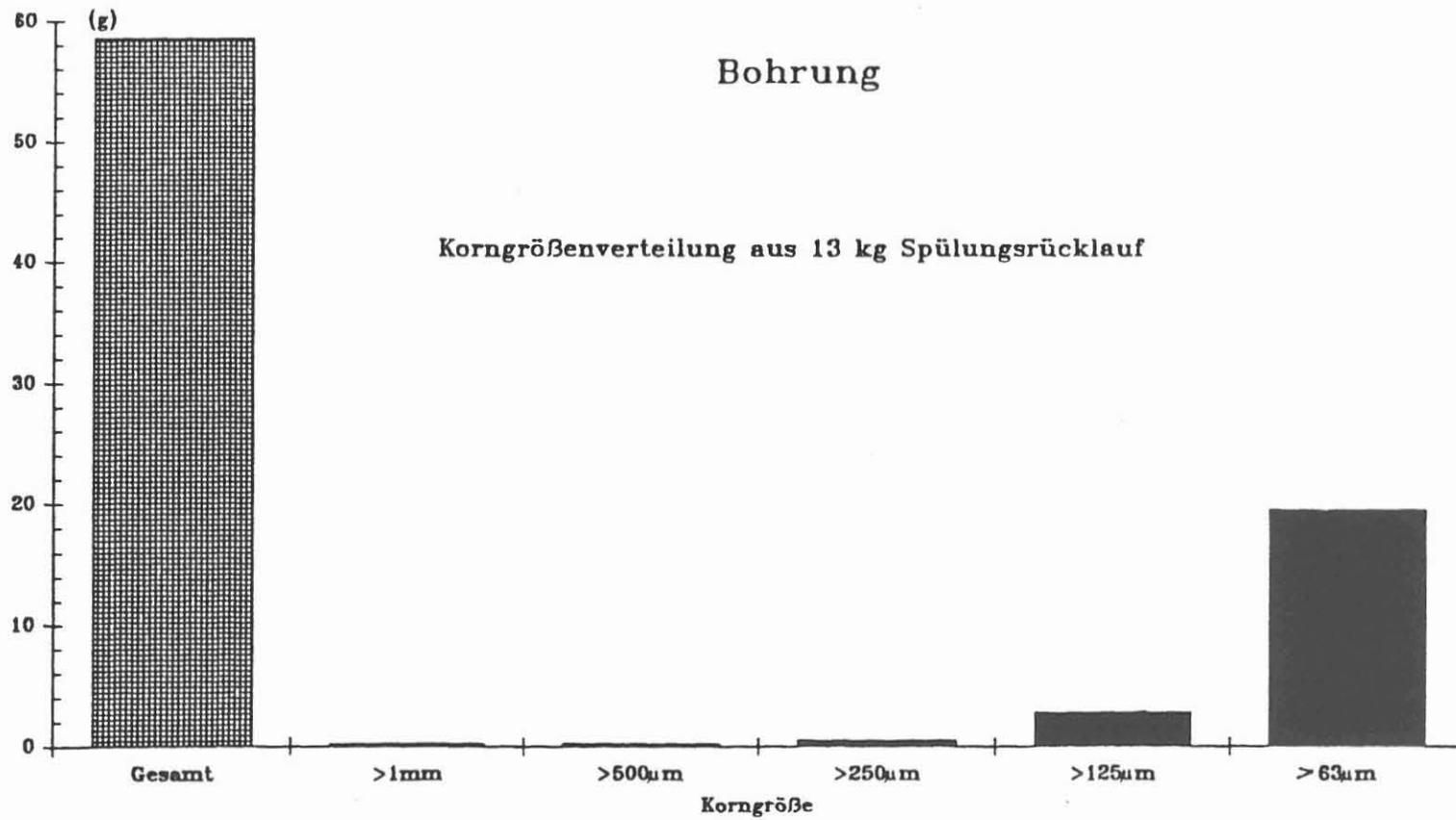


Abb. 3 - 1 Korngrößenverteilung im Gesamtrücklauf

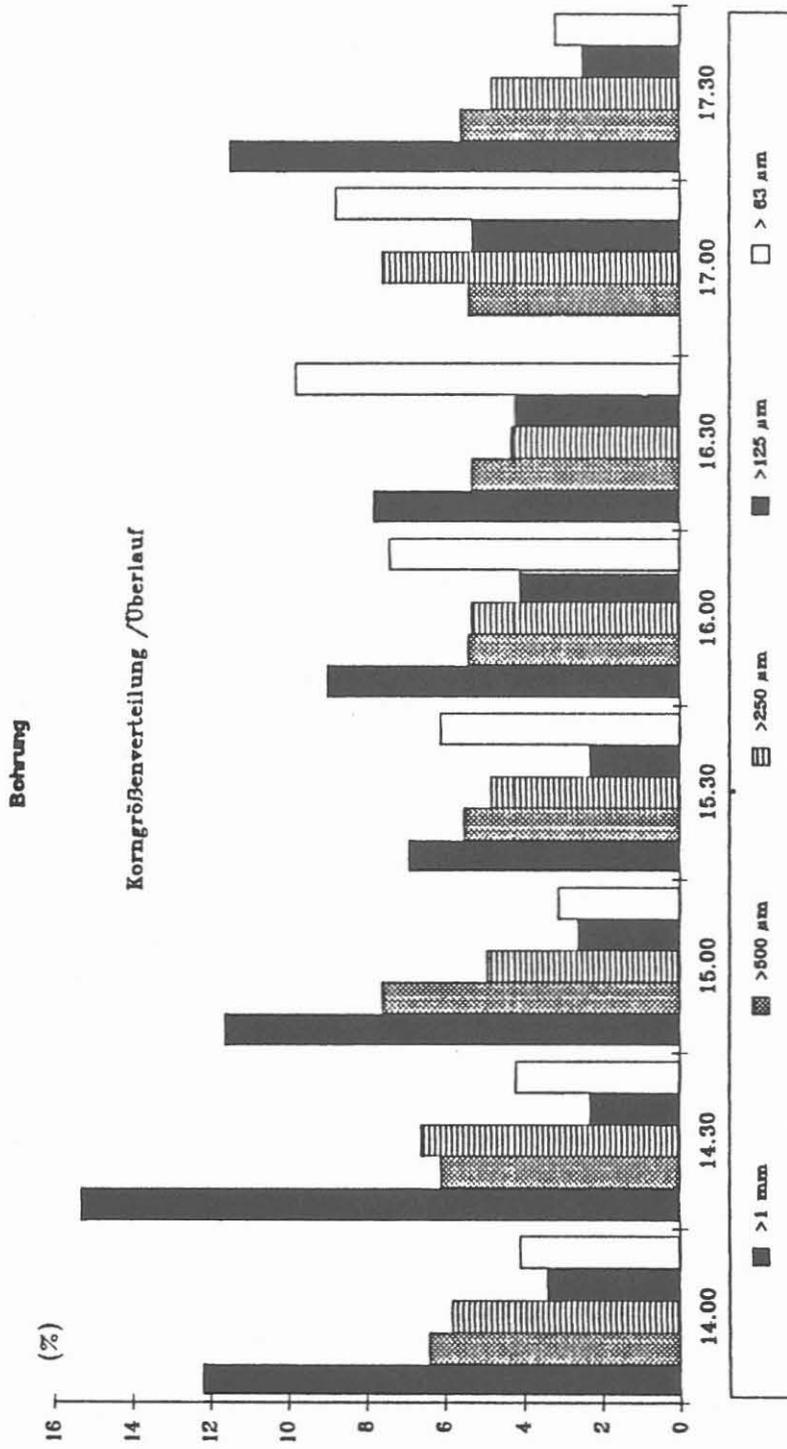


Abb. 3 - 2 Korngrößenverteilung im Überlauf

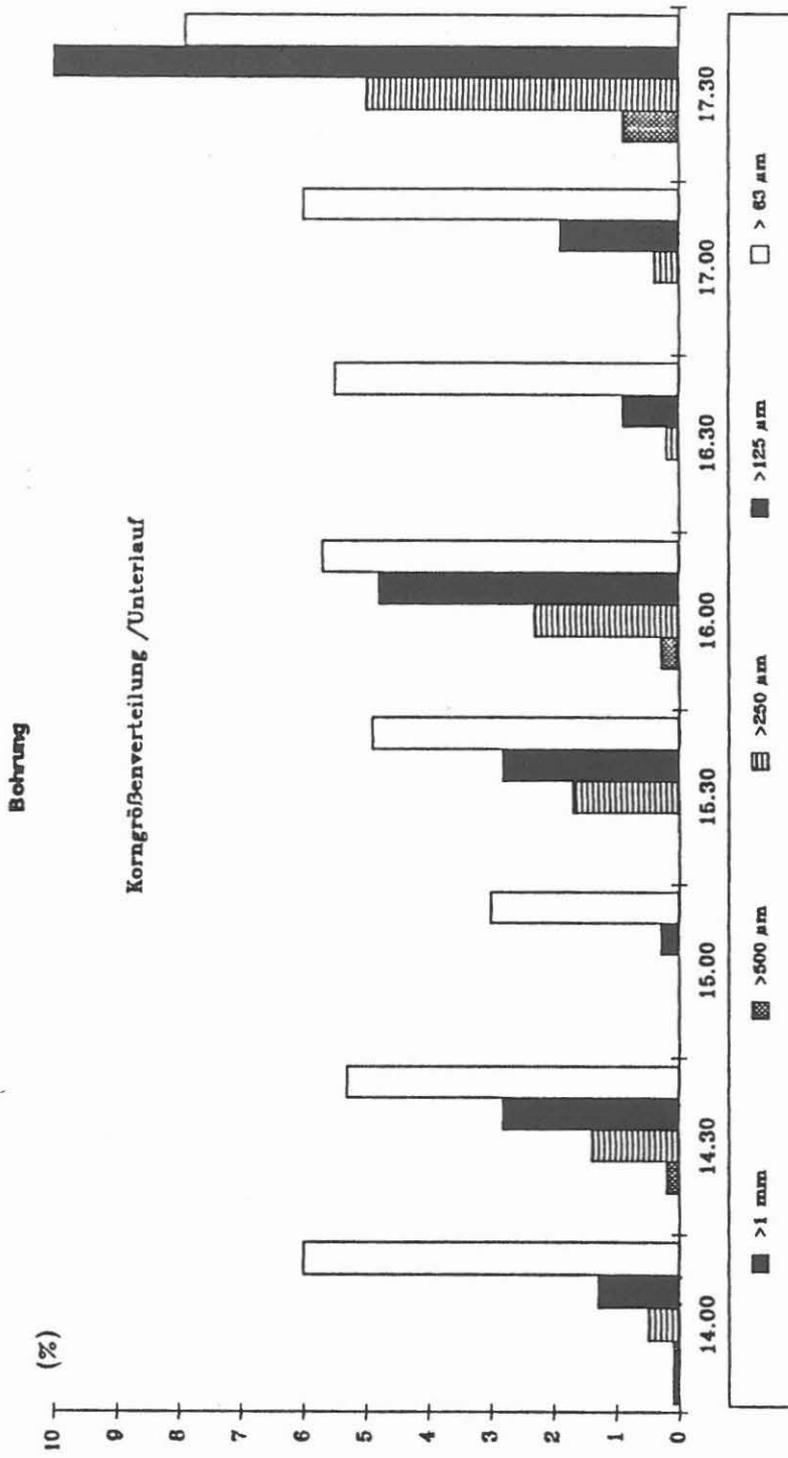


Abb. 3 - 3 Korngrößenverteilung im Unterlauf

3.2.2 Qualitative Analyse

Da aus betrieblichen Gründen keine exakten Angaben über Spülmittelzusätze zu erhalten waren, wurde ein Teil der Proben sowie reine Bohrspülung - soweit vorhanden - granulometrisch bzw. röntgenographisch analysiert, um durch Subtraktion der Spülungskomponenten Aussagen über das eigentliche Bohrklein zu erhalten.

Die Beurteilung des Cuttingmaterials war insofern besonders erschwert, als ein Teil des Formationsmaterials den Spülmittelzusätzen glich und daß sich ein anderer Bohrkleinanteil während der Probenaufbereitung auflöste bzw. in Suspension ging, so daß diese Anteile zur Auswertung nicht mehr zur Verfügung standen.

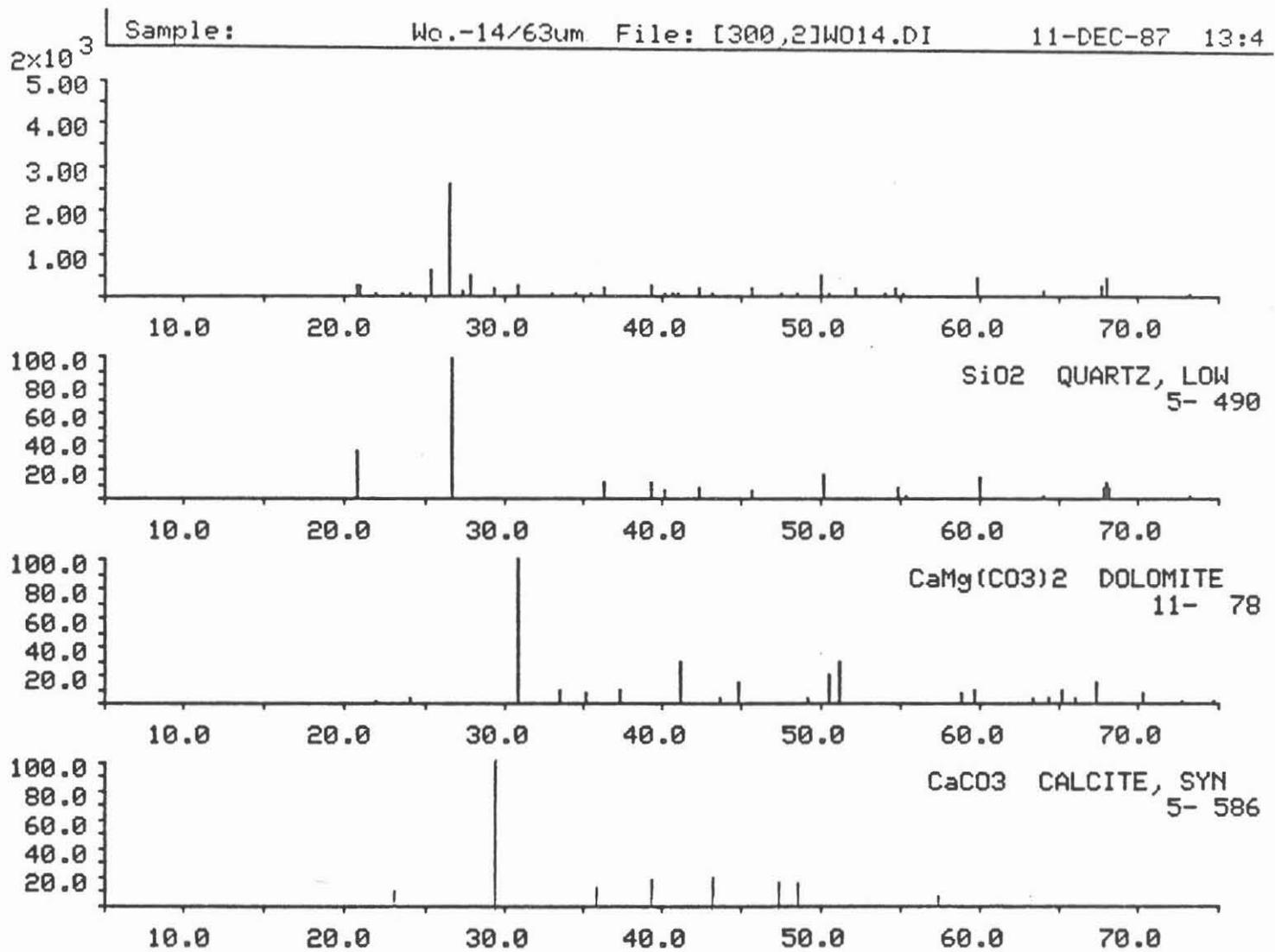
Ein weiterer Grund für die Röntgenuntersuchungen lag in dem Versuch, Cuttingmaterial mit Kernmaterial zu vergleichen. Abb. 3-4 bis 3-6 enthält beispielhaft einen computergestützten Ergebnisausdruck der Gegenüberstellung der röntgenographischen Untersuchungen von Cuttings- und Kernmaterial.

Die Ergebnisse der Röntgenanalyse von einer Siebfraktion $< 63 \mu\text{m}$ und von Kernmaterial wird in einen Rechner eingegeben und entsprechend den Intensitäten auf mögliche Substanzen hin untersucht. Dies Beispiel der qualitativen Analyse zeigt überwiegende Anteile von Quarz, kleinere Anteile Dolomit und Calcit.

3.3 Schlußfolgerungen

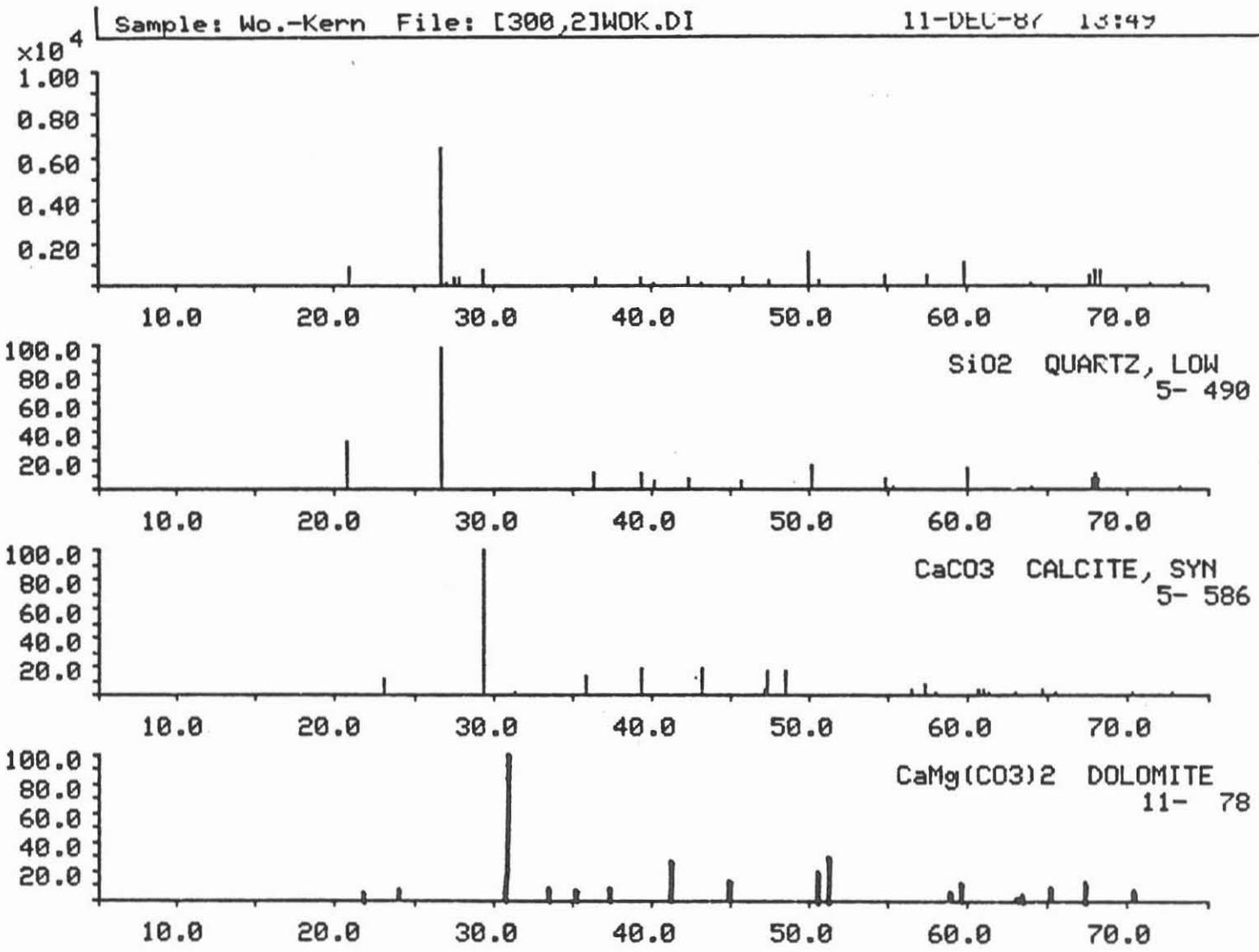
Erste Untersuchungen der Korngrößenverteilung von Cuttings beim Tiefbohren sind in Formationsbereichen durchgeführt worden, die bei der KTB-Bohrung nicht durchteuft werden. Bei der KTB-Bohrung werden sich auch geringere oder gar keine Schwierigkeiten bei der Differenzierung von Spülmittel- und Bohrkleinmaterial ergeben. Im übrigen sind die geschilderten Cuttinguntersuchungen als Voruntersuchungen anzusehen. Die geringe Zahl der Versuche läßt keine statistische Auswertung zu.

Grundsätzlich sollte es aber möglich sein, eine "onstream" Probenahme für Korngrößenverteilungen zu entwickeln, um kontinuierlich aktuelle Daten in das zu entwickelnde Cutting-Teufen-Korrelationsmodell eingeben zu können. Die Vorversuche und ihre analytische Bearbeitung zeigen Wege hierzu auf.



- 525 -

Abb. 3 - 4 Röntgenanalyse der Cuttings



- 526 -

Abb. 3 - 5 Röntgenanalyse des Bohrkerns

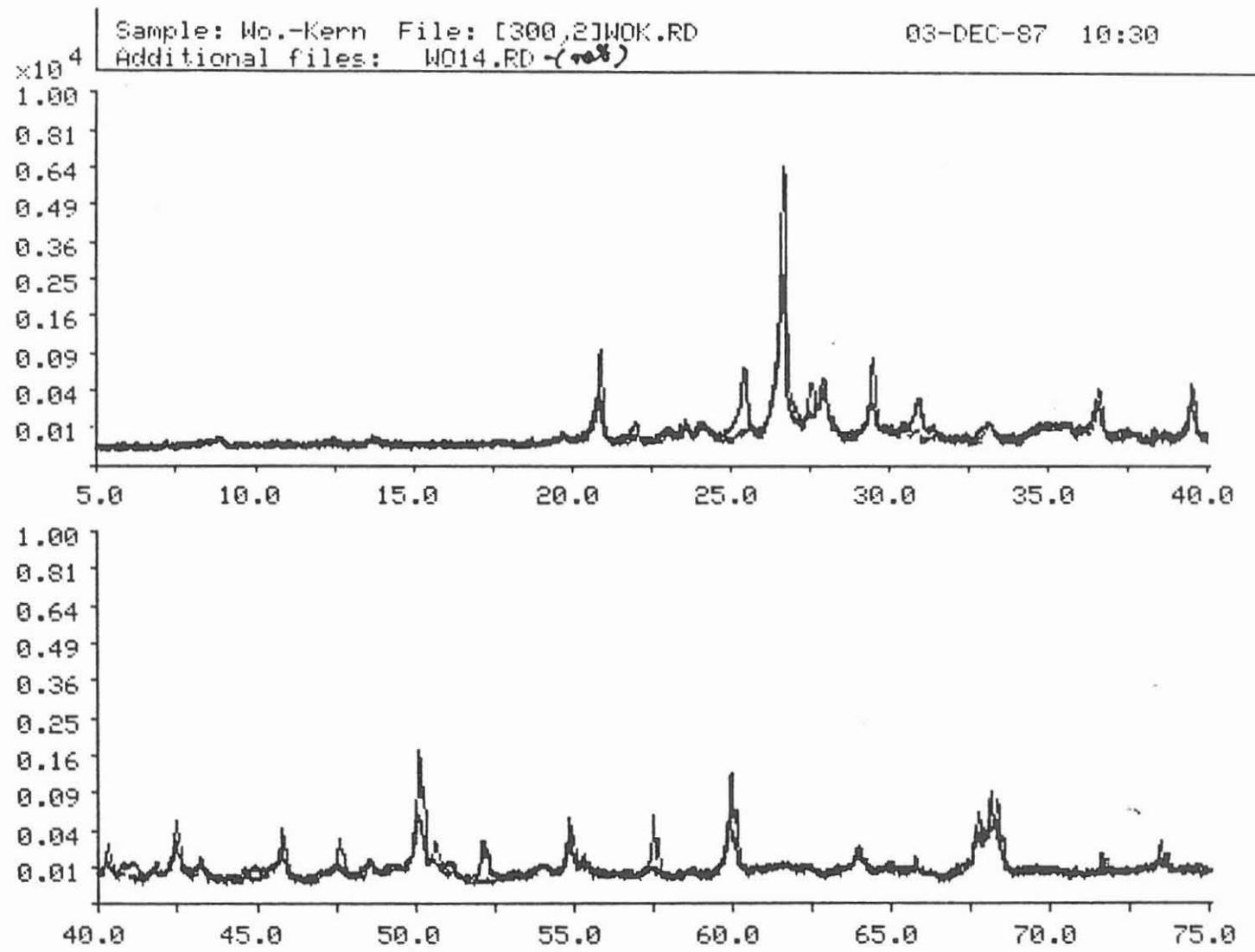


Abb. 3 - 6 Gegenüberstellung des Bohrklein- und Bohrkernmaterials

4 ANSÄTZE FÜR EIN VERBESSERTES RECHENMODELL

Auf der Basis des Power-Law-Modells zur Berechnung der Bohrlochhydraulik bei Tiefbohrungen wurde ein Rechenprogramm für IBM-kompatible PC's geschrieben. Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sind in ersten Ansätzen bereits in dieses Programm eingearbeitet; die experimentellen Untersuchungen bedürfen einer weiterführenden Interpretation, um Modifikationen am Berechnungsmodell vorzunehmen.

Die Benutzung von kommerzieller Software zur Bohrlochhydraulik wurde aus verschiedenen Gründen verworfen. In der vorliegenden Arbeitsversion ist das Rechenprogramm auf folgende Ansprüche zugeschnitten:

1. ausschließliche Berechnung von Kenngrößen zur Cuttingbewegung in Ringräumen
2. absolute freie Wählbarkeit der Parameter des Bohrloches und bei der Zusammenstellung der Gestängegarnitur
3. Möglichkeit zur Änderung von einzelnen Berechnungsschritten durch Eingriff in das Rechenprogramm
4. Druckerausgabe der relevanten Resultate, um diese in Bezug auf die o.a. Parameter exakt miteinander vergleichen zu können
5. (Optional) Graphische Darstellung einzelner Ergebnisse auf Plotter.

Es handelt sich im wesentlichen um ein Hilfsmittel, um die verschiedenen Grenzen des gewählten Rechenmodells einfach abfahren zu können wie z.B.

1. Berechnung von Strömungsverhalten der Cuttings im μm -Bereich sowie im cm -Bereich
2. Berechnungen in extrem schmalen Ringräumen
3. Berechnungen im Bereich extrem hoher/niedriger Strömungsgeschwindigkeiten der Bohrspülung.

Diese Berechnungen sind durchzuführen für

1. Cuttings verschiedener Dichte
2. Spülungen niedriger Dichte und Viskosität (Wasser)
3. hohe Cuttingkonzentrationen in verschiedenen Körnungsbereichen und
4. Cuttings unterschiedlicher Kornform.

Das Rechenprogramm TUB-CUT ist in GW-Basic als einfaches "RUN + CALCULATE"-Programm geschrieben, was sich für die gestellte Aufgabe als ausreichend erwiesen hat. Abb. 4-1 zeigt das Struktogramm von TUB-CUT.

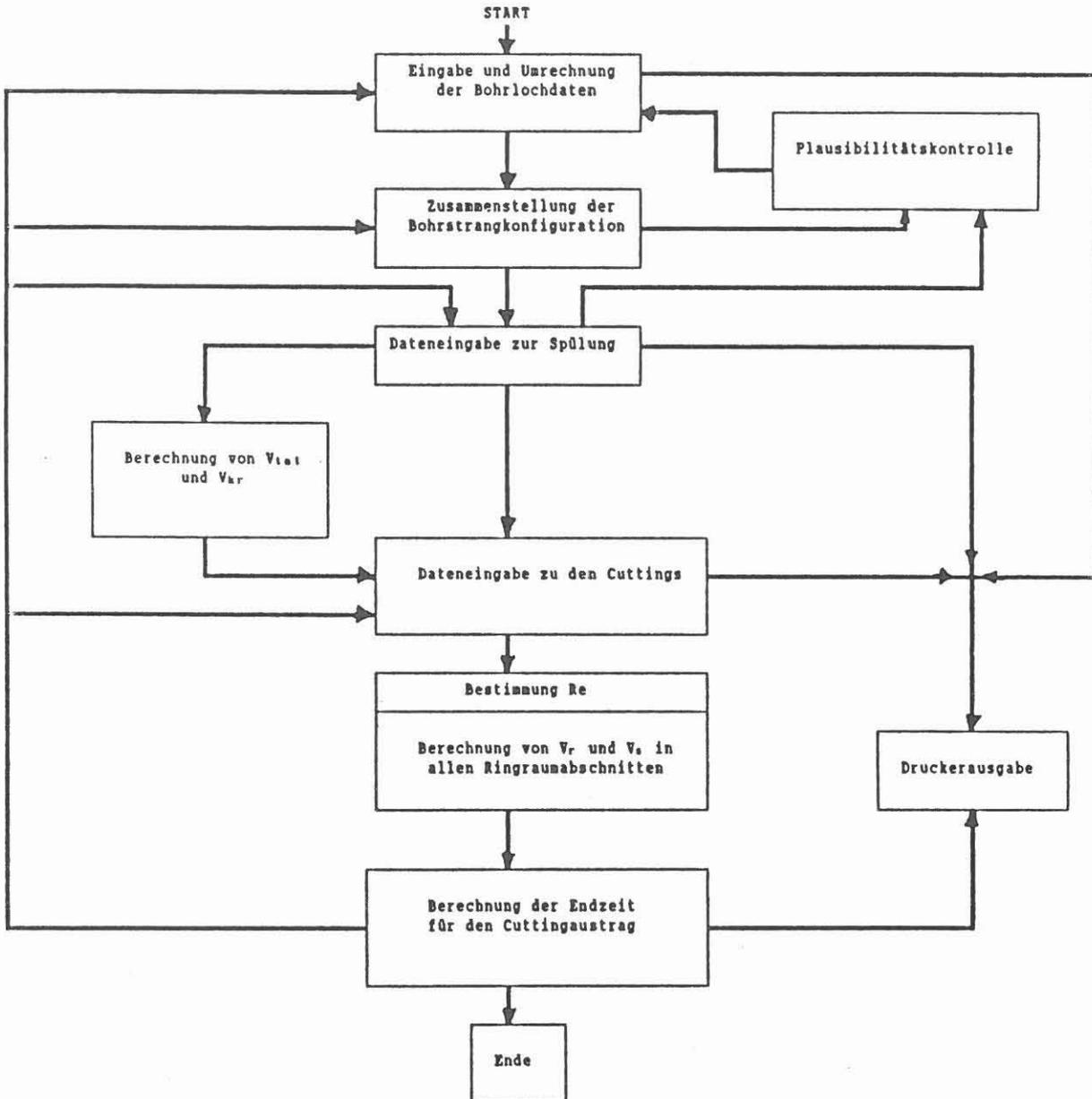


Abb. 4 - 1 Struktogramm des Rechenprogramms TUB-CUT

TUB-CUT ERGEBNISBLATT

Datum 12-22-1987

Bohrlochteufe (in m) 3000
Verrohrungsteufe (in m) 2400
Durchmesser 'Open Hole' (in Zoll) 8
Casingdurchmesser (in Zoll) 7 1/2

DRILLPIPES	6 7/8 Zoll	1000 m Länge
DRILLPIPES	6 Zoll	1834 m Länge
SCHWERSTANGEN	6 1/2 Zoll	54 m Länge
STABILIZER	6 5/8 Zoll	81 m Länge
SCHWERSTANGEN	7 Zoll	27 m Länge
TOOLJOINTS	7 Zoll	3 m Länge
DRILLBIT	7 Zoll	1 m Länge

Bohrlochteufe (in m) 3000
Verrohrungsteufe (in m) 2400
Durchmesser 'Open Hole' (in Zoll) 8
Durchmesser Casing (in Zoll) 7 1/2

Höhe der Cuttings (mm) 2
Länge der Cuttings (mm) 6
Dichte der Cuttings (kg/m³) 2.62
Spülrate (l/min.) 610
Spüldichte (Kg/m³) 1.12
K (Power-Law) .299
n (Power-Law) .659
Scheibe oder Kugel S

CASING / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	8.46
CASING / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	51.85
OPEN HOLE / DRILLPIPES	Aufstiegszeit (min.)	16.07
OPEN HOLE / SCHWERSTANGEN	Aufstiegszeit (min.)	1.36
OPEN HOLE / STABILIZER	Aufstiegszeit (min.)	1.85
OPEN HOLE / SCHWERSTANGEN	Aufstiegszeit (min.)	.42
OPEN HOLE / TOOLJOINTS	Aufstiegszeit (min.)	.05
OPEN HOLE / DRILLBIT	Aufstiegszeit (min.)	.02
OPEN HOLE / BOHRLOCHSOHLE	Aufstiegszeit (min.)	0

Die Gesamtaufstiegszeit beträgt 80.08 Minuten

Abb. 4 - 2 Beispielhafter Ergebnisausdruck für
die Cuttings - Aufstiegszeit

Die Eingabeparameter sind getrennt nach: Bohrlochparameter (Teufe, ID, Casing, ID-Casing), Bohrstranggarnitur (Drill-Bit, Kernrohr, DH-Motor, Schwerstangen, Stabilizer, Drillpipe, Tooljoint), Bohrlochhydraulik (Pumprate, Dichte des Fluids, Viskosimeterablesungen) und spezifischen Kennwerten der Cuttings (Dichte, Durchmesser, Form). Das Endresultat ist die Aufstiegszeit eines Bohrklein-Partikels im Ringraum vom Bohrloch-tiefsten bis zur Tagesoberfläche. Abb. 4-2 zeigt einen Beispielausdruck des Programmes TUB-CUT.

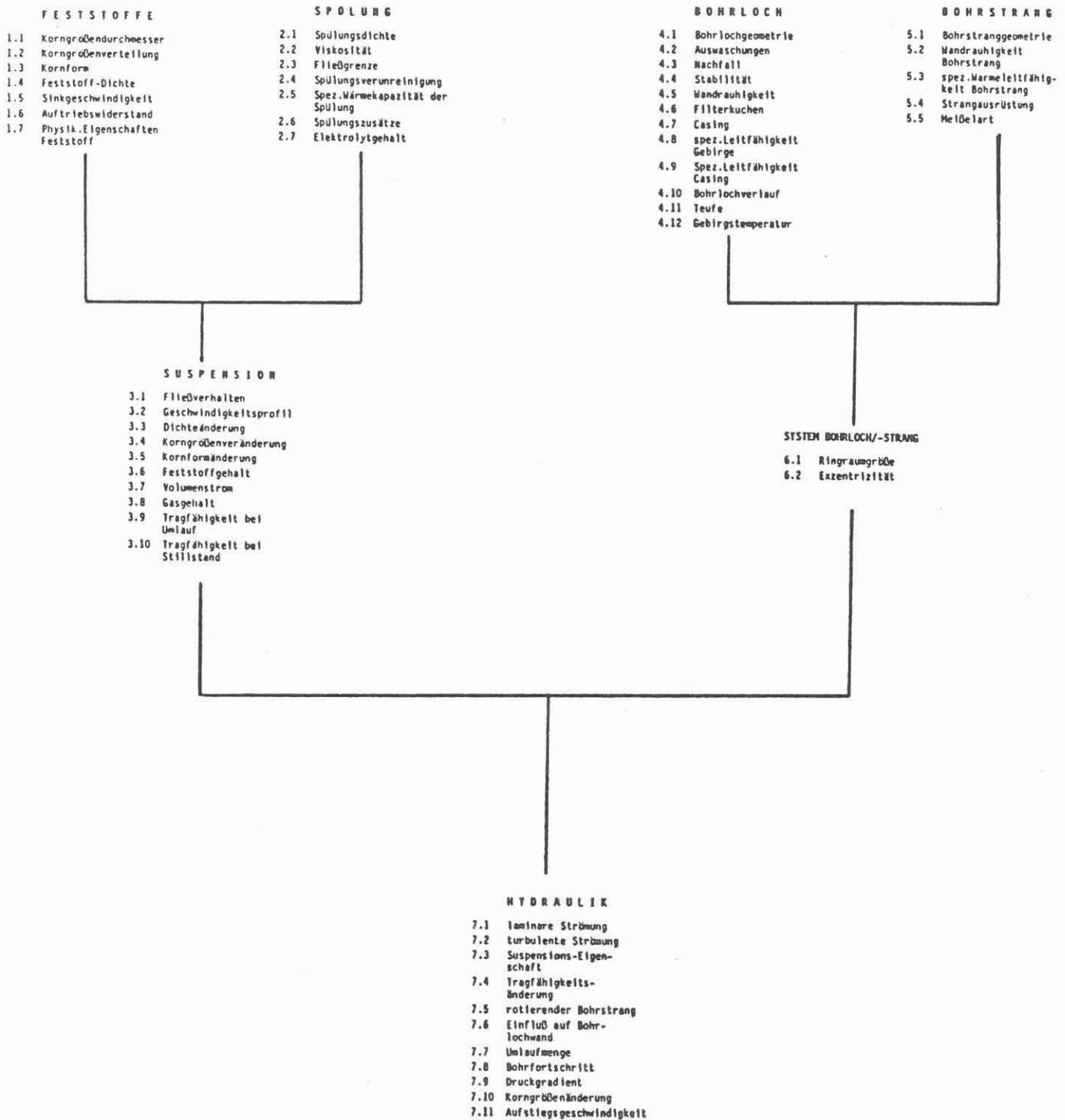
5 EINFLUSSGRÖSSENUNTERSUCHUNG

Aus den Quellen ist deutlich geworden, daß für näherungsweise Berechnungen der Austragszeit von Cuttings ausreichende Kenntnisse vorliegen, die aber für eine rückgerechnete Teufenzuordnung zu ungenau sind. Die Einflußgrößen sollen deshalb in einer Matrix zusammengestellt und eine Wichtung versucht werden, um in Kombination mit dem Erkenntnisstand über die Einflußgrößen Auskunft darüber geben zu können, welche Bereiche bzw. Parameter vordringlich intensiv zu untersuchen sind, bei welchen Parametern evtl. Nachbesserungen erfolgen müssen und welche Größen für den Bohrkleinaustrag von untergeordneter Bedeutung sind.

Für eine derartige Bewertung werden Kriterien der Nutzwertanalyse herangezogen (Zangemeister 1973). Hierzu wird eine Hierarchie der Bewertungs- und Anforderungskriterien erstellt. Die zur Bewertung notwendigen Kriterien werden in einem Systemwert zusammengefaßt, wobei Einflußgrößen und Anforderungen bewertet werden, deren Auswirkungen bisher rechnerisch nicht oder nur unzulänglich erfaßt sind. Hierzu wird zunächst das Gewicht der einzelnen Parameter in der Gewichtungsmatrix festgelegt und die Erkenntnisfaktoren der einzelnen Parameter bestimmt. Die Multiplikation beider Faktoren ergibt den Teilwert und deren Summe den Systemwert. Die für den Bohrkleinaustrag wichtigen Parameter sind in sieben Systemgruppen zusammengestellt. Die Grundgrößen wurden in die Systeme "Feststoff", "Spülung", "Bohrloch" und "Bohrstrang" unterteilt, aus denen sich dann die beiden Systeme "Suspension" und "Bohrloch/Bohrstrang-Konfiguration" ergeben. Das letzte System "Hydraulik" erfaßt sodann den Gesamtzusammenhang des Bohrkleinaustrages (Tab. 5-1).

Aus den einzelnen Parametern der Systeme 1-7 aus Tab. 5-1 wurde eine Matrix ihrer Gewichtungsfaktoren erstellt. Desweiteren wurden für alle diese Parameter sogenannte Erkenntnisfaktoren mit der Bewertung 1-3 eingeführt, wobei z.B. für Parameter, über die keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, bzw. deren Verhalten bezüglich des Bohrkleinaustrages in der Literatur als teilweise widersprüchlich charakterisiert wird, der Erkenntnisfaktor 3 einzusetzen ist.

Die Multiplikation von Gewichtungsfaktor und Erkenntnisfaktor ergibt den sogenannten Teilwert des zu betrachtenden Parameters. Alle Parameter werden schließlich nach ihren Teilwerten geordnet, wobei die rangersten Parameter den größten Erkenntnisbedarf hinsichtlich ihres starken Einflusses auf den Bohrkleinaustrag haben. Die letzten Rangplätze nehmen diejenigen Parameter ein, deren Einfluß auf den Bohrkleinaustrag unbedeutend oder deren Erkenntnisse hinreichend gesichert sind.



Tab. 5 - 1 Den Bohrkleinaustrag beeinflussende Parameter

Nach diesem ersten Versuch einer Parameterwichtung haben all diejenigen Größen einen besonderen Nachholbedarf an Erkenntnissen bzw. bedürfen noch besonderer Klärung, die unerwartete, unregelmäßige Bedingungen im unverrohrten Ringraum provozieren. Durch den an erster Stelle stehenden Nachfall beispielsweise wird Feststoffmaterial aus beliebiger Teufe der Spülung zugeführt, verändert unkontrolliert das aufsteigende Feststoff-Flüssigkeits-System mit all seinen Parametern und hinterläßt in der Bohrlochwandung für die nachfolgende Zeit des Bohrens bis zum Verrohren eine Unregelmäßigkeit in der Bohrlochwandung. Letztere können ähnlich wie bei Auswaschungen zur vorübergehenden Ansammlung von Bohrklein bestimmter Gleichfälligkeitsklassen führen, was bei Austragsbeurteilung zur Fehlinterpretation führen muß.

Tab. 5-2 zeigt die Rangordnung der Parameter nach ihren Teilwerten.

Tab. 5-2: Rangordnung der Parameter nach Teilwerten

Rangfolge	System-Nr.	Parameter	Teilwert
1	4.3	Nachfall	210
2	3.9	Tragfähigkeit Suspension bei Strömung	204
3	4.2	Auswaschungen Bohrloch	204
4	7.10	Korngrößenveränderung	192
5	7.5	Rotierender Bohrstrang	177
6	6.2	Exzentrizität Bohrstrang	171
7	4.6	Wandrauhigkeit Bohrloch	171
8	4.11	Teufe	166
9	7.11	Aufstiegsgeschwindigkeit	165
10	4.12	Gebirgstemperatur/Gradient	156
11	1.5	Sinkgeschwindigkeit	156
12	1.2	Korngrößenverteilung	144
13	3.6	Feststoffgehalt Suspension	136
14	1.6	Auftriebswiderstand	126
15	3.1	Fließverhalten Suspension	126
16	4.9	Spez. Wärmeleitfähigkeit Gestein	116
17	4.7	Filterkuchen	116
18	2.2	Viskosität Spülung	114
19	3.3	Dichteänderung Suspension	114
20	3.4	Korngrößenänderung	112
21	7.6	Bohrlochwandeinfluß	112
22	3.5	Kornformänderung Suspension	108
23	7.2	turbulente Strömung	102
24	7.4	Tragfähigkeitsänderung	102
25	7.1	laminare Strömung	98
26	7.3	Suspensionseigenschaften	98
27	2.4	Spülungsverunreinigungen	96
28	3.2	Geschwindigkeitsprofil Suspension	96
29	1.1	Korngrößendurchmesser	80
30	4.10	Bohrlochverlauf	75
31	4.1	Bohrlochgeometrie	72
32	3.8	Gasgehalt Suspension	70
33	4.7	Casing	69
34	3.10	Tragfähigkeit Suspension bei Stillstand	67
35	1.3	Kornform	62
36	2.3	Fließgrenze Spülung	60
37	6.1	Ringraumgröße	59

Rangfolge	System-Nr.	Parameter	Teilwert
38	7.8	Bohrfortschritt	58
39	5.1	Bohrstranggeometrie	58
40	2.1	Spüldichte	58
41	1.4	Feststoffdichte	55
42	5.4	Bohrstrangausrüstung	55
43	7.9	Druckgradient	54
44	7.7	Umlaufmenge	51
45	2.6	Spülnzusätze	51
46	5.5	Meißelart	38
47	2.7	Elektrolytgehalt Spülung	36
48	1.7	Physikal.Eigenschaften Feststoff	33
49	5.3	spez.Wärmeleitfähigkeit Strang	22
50	5.2	Wandrauhigkeit Bohrstrang	19
51	2.5	Spez.Wärmekapazität Spülung	19

6 UNTERSUCHUNGSERGEBNIS UND SCHLUSSFOLGERUNG

Aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche, der gewichteten Einflußgrößenmatrix und des Rechenmodellansatzes wird deutlich, daß für eine gesicherte Bohrklein-Teufen-Korrelation Nachbesserungen in verschiedenen Bereichen notwendig werden.

6.1 Bisher nicht oder nur unvollständig erfaßte Einflußbereiche

Nachfolgende Bereiche wurden bei den bisherigen erdöltechnischen Untersuchungen nur unvollständig oder gar nicht berücksichtigt bzw. vereinfachend angenommen:

1. Echte Messung der Schlupfgeschwindigkeit sowohl vom Einzelkorn als auch von Kornkollektiven
2. Einsatz/Verwendung von Cuttings aus Bohrungen, d.h. Feststoffen mit realistischen Körnungskennlinien
3. Verwendung von dichteunterschiedlichen Cuttings
4. Phänomen der Bohrlochwand-Auswaschungen, insbesondere die Tatsache, daß sich Bohrklein in derartigen Hohlräumen ansammelt und bei Geschwindigkeitsrückgang als Gutwolke in den Ringraum hineinrutscht und zu Verstopfungen führen könnte
5. Der Komplex zur Bohrkleincharakterisierung, d.h.
mittlere Korngröße
Körnungskennlinie
Kornform
Sinkgeschwindigkeit
Dichteunterschied
Strömungsprofil
Konzentration

bisher nur unbefriedigend bzw. nicht vollständig erfaßt
6. Korngrößenänderung über den Transportweg/-zeit
7. Kornformänderung über den Transportweg/-zeit
8. Zerkleinerungsgrad von Cuttings durch Bohrstrang-Bohrlochwand/Casing - Kontakt
9. Durch Cuttingabrieb sich verändernde rheologische Eigenschaften der Bohrspülung
10. Exzentrizität des Bohrstranges.

Aus dem Betrieb anderer hydraulischer Feststoffsysteme außerhalb der Erdöltechnik sind die Erfahrungen nicht unmittelbar übertragbar, weil die Betriebsbedingungen und Zielsetzungen erhebliche Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede liegen in erster Linie an dem größeren Korndurchmesser,

der höheren Fluidgeschwindigkeit, der höheren Transportkonzentration, den geänderten geometrischen Abmessungen der Förderleitungen und der andersartigen Rheologie der Träger-Flüssigkeit. Ein Teil der experimentellen und betrieblichen Ergebnisse über Schwarmverhalten, Kornbandbreiten und Veränderungen von Korngrößenverteilungen über die Förderweglänge kann dennoch zur Interpretation des Aufstiegsverhaltens von Cuttings in Ringräumen herangezogen werden.

Darüberhinaus werden für eine exakte Bohrklein-Teufen-Korrelation systematische, theoretische, experimentelle und betriebliche Untersuchungen notwendig werden. Während der Übergangszeit und für eine unmittelbare Cuttings-Teufen-Korrelation für die KTB-Vorbohrung wäre eine Näherungslösung vertretbar, die beispielsweise den zu beprobenden Feststoff im Korngrößenbereich eingrenzt und bestimmte Strömungscharakteristiken voraussetzt. Unter diesen einschränkenden Bedingungen kann eine mittlere Suspensionsgeschwindigkeit mit Hilfe von Tracern experimentell ermittelt werden, so daß unter der Annahme eines schlupffreien Transportes eine Bohrkleinzuordnung zur Teufe erfolgen kann.

Die Unsicherheiten einer derartigen Vorgehensweise liegen in den Einschränkungen des ausgewählten Korngrößenbereiches, der Vernachlässigung der Sedimentation infolge Korngröße und Dichte sowie der Korngrößen- und Kornformveränderung über die Transportweglänge. Zudem gilt die getracerte Geschwindigkeit nur für die aktuelle Situation. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß in dieser Arbeitsweise sofort begonnen werden kann und keine intensiven Vorstudien in Form experimenteller und theoretischer Untersuchungen erforderlich sind.

6.2 Nachbesserungsvorschläge

Im Rahmen des Erwerbs ergänzender Daten und der Durchführung vollständiger systematischer Untersuchungen wären nachfolgende betriebliche, experimentelle und theoretische Arbeiten durchzuführen.

6.2.1 Betriebliche Untersuchungen

Das Literaturstudium und die ersten betrieblichen Cuttings-Untersuchungen haben gezeigt, daß eine systematische Fortführung der Vorversuche an laufenden Tiefbohrungen erfolgversprechend ist. Das Untersuchungsziel wäre hierbei nicht der optimale Bohrkleinaustrag, sondern das Verhalten der Cuttings auf dem Weg zur Tagesoberfläche. Es wären in erster Linie die Korngrößenverteilungen, die Kornform sowie die Änderungen über die Aufstiegszeit zu klären. Das Probenmaterial ist in Beziehung zu setzen zur Teufe, der Formation, der Bohrstrangausrüstung, des Bohrwerkzeuges und der Spülung. Die Möglichkeit des Erwerbs umfangreichen Datenmaterials ließe eine statistisch gesicherte Aussage zu, die auch zu einer Verbesserung des Rechenansatzes führen würde. Zudem wären anhand zusätzlicher betrieblicher Untersuchungen ein On-Stream Probenahmesystem zu entwickeln, in dem Beprobung, Auswertung und Ergebniseinspeisung in das Rechenmodell integriert sind. Hierzu wären die einzelnen Möglichkeiten der kontinuierlichen Entnahme repräsentativer Proben aus dem laufenden Spülstrom abzuwägen und Vorschläge für die laufende Analyse von Kornform und Korngrößenverteilung sowie für Meß-Komponenten zu unterbreiten. Die Ergebnisse würden in das Simulationsmodell eingegeben und als interaktiver Programmteil zu einer ständigen Verbesserung der Eingabeparameter führen. Dies setzt naturgemäß korrekte theoretische Ansätze in den Einzelblöcken

des Struktogrammes voraus. Es obliegt den theoretischen Untersuchungen, inwieweit es gelingt, ein derartiges interaktives Modell zu entwerfen, in das die Ergebnisse aus den Online-Spülungsuntersuchungen für Programmverbesserung kontinuierlich eingegeben werden können.

In den Bereich der betrieblichen Untersuchungen fällt auch die direkte meßtechnische Überprüfung der Auftriebsgeschwindigkeit von Cuttings durch ein verbessertes Tracerverfahren auf der Basis radioaktiver Feststoffpartikel und -Strahlen-Detektoren, die den im Ringraum aufsteigenden Feststoff im Bohrstranginneren begleiten. Dies wäre an normalen Tiefbohrungen und/oder der KTB-Vorbohrung zu praktizieren.

6.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Parallel zu den betrieblichen Untersuchungen sind experimentelle Arbeiten durchzuführen, um eine Reihe von Parametern, die sich aufgrund der Einflußgrößen-Untersuchung als besonders wichtig herausgestellt haben, zu erforschen. An erster Stelle stehen auch hier die Korngrößenverteilung, die Kornform und die Veränderung derselben über eine bestimmte Förderdauer. Die Versuche sind im Maßstab 1:1 auszuführen und haben gegenüber den betrieblichen Arbeiten den Vorteil einer Systematisierung und beliebigen Veränderbarkeit, während im Betrieb dem Bohrfortschritt alle anderen Aktivitäten unterzuordnen sind. Die Betrachtungen der Transportveränderungen über den Weg bzw. der Zeit sind im Betrieb ohnehin nur unter sehr hohem Aufwand durchzuführen. Ähnliches gilt für die zum gleichen Fragenkomplex zählende Schlupfgeschwindigkeit sowie für den Einsatz dichteunterschiedlichen Bohrkleins. In diesen Bereich fällt außerdem das Phänomen einer unregelmäßigen Bohrlochwandung. Das strömungsmechanische Verhalten von Bohrklein in Auswaschungen der Bohrlochwand kann ohnehin nur im Experiment beobachtet und systematisch untersucht werden.

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen konzentriert sich auf die folgenden, ineinander verzahnten Bereiche und ist durch betriebliche Untersuchungen insbesondere im Hinblick auf Korngrößenverteilungen zu ergänzen:

1. Strömungsmechanisches Verhalten von Bohrklein als Kollektive von Feststoffpartikeln bestimmter Korngrößenzusammensetzung und unterschiedlicher Dichten
2. Gutwolkenverhalten insbesondere im Hinblick auf Sedimentation
3. Korngrößen und Kornformveränderung über die Teufe
4. Unregelmäßiger Bohrlochwandeeinfluß auf den Bohrkleinaustrag.

Die Untersuchungen wären mit künstlichem und natürlichem Fördergut als Ein- und Mehrkorngemische sowie mit natürlichem Cuttingmaterial durchzuführen.

6.2.3 Theoretische Untersuchungen

Die betrieblichen und experimentellen Untersuchungen haben das alleinige Ziel, das Strömungsverhalten des Bohrkleins beim Austrag zu klären und Daten für die Verbesserung des mathematischen Ansatzes im Bohrkleinaustragsmodell zu liefern. Das Simulationsmodell könnte während der KTB-Vorbohrung auf seine Güte hin getestet und im Rahmen der Hauptbohrung eingesetzt werden. Es würde im Online-Verfahren mit aktuellen Meßdaten aus der umlaufenden Spülung versehen, um den Korrelationsgrad der Cuttings zur Teufe zu erhöhen. Der vorliegende Programmansatz müßte für diesen Aufgabenbereich erweitert, verbessert und auf seine Güte hin überprüft werden. Eine derartige Güteüberprüfung ließe sich günstigerweise an einer Bohrung durchführen, die ein bekanntes Formationsprofil durchteuft. Hierzu böte sich in idealer Weise der erste, der Vorbohrung parallel laufende Teufenabschnitt der KTB-Hauptbohrung an.

Der zusammenfassende Vorschlag konzentriert sich auf die Untersuchung des strömungsmechanischen Verhaltens der Cuttings im Experiment und im Betrieb, um den vorliegenden Rechenmodellansatz zu einem Simulationsmodell zu erweitern. Das Simulationsmodell soll im Online-Analyseverfahren mit aktuellem Datenmaterial gespeist werden, um eine gesicherte Cuttings-Teufen-Korrelation als Ergebnis zu erhalten.

LITERATURVERZEICHNIS:

- ADAM, J.** Die Konzentrationsverteilung heterogener Suspensionen beim hydraulischen Transport durch horizontale Rohrleitungen
Dissertation, TH Karlsruhe, 1968
- BECKER, H.A.** The effects of shape and Reynolds number on drag in the motion of a freely oriented body in an infinite fluid
Can.J.Chem.Eng., April 1959, S. 85-91
- BRADLEY, W.** Experimental determination of casing wear by drill string rotation
ASME-PAP, Paper-Nr.: 74-Pet-51, 1974, S. 1-9
- CHIEN, SZE-FOO** Annular velocity for rotary drilling operations
Int.J.Rock Mech.Min.Sci., Vol. 9, 1972, S. 403-416
- GELLER, F.J.** The behavior of hydraulic conveyed solids of highly different properties in vertical pipelines
Intern. symposium of slurry flows, N.Y. American Society of Mechanical Engineers, Dec. 1986, S. 103-108

GRODDE, K.-H. Beiträge zur Rheologie disperser Systeme
Erdöl und Kohle 6, 1953, H. 7, S. 380-385; H. 9, S. 457-459; H. 10,
S. 608-613

GRODDE, K.-H. Rheologie Kolloider Suspensionen, insbesondere der
Bohrspülungen
Erdöl und Kohle 13, 1960, H. 1, S. 11-18, H. 2, S. 79-83

MITSUISHI, N. u. AOYAGI, Y. Non-Newtonian Fluid Flow in an Excentric
Annulus
Jnl.Chem.Eng. Japan, 6, 1973, S. 402-408

MOORE, P.L. Drilling Practices Manual
Petroleum Publ. Co., 1974

N.N. Drilling mud and cement slurry rheology manual
Gulf Publ.Co., Editions Technip
Paris, 1982

PIGOTT, R.J.S. Mud Flow in Drilling
Drill. and Prod. Practice, API, 1941, S. 91-103

RABIA, H. Oil Well Drilling Engineering Principles and Practice
Graham u. Trotman, London, 1985

SAMPLE, K.S. u. BOURGOYNE, A.T. Development of Improved Laboratory
and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of
Drilling Fluids
SPE Paper 74 97, 1987

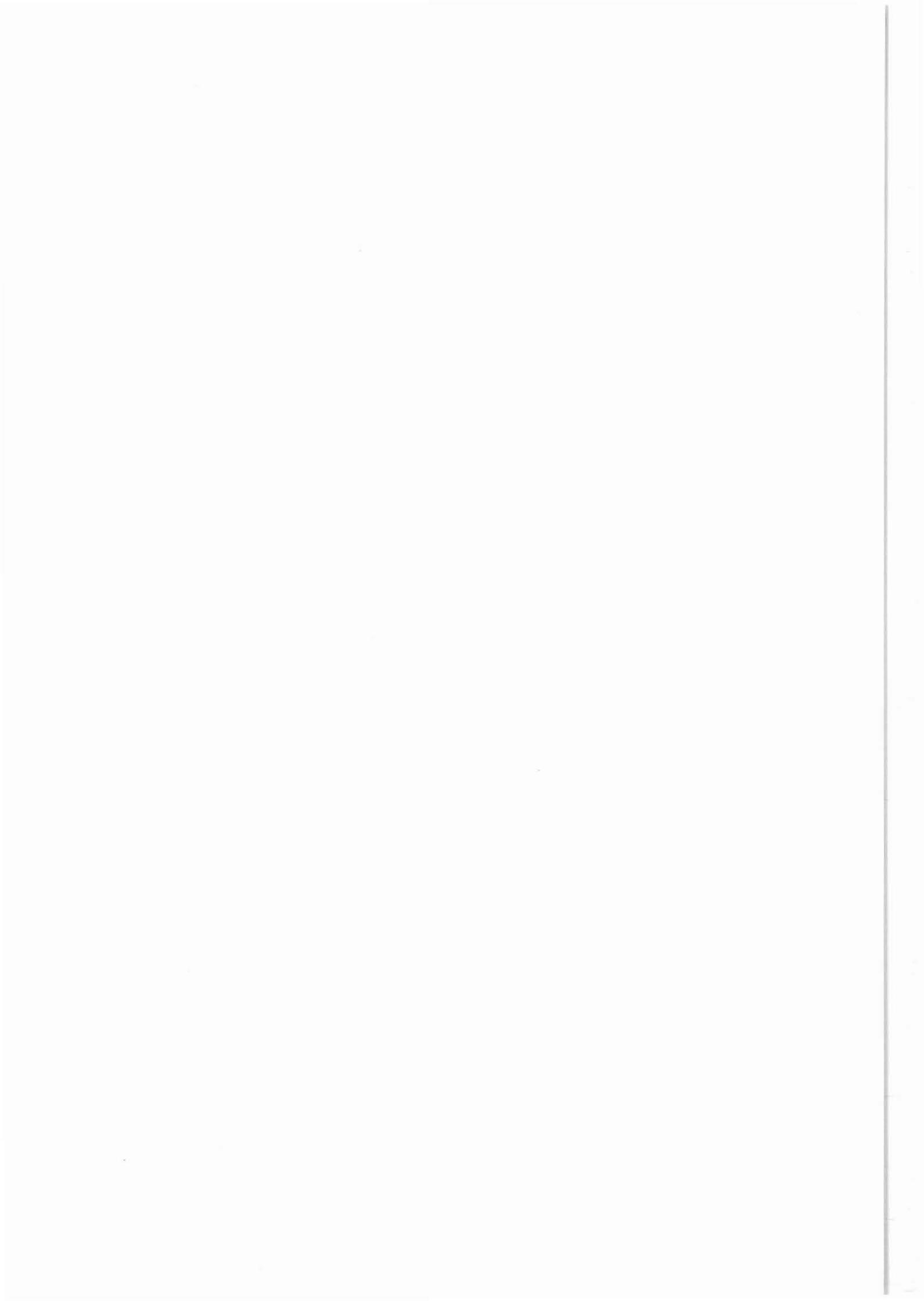
SAMPLE, K.S. u. BOURGOYNE, A.T. An Experimental Evaluation of
Correlations used for Predicting Cutting Slip Velocity
SPE Paper 66 45, 1977

SAVINS, J.G. Generalized Newtonian (Pseudoplastic) Flow in Stationary
Pipes and Annuli
Pet.Trans. AIME 213, 1958

SIFFERMAN, TH.R. u.a. Drilling-Cuttings Transport in Full-Scale Vertical
Annuli
Jnl. Petr.Techn., Nov. 1974, S. 1295-1302

- SIFFERMAN, TH.R.** Capacity of Drilling Fluids
Energy Sources v 7 n 1, 1983, ISSN 0090-08312
- THOMAS, R.P.** Drill Pipe Eccentricity Effect on Drilled Cuttings Behavior
MS Thesis, Univ. Tulsa, Tulsa, OK, 1978
- THOMAS, R.P. u.a.** Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings
behavior in vertical wellbores
Jnl.Petr.Technol. 34, Sept. 1982, S. 1929-1937
- TOMREN, P.H.** The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric
Annulus
MS Thesis, Univ. Tulsa, Tulsa, OK, 1979
- TOMREN, P.H. u.a.** An experimental study of cuttings transport in
directional wells
Soc.Petr.Engng. AIME, Oct. 1983, Paper SPE 12123, S. 22
- WALKER, R.E. u. MAYES, T.M.** Design of muds for carrying capacity
Jnl.Petr.Techn., July 1975, S. 893-900
- WALKER, R.E. u. KORRY, D.E.** Field Method of Evaluating Annular
Performance of Drilling Fluids
Jnl. Petr. Techn., Febr. 1974, S. 167-173
- WASP, E.J. u.a.** Solid-Liquid Flow-Slurry Pipeline Transportation
Trans.Techn.Public., Clausthal, 1977
- WILLIAMS, C.E. u. BRUCE, C.H.** Carrying capacity of drilling muds
Petroleum Transactions, AIME
Vol. 192, 1951, S. 111-120
- ZANGEMEISTER, C.** Nutzwertanalyse in der Systemtechnik
Wittmannsche Buchhandlung, München, 1973
- ZEIDLER, H.U.** An Experimental Analysis of the Transport of Drilled
Particles
Soc.Petr.Eng.Jnl. 12, 1972, S. 39-48

E. Spezialuntersuchungen

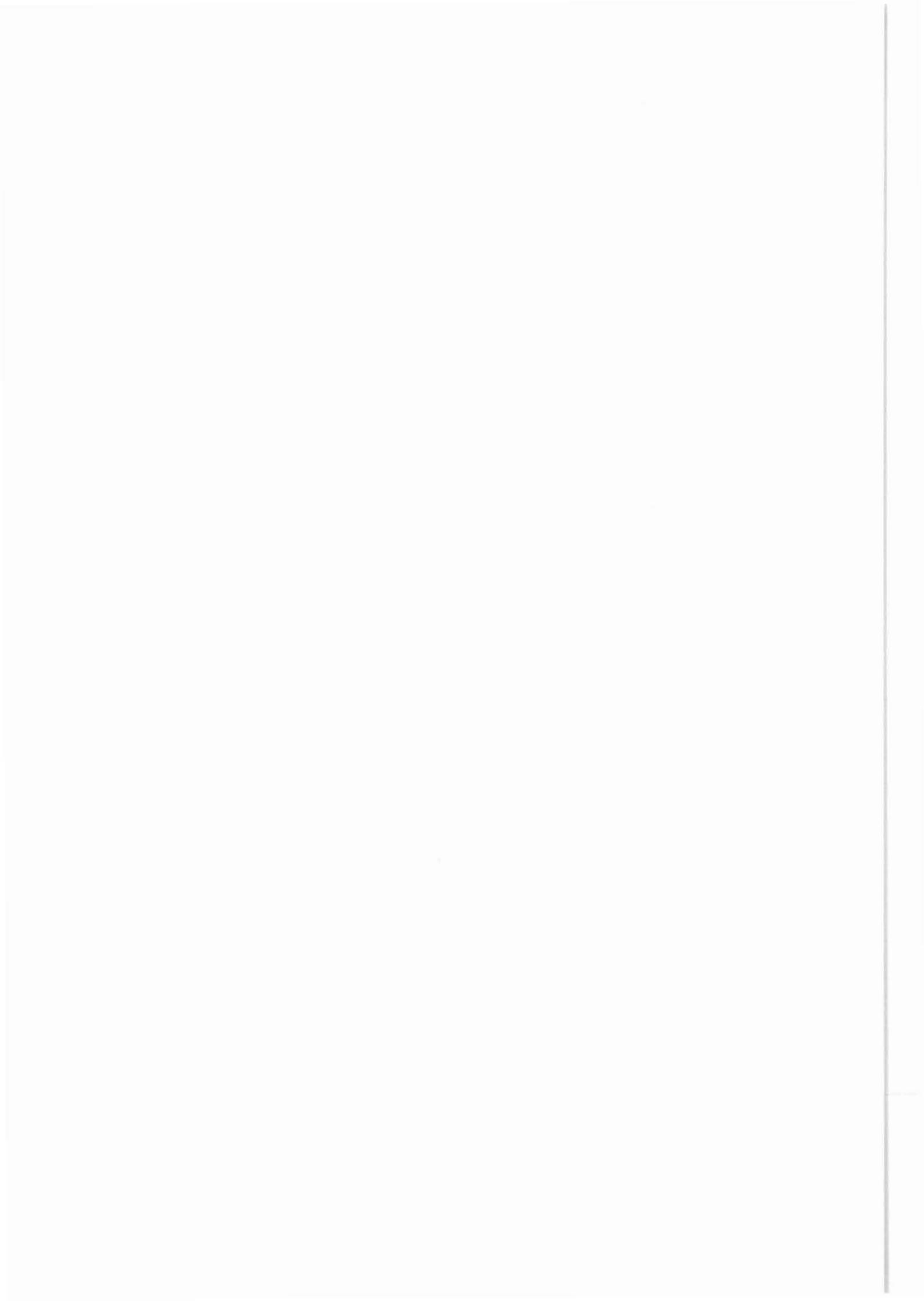


Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Untersuchungen der Möglichkeiten
zur Sammlung und Auswertung
von Meßwerten aus dem Bohrlochsohlenbereich
durch Bit-noise-Analysen

Dipl.-Ing. Y. Pang
Dipl.-Ing. U. Deutsch
Dipl.-Ing. M. Burkhardt
Prof. Dr.-Ing. C. Marx



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1.	Bohrmeißelinduzierte Schwingungen..... 549
1.1	Schwingungsursache während des Bohrvor- ganges..... 549
1.2	Bisherige Arbeiten zur Messung von meißel- induzierten Schwingungen zur Beurteilung des Bohrprozesses..... 550
1.2.1	Die Arbeit von van Rooij..... 551
1.2.2	Die Arbeit von Katz..... 551
1.2.3	Die Arbeit von Will..... 552
1.2.4	Die Arbeit am ITE..... 552
2.	Möglichkeit der Realisierung..... 553
2.1	Übertragungsmöglichkeit der Signale..... 553
2.2	Messung der meißelinduzierten Signale..... 555
2.3	Auswertung der meißelinduzierten Signale..... 557
3.	Entwicklung des einsatzfähigen Systems zur Sammlung von Meßwerten..... 558
3.1	Prinzipieller Aufbau des Systems..... 558
3.2	Entwicklungsschritte der Untersuchungen..... 559
3.2.1	Luftschallmessung beim Bohrprüfstand..... 559
3.2.2	Schwingungsmessung durch das Gestein im Labor..... 560
3.2.3	Feldmessungen..... 561
3.3	Auswahl geeigneter Komponenten des Meß- systems..... 561
3.4	Zeit- und Kostenaufwand der Untersuchungen..... 561
4.	Anwendungsmöglichkeiten für KTB..... 562
5.	Literaturverzeichnis..... 565

1 BOHRMEIBELINDUZIERTE SCHWINGUNGEN

Die während des Bohrvorganges auftretenden Schwingungen werden von Axial- und Reibungskräften sowie von Biege- und Torsionsmomenten verursacht /14/15/16/.

Sie resultieren aus:

- a) Zug- und Druckbeanspruchung
- b) Biegebeanspruchung
- c) Torsionsbeanspruchung
- d) Pumpendruck
- e) Schwingungen der Antriebsmotore
- f) Interaktion Meißel-Gestein

Die allein vom Meißel induzierten Schwingungen bzw. die durch Interaktion Meißel-Gestein ausgestrahlten Signale bringen viele wertvolle Informationen mit sich, welche zur Beurteilung des Bohrprozesses sehr praktisch sind.

Im großen Umfang werden die in Form von Schwingungen ausgestrahlten akustischen Signale als effektive Informationen zur Überwachung oder Kontrollierung des laufenden Prozesses oder zur Entdeckung der Struktur vom Objekt benutzt. Die typischen Verwendungsgebiete sind Seismik, Schallemission, Schwingungsuntersuchung, usw.

1.1 Schwingungsursache während des Bohrvorganges

Der Gesteinszerstörungsvorgang spielt bei der Induzierung der Meißelschwingungen eine wichtige Rolle. Er hängt direkt von der Art des Bohrverfahrens, des Bohrwerkzeuges und des erbohrten Gesteins ab. Anschaulich werden die Erscheinungsformen der meißelinduzierten Schwingungen von unten aufgeführten Faktoren beeinflusst:

- a) Bohrstangenkombination
- b) Bohrlochgestaltungen und -verformungen
- c) Bohrspülungen
- d) Bohrklein
- e) angetroffene Formation in Bezug auf die Teufe

Beim schlagenden Bohren spielt die Schlagzahl im meißelinduzierten Schwingungsspektrum eine große Rolle. Beim Rotary-Bohren unterscheidet man nach der Art der Gesteinszerstörung und dem verwendeten Bohrwerkzeug. Mit Rollenmeißeln wird das Gestein durch Überwindung der Druckfestigkeit zerstört. Die Wirkung beruht auf einer Zertrümmerung (crushing) des Gesteinsverbandes.

Während der Bohrtätigkeit mit Diamantbohrwerkzeugen findet ein Abrasionsprozeß statt, wobei an der Wirkstelle das Gestein durch Schleifen und Schaben (grinding) sowie Pflügen (plowing) zerstört wird.

Die Gesteinszerstörung mit PCD-Elementen* basiert auf der Span- bzw. Scherwirkung. Scherfestigkeiten liegen meistens unter den Druckfestigkeiten der Gesteine; daher muß beim Bohren mit PCD-Schneiden weniger Energie aufgebracht werden. Das Gesteinsmaterial wird von den PCD-Schneiden abgeschert (shearing), wobei das Bohrklein dann in Form von Chips vorliegt.

Die oben genannten Bohrprozesse wirken sich auf Schwingungen aus. Sie breiten sich mit eigener Energie und Frequenzgang durch das Gestein und das Bohrgestänge aus.

1.2 Bisherige Arbeiten zur Messung von meißelinduzierten Schwingungen zur Beurteilung des Bohrprozesses

Seit mehr als 30 Jahren wird immer größere Aufmerksamkeit auf die Bohrstangenschwingungen, bzw. auf BHA (Bottom Hole Assembly) - Verhalten beim Bohren - hingelenkt. Eine ganze Reihe von Beiträgen wurden auf diesem Gebiet zur Analysierung und Verbesserung der Stabilität der Bohrrichtung geleistet.

Angenommen wird, daß der Meißel als ein Schwingungsgenerator wirkt. Lutz u.a. /6/ behaupteten in ihrer Arbeit, daß die aufgezeichneten Schwingungssignale über die Härte des erbohrten Gesteins sofort aussagen können.

Bei Untersuchungen der Bohrbarkeit des Gesteins hatten Gstalder und Raynal /3/ geschrieben, daß die Messungen von Schallemissionen die Härte und die mineralogische Eigenschaft des Gesteins bestimmen können. Darüber hinaus kamen sie die Idee, den Bohrprozeß durch sonic-logging zu beurteilen.

* Polykristalline Diamant-Elemente

Um die Nutzbarkeit der meißelinduzierten Schwingungen zu untersuchen, insbesondere bei der Benutzung der zu durchbohrenden Formation als Übertragungsmedium der Schwingungssignale, haben van Rooij, Katz und Will /11/14/15/ Beiträge geleistet. Als Voruntersuchungen wurden im ITE die beim ritzenden Bohrverfahren erzeugten Schwingungen im Luftschallbereich aufgenommen und analysiert.

1.2.1 Die Arbeit von van Rooij /11/

Der Holländer van Rooij entwickelte ein Versenkgeophon, das in der Lage ist, die seismischen Signale getrennt nach Longitudinal- (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen) aufzuzeichnen. Das Sondengeophon wird unterhalb des ersten Grundwasserspiegels in einem Bohrloch eingebaut, wobei die Schwingungen dann von einem Tonbandgerät aufgezeichnet und anschließend mit einem Schreiber graphisch dargestellt werden. Von dem Meßsystem liegen noch keine Daten von einer Bohrung vor, Abb. 1 u. 2.

1.2.2 Die Arbeit von Katz /4/

Im Rahmen der Richtbohrtechnik wurde versucht, den Bohrlochverlauf seismisch zu orten. Dabei wurden acht Geophongruppen zu je 123 Geophonen in 8 Richtungen und jeweils einer Entfernung von ca. 1500 ft um die Bohranlage ausgelegt. Während des Bohrvorganges konnte ein niederfrequentes Signal von ca. 22 Hz registriert werden, welches nur bei der Interaktion des Meißels mit dem Gestein auftrat.

In diesen Untersuchungen wurden die Messungen bis zu einer gebohrten Teufe von ca. 7800 ft durchgeführt. Das Ergebnis zeigte, daß die seismischen Messungen zur Ortung des Bohrmeißels höhere Genauigkeiten als die traditionellen Messungen aufwiesen.

1.2.3 Die Arbeit von Will /14,15/

In gebirgsschlaggefährdeten Bereichen des Steinkohlenbergbaus werden Test- und Entspannungsbohrungen durchgeführt, wobei auch seismoakustische Messungen vorgenommen werden.

Die Messungen werden mit Beschleunigungsaufnehmern, welche in einem Sondenrohr untergebracht sind, praktiziert. Dieses wird mit einem packerartigen System in 1 m tiefen Bohrlöchern in 0,5 m Entfernung von den Test- und Entspannungsbohrungen positioniert. Das Packersystem hat die Aufgabe, die Beschleunigungsaufnehmer in Kontakt mit der Formation zu bringen, um eine Ankuppelung zu erreichen.

Gebohrt wird mit Durchmessern von 50 und 100 mm in₁ Drehbohrverfahren bei Drehzahlen im Schnitt von ca. 1000 min⁻¹.

Die Messungen sollen Aufschluß über seismische Flözreaktionen geben. Im Zuge dieser Arbeiten werden sozusagen als Nebeneffekt auch Bohrgeräusche (Bohrerschütterungen) mitregistriert. Frequenzanalysen zeigten, daß sich die reinen Bohrerschütterungen deutlich von den Ereignissen im Frequenzgehalt unterscheiden. Die Ereignisse liegen im Bereich von 500 bis 2000 Hz, die der Bohrerschütterungen im Bereich von 100 bis 400 Hz. Ferner zeichnen sich die Ereignisse durch deutlich höhere Amplituden aus, Abb. 3.

1.2.4 Die Arbeit im ITE

Um Kenntnisse von den meißelinduzierten Schwingungen zu erhalten, wurden im Institut für Tiefbohrtechnik, TU Clausthal, die Voruntersuchungen durch Luftschallmessungen beim Bohrprüfstand durchgeführt.

Bei den Voruntersuchungen wurden 3 verschiedenartige Bohrstifte mit 5 Gesteinsarten unter 3 Stufen einstellbarer Schnittgeschwindigkeit und 6 verschiedenen Andruckkräften beim Bohrprüfstand SPS durchgeführt. Trotz der vielen Einflußfaktoren werden auch einige grobe Verhältnisse durch die Luftschallmessungen entdeckt:

- Die Auswechslung der Werkzeuge (Bohrstifte) beeinflusst nicht nur den Frequenzgang, sondern auch die Amplitude der abgestrahlten akustischen Signale. Die wichtigsten Punkte sind die Geometrie, die Schneidenart und die Bestückform von Bohrstiften.

- Gegenüber den Werkstücken (Gesteine) sind die Erscheinungsformen der akustischen Signale sehr empfindlich. Die wesentlichste Änderung ist die Frequenz.
- Unter den Bohrparametern hat die Schnittgeschwindigkeit Einflüsse auf Frequenzgang und Amplitudenniveau. Die Tendenzen infolge Änderungen der Axial- und Tangentialkräfte sind durch diese Voruntersuchungen nicht klar darstellbar. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich der Abstrahlfaktor des Körperschalls.

Die Ergebnisse zeigen jedoch die Möglichkeit, durch Analyse der akustischen Signale die aktive Vorschubgeschwindigkeit und den auftretenden Schneidverschleißzustand ermitteln zu können.

2 MÖGLICHKEIT DER REALISIERUNG

2.1 Übertragungsmöglichkeit der Signale

Während des Gesteinszerstörungsvorganges werden durch die Interaktion Meißel-Gestein hauptsächlich Longitudinal-(P-Wellen) und Transversalwellen (S-Wellen) erzeugt, die sich durch Bohrgestänge und Gestein fortpflanzen. Untersuchungen wurden angestellt, um die Schwingungen aus dem Bohrlochsohlenbereich durch die Bohrstangen zu registrieren. Die sehr starken Störungen aus den häufigen Zusammenstößen Bohrgestänge-Bohrlochwand, den Reibungen Bohrgestänge-Bohrlochwand und den Eigenschwingungen Bohrgestänge machen es sehr schwierig, die Nutzsignale abzutrennen. Ferner ist es bemerkenswert, daß der Verlustfaktor von Amplitude (Energie) im Stahl sehr klein ist. In der Praxis wird die tatsächlich vorhandene Dämpfung nicht durch den Verlust im Stahl, sondern durch Reibung an der Verbindungsstelle geschaffen.

Die Signale durch die Formation sind seismische Signale. P-Wellen und S-Wellen sind Raumwellen. Es gibt auch Oberflächenwellen wie z.B. Rayleigh-Wellen und Love-Wellen.

Die klassischen Parameter seismischer Signale sind:

- Geschwindigkeit
- Frequenz

- Amplitude
- Signalform

Das Unterscheidungskriterium für P- und S-Wellen ist die Ausbreitungsrichtung der Bodenteilchen. Besonders hervorzuheben sind die SH-Wellen* und die SV-Wellen**. Nur reine SH-Wellen werden als SH-Wellen reflektiert und gebrochen. SV-Wellen erzeugen Wechselwellen (P-Wellen), Abb. 4.

Die Geschwindigkeiten der seismischen Wellen hängen hauptsächlich von der Dichte und den Elastizitätskonstanten K und μ ab.

Longitudinalwellengeschwindigkeit:

$$V_p = \frac{K + \frac{4}{3} \mu}{\text{Dichte}}$$

Scherwellengeschwindigkeit:

$$V_s = \frac{\mu}{\text{Dichte}}$$

K = Kompressionsmodul

μ = Schermodul

Die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen ist stets größer als die der Scherwellen. (In Gasen und Flüssigkeiten gibt es keine Scherwellen, da sie keine Scherspannungen aufnehmen können.)

Die Elastizitätskonstanten K und μ sind von folgenden Faktoren abhängig:

- Mineralbestand
- Korngröße und Kornregelung
- Art und Grad der Porenfüllung
- Porosität
- Kompaktion
- Zementation
- Umschließungsdruck

Das Verhältnis zwischen V_p und V_s ist eine wichtige Bezeichnung in der Seismik. Bei verfestigten Sedimenten in großer Tiefe liegt es zwischen 1.6 und 2.2. Unter geringer Bedeckung kann es auf 2.8 und in Lockersedimenten sogar auf 8 und mehr ansteigen, Abb. 5, 6, 7, 8.

Die Geschwindigkeit der S-Wellen hängt ausschließlich von

* = Horizontal polarisierte Scherwellen,

** = Vertikal polarisierte Scherwellen

der Scherfestigkeit und der Dichte ab. Da Flüssigkeiten und Gase keine Scherfestigkeiten besitzen, durchlaufen die S-Wellen Gesteine mit unterschiedlichen Porenfüllungen ohne nennenswerte Geschwindigkeitsänderungen. Aufgrund des inelastischen Verhaltens der Gesteine wird die Amplitude (Energie) der seismischen Signale beim Durchgang durch das betreffende Medium gedämpft.

Einen großen Einfluß auf die Dämpfung hat die Frequenz, die Amplitude nimmt generell mit steigender Frequenz zu. Die Formation übt eine Tiefpaß-Filterwirkung aus /7/, Abb.7.

Die Dämpfung der Signale durch das Gestein hängt auch von der Entfernung und den Gesteinsarten ab. Ein möglichst kurzer Abstand vom Meißel zum Sensor kann zu starke Dämpfung vermeiden. Deshalb sollen die Sensoren möglichst tief im Gebirge positioniert werden. Allgemein ist die Dämpfung schwächer als im Sedimentgestein. Der Dämpfungsfaktor von Sedimentgestein kann bis zu viermal größer sein. Die Bohrungen ins Eruptivgestein sind günstige Gelegenheiten, um dort die Untersuchungen durchzuführen /12/. Im Bergbau wird die notwendige hohe Resolution der geologischen Struktur in begrenzter Teufe gebraucht. Für diesen Zweck wird der hochfrequente Bereich benutzt, er erreicht mehrere KHz /5/.

Für die Erdöl- und Erdgasindustrie liegt der Untersuchungsbedarf in größerer Teufe, für diesen Zweck werden niederfrequente Aufnehmer benötigt. Um den Bohrprozeß zu beurteilen, sind die wertvollen Frequenzen nach den Untersuchungen von Will /14,15/ und ITE im Bereich von ca. 100 - 3000 Hz.

Die Arbeit von Katz /4/ hat bewiesen, daß die niederfrequenten Signale, die aus dem Bohrlochsohlenbereich stammen bis zu einer Teufe von ca. 7800 ft übertage gut registrierbar sind. Sie dienen zur Ortung des Meißels im Richtbohren. Weil die höherfrequenten Signale während des Durchgangs durch die Gesteine sehr stark gedämpft werden, liegt unsere Aufgabe darin, eine Meßtechnik zu entwickeln, um die schwächer werdenden Signale zu erfassen.

2.2 Messung der meißelinduzierten Signale

Der Signalaufnehmer mit hoher Empfindlichkeit wird hier benutzt, um die relativ schwachen höherfrequenten Signale zu registrieren. Wegen der großen Empfindlichkeit gegen die Geschwindigkeit reagieren die Geophone gut auf die niederfrequenten Erdbewegungen (Schwingungen). Im Gegensatz

hierzu reagieren die Beschleunigungsaufnehmer auf die Beschleunigung des schwingenden Körpers und geben stärkere Ausgangssignale ab, wenn die Eingangssignale von hohen Frequenzen sind. Diese Eigenschaft vom Beschleunigungsaufnehmer ist besonders gut, um die schwachen höherfrequenten Signale zu messen. Beschleunigungsaufnehmer mit Hochempfindlichkeit sind üblich. Wenn die Fremdsignale mit entsprechendem Filter beseitigt werden, sind Messungen ab $2 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ möglich.

Die Fremdsignale oder die Störsignale, welche meistens mit niederen Frequenzen aus dem Kontakt des Bohrgestänges mit der Bohrlochwand oder aus den übertage laufenden Maschinen herrühren, können durch Anwenden der Filtertechnik ausgeschaltet werden. Durch die Position der Sensoren, nach Möglichkeit tief im Gebirge, können auch die Einflüsse von störenden Signalen vermieden werden, dadurch wird das S/N-Verhalten (Signal/Noise) verbessert. Hierfür werden andere Bohrlöcher in begrenzter Entfernung als Hilfsmittel benutzt.

Beschleunigungsaufnehmer sind bei Hochtemperaturen benutzbar. Sie vertragen Temperaturen je nach Typen von $-74 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis max. $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Innerhalb des festgelegten Temperaturbereiches ist mit gewissen Änderungen der Übertragungsfaktoren und der Impedanz zu rechnen. Einzelheiten über Schwankungen können dem individuellen Kalibrierzeugnis des jeweiligen Beschleunigungsaufnehmers entnommen werden. Die Verbindungskabel vertragen Temperaturen bis max. $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wenn diese Sensoren tief im Gebirge postiert werden sollen, werden sie in einem Sondenrohr untergebracht, um sie gegen Hochdruck und Wasser zu schützen. Ein Packersystem kommt auch in Frage. Nach Auskunft von Prof. Kuo, Seismologe in den USA (Maurice Ewing & J. Lamar Worzel Professor of Geophysics, Columbia University), ist die Messung der meißelinduzierten Signale durch Tiefpositionierung der Sensoren sicher realisierbar. Mindestens 2 Meßpunkte sind wahrscheinlich notwendig, da während der Auswertung von Meßdaten manchmal mehr als eine Spur gleichzeitig aufgenommener Signale zur Verfügung gestellt werden soll. Wenn Ortung des Meißels auch gleichzeitig geschaffen werden soll, müssen noch mehr Sensoren ausgebracht werden, um die Genauigkeit zu erhöhen.

2.3 Auswertung von den meißelinduzierten Signalen

Die sich rasch entwickelnde Computertechnik verbesserte die Auswertung für die Seismik. Z.Z. sind fast alle Seismikmessungen in digitaler Form. Sie macht die Seismikmessungen günstig durchführbar und die Meßdaten werden zuerst durch Computer verarbeitet und dann interpretiert.

Die wichtigsten Operationen von Datenverarbeitung sind:

- Fourier-Transformation
- Konvolution (Faltung)
- Korrelation

Fourier-Transformation rechnet die Zeitdomäne zur Frequenzdomäne um, oder umgekehrt. Sie macht es möglich, die Datenverarbeitung teils in Zeitdomäne teils in Frequenzdomäne zu schaffen. Konvolution ist eine mathematische Filterfunktion, die die Auswirkung auf die Seismiksignale beim Durchgang durch die Formation berücksichtigt. Manchmal können die unerwarteten Filterfunktionen des Gesteins durch die Dekonvolutionstechnik beseitigt werden.

Korrelation dient zur Messung der Ähnlichkeit von zwei Datenreihen. Wenn nur eine Datenreihe benutzt wird, um diese mit sich selbst in Wechselbeziehung zu bringen, nennt man das Autokorrelation, für zwei Datenreihen ist das Kreuzkorrelation /13/.

Das Ziel der Datenverarbeitung ist die Verbesserung des Signal-to-Noise-Verhältnisses. Viele digitale Filterfunktionen basieren auf der Informations-Theorie.

Mit Hilfe der vorhandenen, entwickelten Datenverarbeitungstechnik in der Seismik können die aus dem Bohrlochunterbereich kommenden seismischen Signale optimal gefiltert und die Störsignale möglichst unterdrückt werden. Für unsere speziellen Meßzwecke werden eigene Funktionen in Frage kommen, z.B. ein mathematisches Modell zur Ortung des Meißels. Die umfangreichen Labor- und Felduntersuchungen dienen nicht nur zur Erfahrungssammlung, sondern auch zur Sammlung der wichtigsten Daten, welche für rechtzeitige Beurteilung des Bohrprozesses in situ sehr brauchbar sind.

3 ENTWICKLUNG EINES EINSATZFÄHIGEN SYSTEMS ZUR SAMMLUNG UND AUSWERTUNG VON MEBWERTEN

3.1 Prinzipieller Aufbau des Systems

Eine notwendige Meßkette zur Sammlung und gleichzeitigen Auswertung von meißelinduzierten Signalen ist prinzipiell nicht anders als eines der Systeme, die auf den Gebieten von Schwingungsuntersuchungen, Seismik und Akustikuntersuchungen angewendet werden.

Sie erfaßt:

- Sensoren zur Signalerfassung
- Einrichtung zur Signalaufzeichnung
- Einrichtung zur Signalverarbeitung
- Einrichtung zur Interpretation

Als Sensoren werden bei den allgemeinen Schwingungsuntersuchungen hauptsächlich Beschleunigungsaufnehmer, DMS (Dehnungsmessungstreifen) und Mikrofone sowie besonders bei den Erderschütterungen Geophone angewendet. Durchlaufend durch angeschlossene Vorverstärker und Filter (Tiefpaß- und Hochpaßfilter) werden die Signale direkt zur Signalaufzeichnungseinrichtung geleitet.

Die erfaßten Signale werden analog oder digital aufgezeichnet. Analog werden die Signale meistens auf dem Magnetband gespeichert. Die Digitaltechnik bringt nicht nur die hohe Meßgenauigkeit mit, sondern läßt die Meßdaten durch umfangreiche Verwendungen von Digitalcomputern immer besser bearbeiten und interpretieren. Im Rahmen der Digitalerfassung werden die Signale zuerst digitalisiert und dann auf Magnetbänder oder anderen Speichermedien, wie Disketten gespeichert.

Meistens werden computergesteuerte Signalerfassungseinrichtungen angewendet. Die digitalisierten Meßdaten werden im Computer aus dem Speicherraum gelesen und je nach Bedarf mit entsprechenden Programmen bzw. mathematischen Methoden im Computer weiterverarbeitet. Die angewendeten Funktionen im Rahmen der Seismik sind hauptsächlich Fourier-Transformation, Korrelation und Konvolution (S. Kap. 2.3). Solche Funktionen sind auch üblich in den Untersuchungen von Schwingungen und Schall. Zur Interpretation werden die vorbereiteten Daten graphisch oder in anderen Formen dargestellt oder mit den früher gespeicherten Daten verglichen.

3.2 Entwicklungsschritte von Untersuchungen

Ziel dieser Untersuchungen ist es, festzustellen, wie man die auftretenden Schwingungen zur Beurteilung des Bohrprozesses heranziehen und meßtechnisch erfassen kann.

Enger gefaßt:

- Aussagen über die Leistungsfähigkeit von Gesteinszerstörung
- Aussagen über den Zustand des Bohrwerkzeuges (Meißelabnutzung)
- Frühzeitiges Erkennen eines eventuellen Festsetzens des Bohrwerkzeuges
- Aussagen über die durchteufte Formation
- Erkennung von Schichtgrenzen

Der Entwicklungsgang ist schrittweise wie folgt:

1. Luftschallmessungen beim Bohrprüfstand:

Dadurch wird erkannt, ob die charakteristischen Signale durch Gesteinszerstörungen mit geänderten Werkzeugen, Werkstücken und mechanischen Zuständen erkannt werden konnten, in welchem Bereich der Frequenz die Signale liegen und welche Tendenz die Signale mit geänderten Bedingungen haben.

2. Schwingungsmessung durch das Gestein im Labor:

Mit verbesserter Meßkette und entwickelter Filterungstechnik wird der innere Zusammenhang zwischen erfaßten Signalen und den Prüfzuständen genau definiert. Insbesondere werden erste Kenntnisse über das Durchlaufen der Signale durch das Gestein erhalten.

3. Feldmessungen:

Diese basieren auf den Kenntnissen und Erfahrungen von Laboruntersuchungen. Praktische Anwendungen werden durch Feldmessungen gewonnen und die Meß- und Auswertungstechnik optimiert.

3.2.1 Luftschallmessung beim Bohrprüfstand

Beim Bohrprüfstand (SPS) im ITE werden die meißelinduzierten Schwingungen in Form von Luftschall als erster Schritt analysiert, um die Charaktere der Signale im Bezug auf den Bohrprüfstand zu erkennen.

Im Bereich von Luftschallmessungen sind für die Messungen bei den Prüfungen der Einzelschneiden von Rollenmeißeln geplant. Das Ziel ist es, die Charaktere der Signale beim drückenden Gesteinszerstörungsvorgang festzustellen.

3.2.2 Schwingungsmessungen durch das Gestein im Labor

Im ITE stehen verschiedene Bohrprüfstände zur Verfügung. Zusammen mit den laufenden Projekten können die Untersuchungen mit verschiedenen Gesteinen und Bohrwerkzeugen je nach Bohrverfahren an den Bohrprüfständen durchgeführt werden.

Mit dem Bohrprüfstand HC-150 werden Gesteinsblöcke der Größe ca. 1 x 1 x 1 Meter benutzt. Mit verschiedenen Bohrwerkzeugen wird schlagend und drehend gebohrt bzw. gekernt. Es bietet sich die Möglichkeit, daß ein paar entsprechende Sensoren ins Gestein eingebaut werden können, um die Signale durch das Gestein zu erfassen.

Der Hochdruckbohrautoklav bietet noch eine Möglichkeit, die Signale durch das erbohrte Gestein unter Bohrlochbedingungen zu messen. Die zu prüfenden Bohrwerkzeuge sind Rollenmeißel und Diamantmeißel. Es werden verschiedene Gesteine gebohrt. Die für Hochdruck geeigneten Sensoren werden an das Gestein postiert.

Im Rahmen von KTB ist ein Untersuchungsprojekt über Rollenmeißelprüfungen geplant und wird beantragt. Ein 1:1 Rollenmeißelprüfstand eignet sich für die Bit-Noise-Messungen durch das Gestein.

Optimal können Schwingungsmessungen beim Durchbohren von Betonblöcken durchgeführt werden. Die Betonblöcke dienen zur Prüfung eines Ablenkwerkzeuges mit Dia-Meißeln. Eine andere Möglichkeit bietet ein Bohrloch in der Halle des ITE. In diesem Bohrloch können fertige Bohrgeräte getestet werden. Daneben befindet sich ein 30 m tiefer Schacht, aus dem heraus durch das Gebirge (Grauwacke) die Meißelgeräusche im Bohrloch gemessen werden können.

Alle Bohrverfahren werden mit verschiedenen Gesteinen geprüft. Dadurch können aus den meißelinduzierten Schwingungen Aussagen, besonders für die verschiedenen Gesteine, getroffen werden. Von großem Vorteil ist es, daß die mechanischen Daten bei den Untersuchungen immer zur Verfügung stehen.

Hierdurch könnten Laboruntersuchungen durchgeführt werden, ohne großen Aufwand an Bohrprüfständen und den Instrumenten

zur Erfassung und Auswertung von mechanischen Bohrparametern betreiben zu müssen.

3.2.3 Feldmessungen

Ausgehend von den Kenntnissen und Erfahrungen der Laboruntersuchungen kann nach der Verbesserung der Meß- und Auswertungstechnik, den praktischen Anwendungen nahegekommen werden.

Diese Versuche können z.B. in Steinbrüchen erfolgen. Weitere Kenntnisse können durch diese Versuche erhalten werden, z.B. wie und wo kann man die Signale in-situ optimal erfassen und wo ungefähr liegt die Meßgrenze.

Desweiteren könnten auch Feldversuche bei laufenden Bohranlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie erfolgen.

3.3 Auswahl geeigneter Komponenten von Meßsystemen

Als Sensoren könnten wir Beschleunigungsaufnehmer benutzen. Sie können die hochfrequenten Signale erfassen, obwohl die Signale schon sehr schwach sind. Die Umgebungsbelastungen bei den Versuchen, wie Druck, Temperatur und Luftschall, werden von diesen Aufnehmern gut vertragen.

Für die Meßdatenverarbeitung der von den Sensoren gelieferten Werte sind zwei alternative Systeme dargestellt (Abb. 9). Bisher wurden die auf einem Magnetband aufgezeichneten Daten über einen FFT-Analysator umgeformt und die Ergebnisse ausgedruckt (Abb. 9, System 1).

Da die Anschaffung eines solchen FFT-Analysators für die weiteren Versuche sehr kostenintensiv ist, wurde nach einer günstigeren Alternative gesucht. Diese besteht in einer computergestützten Meßdatenerfassung (Abb.9, System 2).

3.4 Zeit- und Kostenaufwand der Untersuchungen

Abb. 9 erklärt die zwei möglichen anwendbaren Systeme. In Tab. 1 werden die Kosten für die zwei Systeme vorgestellt. Das System 1 erfaßt außer dem für beide Systeme brauchbaren Plotter auch ein Magnetband, einen FFT-Analysator und einen

Digital-Cassettenrecorder. Nach der hier gerechneten Summe mit dem System 1 ist eine Investition von mind. 11.500,- DM notwendig.

Das System 2 ist ein computergesteuertes Datenerfassungs- und Datenauswertungssystem. Es erfaßt eine Datenerfassungskarte, einen Computer mit Software und einen Plotter.

Dieses System ist flexibler und kann auch gut in den Feldversuchen eingesetzt werden. Die Kosten für dieses System betragen die Hälfte von System 1.

Der Zeitaufwand ist abhängig von den parallellaufenden Projekten von den Gesteinszerstörungen.

Nach der bisherigen Planung "KTB-Gesteinszerstörung" werden die Laboruntersuchungen bis Ende 1988 abgeschlossen sein. Die zu beantragenden Rollenmeißeluntersuchungen sind voraussichtlich bis 1989 angesetzt.

Im Rahmen der in dieser Studie genannten Untersuchungen könnten neben den Laboruntersuchungen auch die Feldversuche durchgeführt werden. Die Verbesserung und Optimierung der Meß- und Auswertungssysteme soll auch nebenbei geschehen. Beispielsweise könnte diese Arbeit innerhalb von zwei oder drei Jahren zum Abschluß gebracht werden.

4 ANWENDUNGSGEBIETE FÜR KTB

Das technische Konzept des KTB sieht zwei Bohrungen vor, eine Vorbohrung bis mindestens 3000, möglichst aber 5000 m und die Hauptbohrung mit einer Endteufe von 12.000 bis 14.000 m. Sie wird in 200 m Entfernung von der Vorbohrung abgeteuft. Die Vorbohrung wird wegen der dauernden Messungen nicht wieder verfüllt.

Nach dem Zeitplan von KTB wird mit der Vorbohrung bald begonnen und mit einer Teufe von 5000 m Ende 1989 beendet sein. Die Hauptbohrung kann im Sommer 1989 begonnen werden /10/.

Der Standort der Vor- und Hauptbohrung umfaßt die metamorphen und kristallinen Gesteine, welche in großer Teufe anstehen /12/.

Der Einsatz der Geräte könnte sowohl in Versenkbohrlöchern als auch später in dem Loch der Vorbohrung eingesetzt werden. Die erfaßten Vorteile liegen in einem zusätzlichen Informationsfluß von der Wirkstelle der Bohrung durch das Gestein nach Übertage. Außer weiteren wissenschaftlichen Erkenntnissen werden hier auch Möglichkeiten zur Optimierung des Bohrprozesses und zur weiteren Planung der konitnuierlichen Tiefbohrung geliefert. Die am 22.04.1987 beim KTB in Hannover stattgefundene Besprechung mit den

Herren,
Dr. Leidecker (BGR)
Dr. Hingen (BGR)
Dr. Hoffers (KTB) und
Dipl.-Ing. Sperber (KTB)

ergab für weitere Untersuchungen folgende Gesichtspunkte:

1. Der Nutzfrequenzbereich in der Seimik liegt bei max. 100 Hz.
Die darüber hinaus gehenden höherfrequenten Signale werden durch die Gesteine gedämpft.
Nach neueren Untersuchungen von Will und dem ITE liegt der erforderliche Nutzfrequenzbereich bei ca. 100 ~ 3000 Hz.
2. Nach der Ansicht von Dr. Leidecker ist ein Signaldurchgang durch die Matrix möglich.
3. Folgende Entwicklungsschritte werden von der BGR vorgeschlagen :
 - a) die Sensoren sollen in einem für Messungen niedergebrachten Bohrloch in einer Teufe von mindestens 10 m untergebracht werden.
 - b) Ein Sondenrohr mit eingebauten Sensoren soll im Meßbohrloch durch ein Packersystem gesetzt werden. Das Meßbohrloch soll abgedeckt werden, um Störungen auszuschalten.
 - c) Die Untersuchung über die Aussagefähigkeit von niederfrequenten Signalen soll weitergeführt werden.
 - d) Spezielle Meßsonden für Feldmessungen und das dazugehörige genaue Positionieren der Sonden soll entwickelt werden.
4. Die Meßsonden können möglicherweise von Prakla Seismos gekauft oder gemietet werden. Eine Alternative dazu wäre die eigene Entwicklung in der Werkstatt des ITE. Die Sonden sollen mit einem packerartigen System, entweder ausziehbar oder durch Zementierung festsetzbar, versehen werden.
5. Neben den Beschleunigungsaufnehmern können auch Geophone, welche seimische Signale bis 3 KHz messen können, eingesetzt werden.
6. Die Koordination kann mit der BGR erfolgen. Leihweise stellt die BGR Meßgeräte, z.B. einen FFT-Analysator zur Verfügung.

Im August und September 1985 wurde eine Untersuchung über die AE- (Acoustic-emission) Überwachung des Bohrprozesses in Japan durchgeführt. Im Feld wurde eine triaxiale AE - Meßsonde in einem Meßbohrloch in einer Teufe von 210 m untergebracht. Die Entfernung vom Hauptbohrloch betrug 200 m. Die Messungen erfolgten während des Bohrens. Die dabei erreichte Teufe betrug 312 m - 378 m. Es wurde mit einem Drei-Kegel-Rollenmeißel und einer HQ-Kernbohrkrone

gebohrt. Abbildung 10 und 11 zeigen die Meßanordnung. Das Meßsystem ähnelt dem vom ITE geplanten System. Klare kontinuierliche AE-Signale wurden registriert. Ihre Wellenform und RMS (root mean square voltage, d.h. Messung der Energie von AE-Signalen) geben eine gute real-time-Information über die geologische Struktur und den Zustand des Bohrvorganges wieder.

Die Autoren behaupten, daß die AE-Methode genaue Informationen über

- Formationswechsel
- mechanische Eigenschaften des Gesteins
- Ribbildung im Gebirge
- Zustand des Bohrprozesses
- Reibung Bohrgestänge mit Bohrlochwand usw.

liefern kann.

LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Daneing, D.W. : Rotary speed, drill collars control, drillstring bounce
Oil & Gas Journal, June 6, 1983
- /2/ Daneing, D.W. : Drill collar length is a major factor in vibration control
SPE 11 228, 1982
- /3/ Gstalder, S. : Measurement of some mechanical properties of rocks and their **relationship** to rock drillability
Raynal, J. JPT August 1966, pp. 991 - 996
- /4/ Katz, L.J. : Drill bit location, guidance by seismic sean feasible
Oil & Gas Journal, July 28, 1980, pp. 197 - 200
- /5/ Lepper, C.M. : Guidelines for selecting seismic detectors for high-resolution applications
Bureau of Mines Report of Investigation RI 8599, 1981
- /6/ Lutz, J. : Instantaneous logging based on a dynamic theory of drilling
Raymond, M. JPT, June 1972, pp.750 - 758
Gstalder, S.
Qichand, C.
Raynal, J.
Nuckleroy, J.A.
- /7/ Militzer, H. : Angewandte Geophysik im Ingenieur und Bergbau
Schou, J. Ferd. Enke Verlag, Stuttgart, 1986
Stotzner, U.
- /8/ N.N. : Continental deep drilling program in the Federal Republic of Germany
Oil & Gas -European Magazine 2, 1985
- /9/ Prakla Seismos : Schwerwellenseismik
Firmenschrift, 1986
- /10/ Rischmüller, H. : Das "Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland", eine technische

- Forts. S. 17
- Herausforderung
BDG Seminar "Bohrtechnik" in
Clausthal, März 1987
- /11/ Rooij, G.v. : Mündliche Mitteilung, 1986
- /12/ Sheriff, R.E.
Geldart, L.P. : History, Theory and data acquisition Exploration seismology, Volume 1, Cambridge University Press, 1985
- /13/ Sheriff, R.E.
Geldart, L.P. : Data-processing and interpretation Exploration seismology, Volume 2, Cambridge University Press, 1985
- /14/ Will, M. : Measurement and on-line evaluation of seismic seamreactions during test- and destressing-drilling
Proceedings Third Conference on Acoustic Emission/Microseismic Structures and Materials
Trans. Tech. Publication, Clausthal 1984, pp. 633 - 646
- /15/ Will, M. : Messung **seismischer Flözreaktionen** bei Testbohrungen und Entspannungmaßnahmen
WBK Bericht, August 1985, S. 5 - 10
- /16/ Wolf, S.F.
Zackenhause, M.
Arian, A. : Field measurement of downhole drillstring vibrations
SPE 14330, 1985
- /17/ Niitsuma, H.
Chubachi, N. : AE monitoring of well-drilling process by using a downhole AE measurement system Progress in Acoustic Emission II,
The **Japanese Society of NDI**, 1985

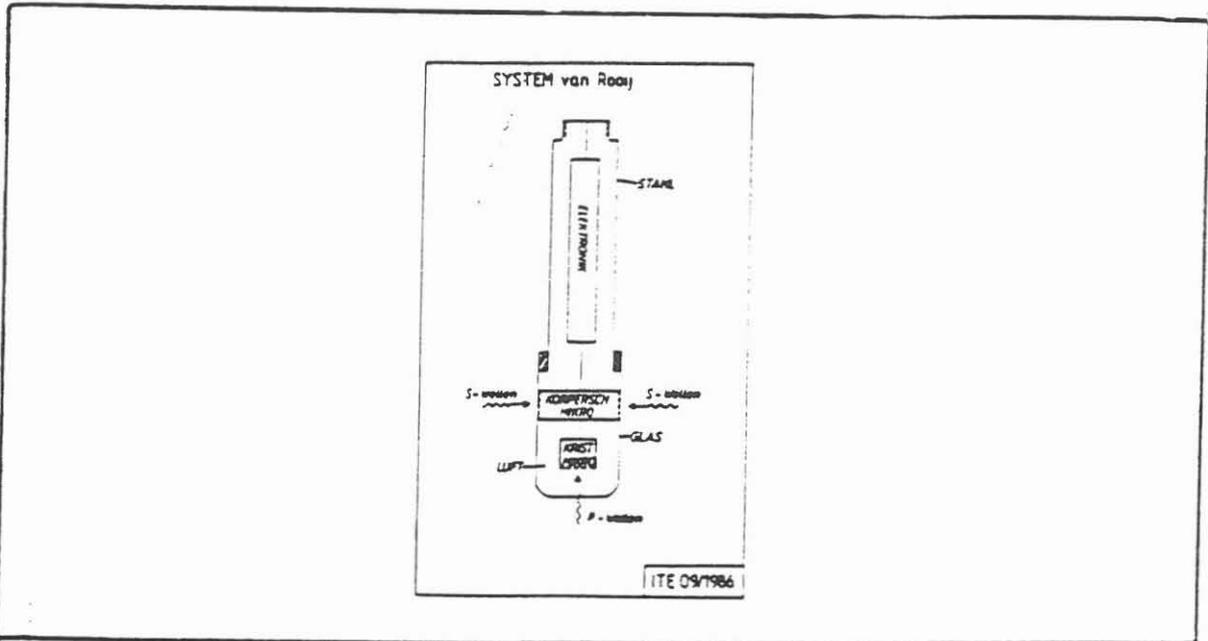


Abb. 1

Sondengeophon System van Rooij

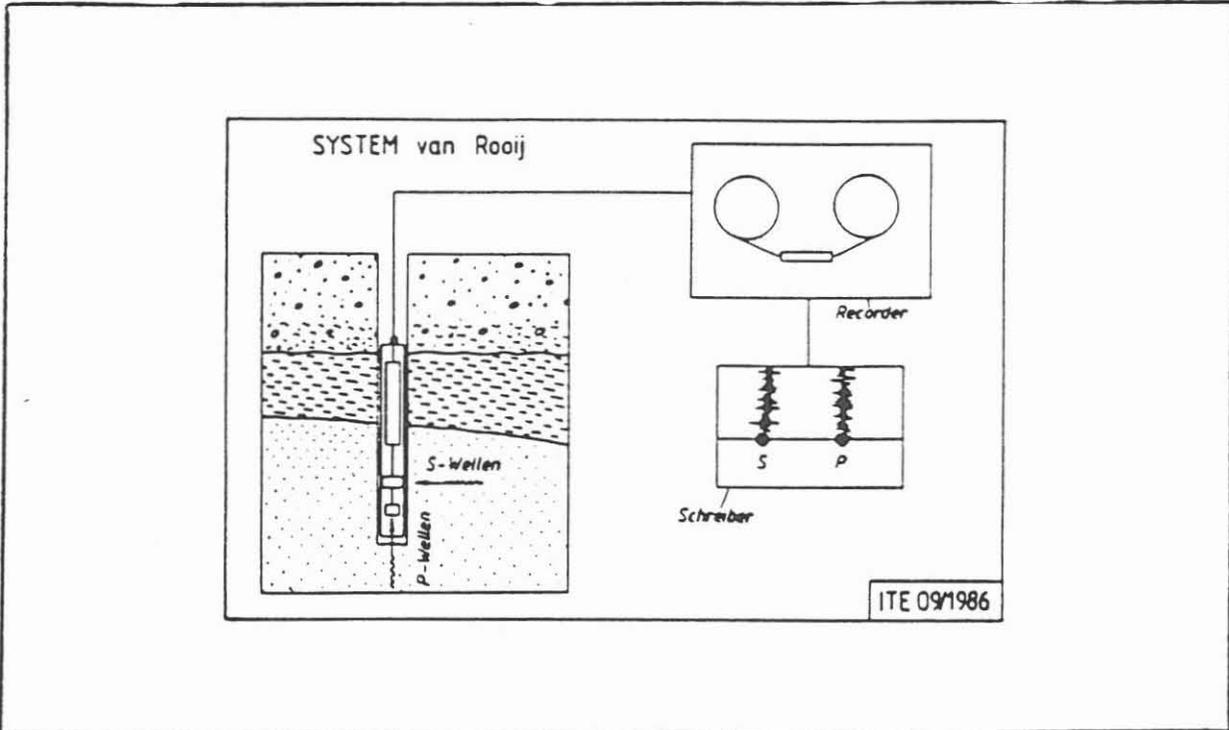


Abb. 2

Gesamtsystem van Rooij

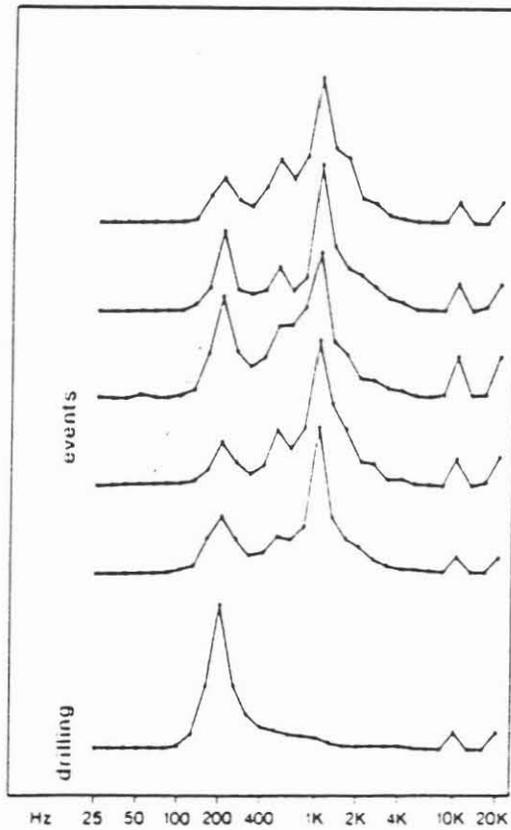


Abb. 3

Amplitudenspektrum von 6 Ereignissen und der Bohrerschütterungen. Der 10 KHz Peak resultiert aus einem Kontrollsignal.

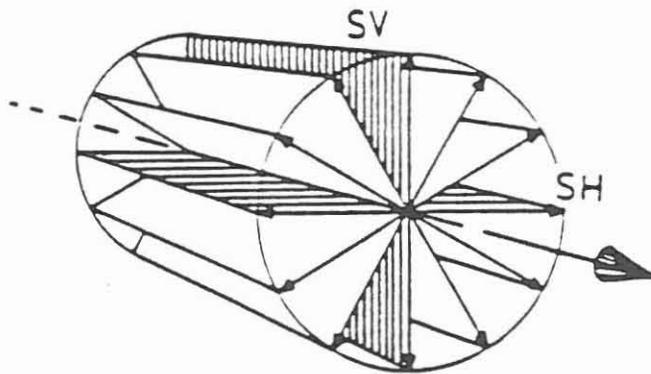


Abb. 4

S-Wellen, die Teilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (9)

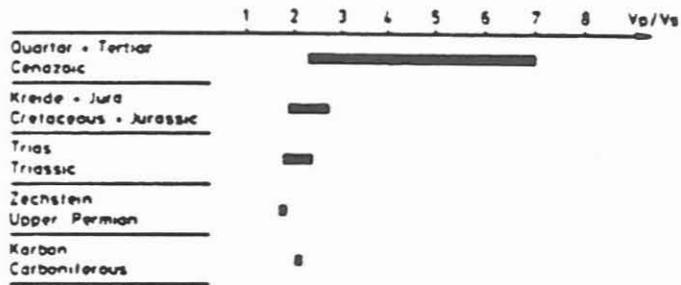


Abb.5

V_p/V_s -Verhältnis in Abhängigkeit vom geologischen Alter(9)

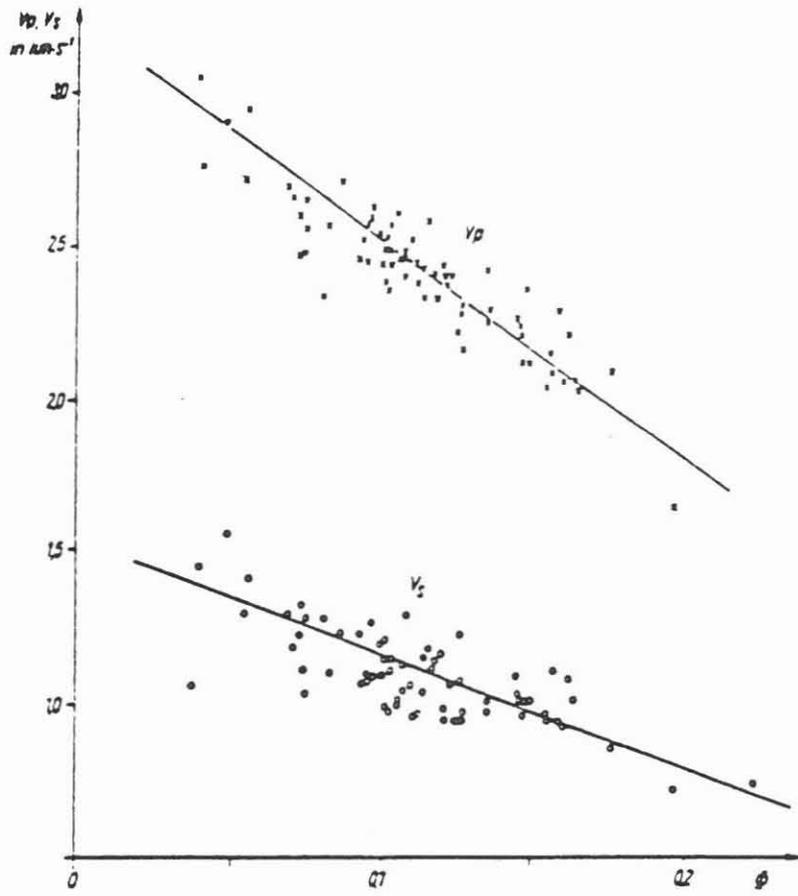


Abb.6

V_p und V_s -Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Porosität

Instrument	Menge	Firma	Kosten ca. (DM)	Bemerkung
Signalaufnehmer und Vorverstärker				
Beschleunigungs- aufnehmer	5	Brüel & Kjaer	4,500	
Vorverstärker	3	Brüel & Kjaer	13,500	
Datenerfassungs- und Auswertungssystem				
System 1				
Magnetbandgerät	1	Brüel & Kjaer	32,000	analog
FFT-Analysator	1	Brüel & Kjaer	40,000	einkanalig
Digital-Casset- tenrecorder	1	Brüel & Kjaer	17,000	
Plotter	1		3,000	
Summe			92,000	
System 2				
Datenerfassungs- karte	1	Ziegler	9,500	mit Software für Datenerfassung
Computer	1		6,000	IBM-AT o. kompatibel
Software			2,000	
Plotter	1		3,000	
Summe			20,500	
Notwendiges Zugehör				
Schwingerrequer für Kalibrierzweck	1	Brüel & Kjaer	2,500	
Summe mit dem System 1			111,500	
Summe mit dem System 2			41,000	

Tab.1

Kosten von Meßinstrumenten System 1 und System 2

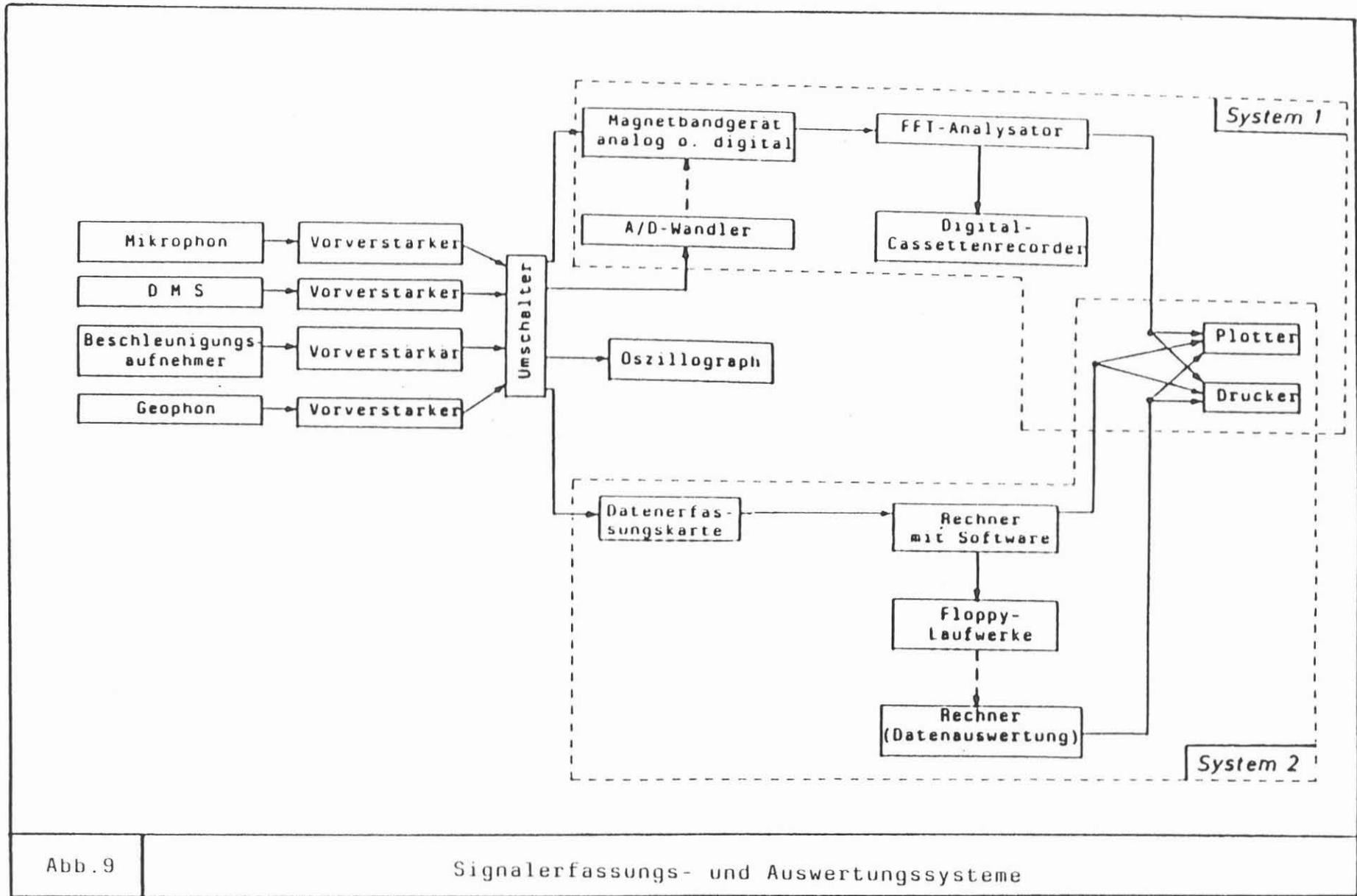


Abb. 9

Signalerfassungs- und Auswertungssysteme

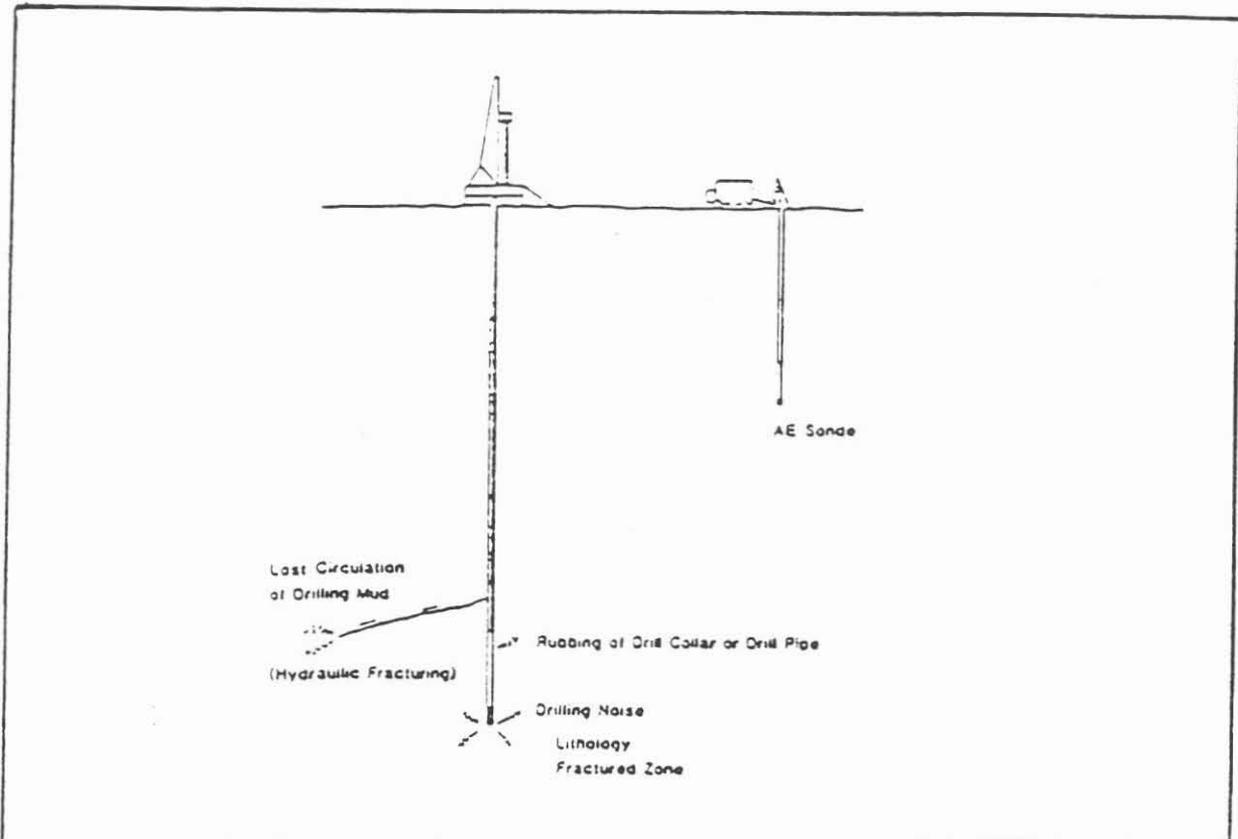


Abb. 10

Konzept von AE-Messungen

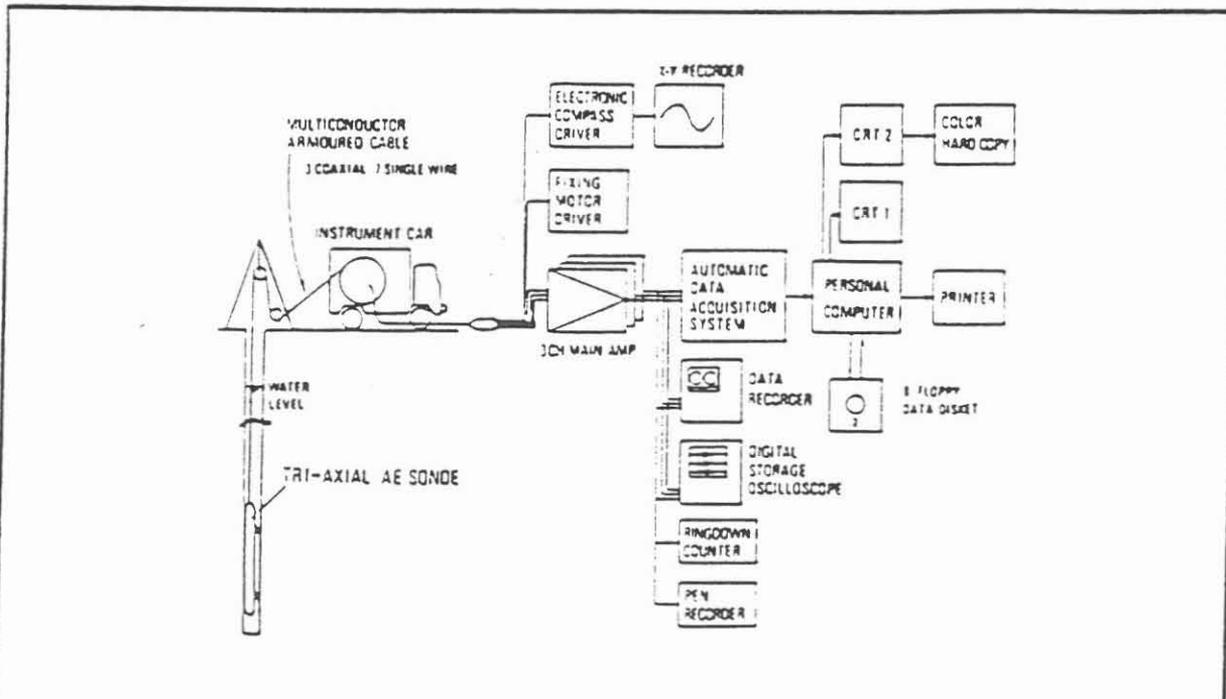


Abb. 11

AE-Meßsystem

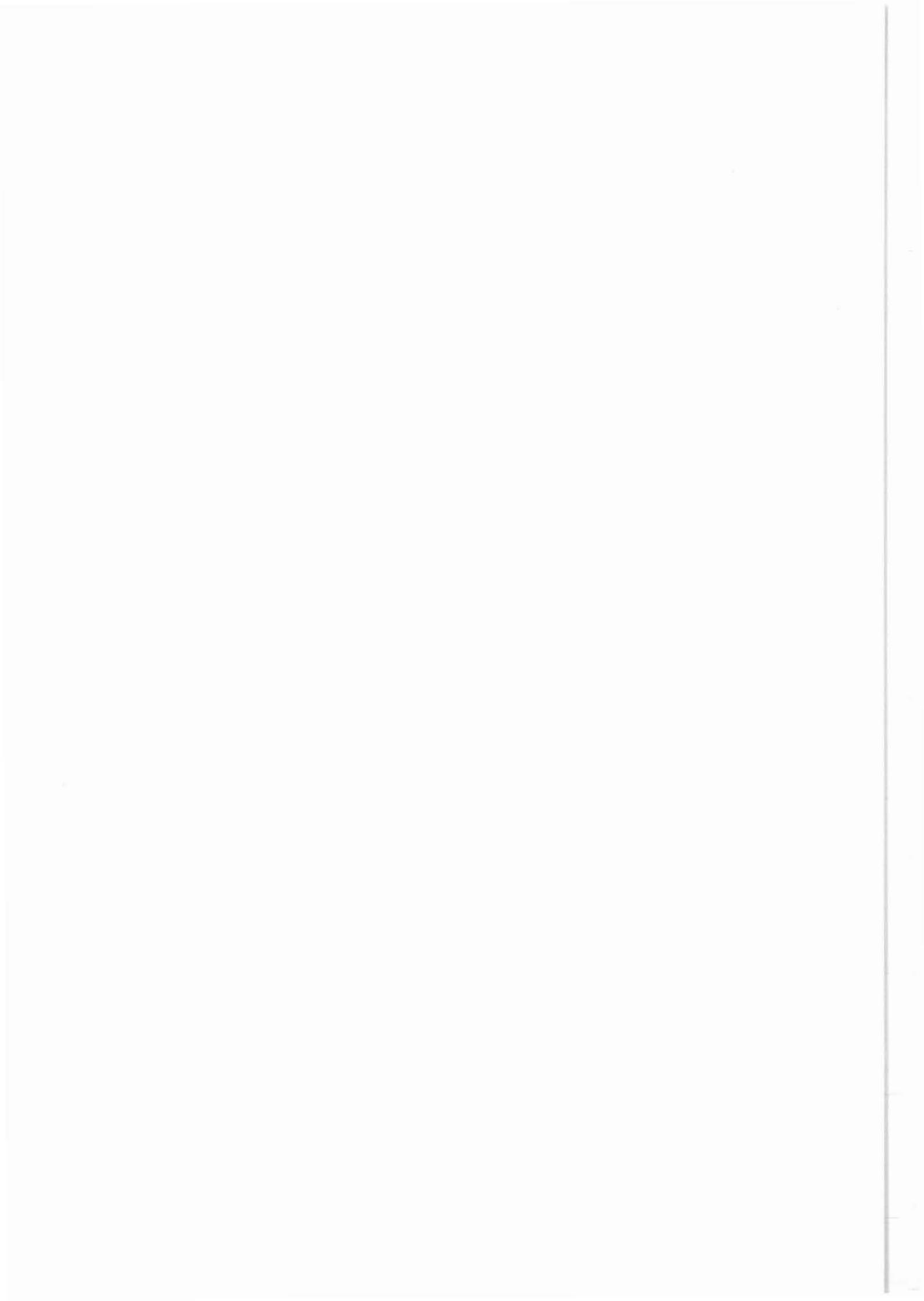
Preussag AG, Berkhöpen

Postfach 16 28
3150 Peine

Richtungskontrolle, Havarie
und Casingverschleiß in übertiefen
und heißen Bohrlöchern

Dr.-Ing. T. Kerk
Dipl.-Ing. H. Kinzel
Dipl.-Ing. B. Prevedel

unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. R. D. Stoll,
Dipl.-Ing. H. Halm & Dipl.-Ing. F. Tengemann



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	579
2. Einsatzbereiche von Bohrlochmeßgeräten.....	579
2.1 Bohrlochvermessung.....	580
2.2 Bohrlochnavigation.....	581
2.3 Festpunktbestimmung und Casingverschleiß- messung.....	582
2.4 Sprengstoffe.....	583
2.5 Kabel.....	584
3. Richtbohrtechnik und Casingverschleiß.....	585
3.1 Vermeidung des Casingverschleißes durch Meißeldirektantriebe.....	585
3.2 Minimierung des Casingsverschleißes durch das Abteufen einer vertikalen Bohrung....	586
3.3 Sonstige Möglichkeiten zur Reduzierung des Casingsverschleißes.....	588
4. Erweiterung der Einsatzbereiche.....	590
4.1 Bohrtechnik für vertikale Bohrungen.....	590
4.1.1 Steuerbare Untertageantriebe.....	590
4.1.2 Steuerbarer Stabilisator.....	591
4.1.3 Zielbohrstange.....	591
4.1.4 Quadratische Schwerstangen.....	592
4.2 Erhöhung der Druckfestigkeit.....	592
4.3 Erhöhung der Temperaturfestigkeit.....	593
4.3.1 Reduzierung der Wärmeeinwirkung.....	594
4.3.1.1 Passive Kühlung durch Hitzeschilder und Wärmespeicher.....	594
4.3.1.2 Aktive Kühlung.....	595
4.3.2 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Elektronik.....	596
4.3.2.1 Selektion elektronischer Bauteile.....	596
4.3.2.2 Schaltungsauslegung.....	597
4.3.2.3 Hybridisierung.....	597
4.3.2.4 Verzicht auf elektronische Systeme.....	598
4.3.3 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Mechanik.....	598
5. Literatur.....	600

1 EINLEITUNG

Beim Abteufen einer Bohrung von 14.000 m Teufe treten eine Reihe von Problemen auf, die für das erfolgreiche Niederbringen einer solchen Bohrung zu lösen sind. Hierzu sind insbesondere die Beherrschung der mit der Teufe stark zunehmenden Drücke und Temperaturen zu rechnen. Dadurch werden Neu- bzw. Weiterentwicklungen der bisher eingesetzten Geräte zur Bohrlochvermessung und -navigation erforderlich.

Bei langen Bohrphasen mit hohen Hakenlasten aus verrohrten Bohrlochsektionen kommt der Minimierung des Casingverschleißes eine besondere Bedeutung zu. Potentielle Lösungen für dieses Problem können das Abteufen eines möglichst vertikalen Loches oder der Einsatz von Meißeldirektantrieben zur Verschleißminimierung sein.

2 EINSATZBEREICHE VON BOHRLOCHMESSGERÄTEN

Durch die mit der Teufe zunehmenden Parameter Druck und Temperatur werden die Einsatzbereiche der in Bohrlöchern verwendeten Geräte begrenzt. Zunehmender Druck kann, insbesondere bei Casingverschleißmeßgeräten, die mit mechanischen Fühlern arbeiten, zum Eindringen von Spülung in das Gerät und dadurch zum Totalausfall führen. Eine andere potentielle Schadensursache, die durch zu hohen Druck verursacht wird, ist das kollabieren des Gehäuses.

Hohe Temperaturen verändern die

- Werkstoffeigenschaften
- Maßhaltigkeit feinmechanischer Systeme
- chemischen Eigenschaften

und üben einen großen Einfluß auf

- elektronische Bauteile
- Dichtungen

aus.

Der Temperatureinfluß auf die mechanischen Eigenschaften von Stählen ist zwar gering, sollte jedoch bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden. Sowohl die Streckgrenze als auch die Zeitstandfestigkeit nehmen mit steigender Temperatur ab.

Bohrlochmeßgeräte haben meist einen komplexen feinmechanischen Aufbau aus einer Vielzahl von Teilen verschiedener Materialien. Die unterschiedlichen Materialien können bei hohen Temperaturdifferenzen große Probleme aufwerfen, da die Längen- und Raumausdehnungskoeffizienten unterschiedlich sind. Für feinmechanische Meßgeräte bedeuten unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten u.a. Vergrößerung bzw. Verkleinerung von Lagerspiel, wodurch die Meßgenauigkeit reduziert wird und im ungünstigsten Fall das Gerät ausfällt.

Hohe Temperaturen beschleunigen chemische Prozesse. Eine Reihe von chemischen Vorgängen läuft nur in einem relativ schmalen Temperaturbereich kontrollierbar ab. Hierzu zählen z.B. photochemische Reaktionen. Bei höheren Temperaturen wird das im Filmmaterial, das in photographisch aufzeichnenden Bohrlochmeßgeräten zum Einsatz kommt, enthaltene Silberbromid auch ohne Lichteinwirkung zu Silber reduziert. Der Film wird dadurch unbrauchbar.

Die wesentliche physikalische temperaturabhängige Eigenschaft von Stoffen ist der Aggregatzustand. Die meisten in Bohrlochmeßgeräten verwendeten Materialien sind nicht von ungewollten Aggregatzustandsänderungen bedroht. Das Verdampfen von Flüssigkeiten, wie z. B. Dielektrika in Batterien und Elektrolytkondensatoren, kann jedoch fatale Folgen für das Meßgerät haben.

Die komplexen Meßverfahren machen den Einsatz elektronischer Baugruppen in Bohrlochmeßgeräten erforderlich. Höhere Temperaturen beeinflussen die elektrischen Eigenschaften elektronischer Bauteile sehr stark und können zu deren Zerstörung führen. Um die Einsatzfähigkeit elektronischer Baugruppen bei erhöhten Temperaturen sicherzustellen, werden meist Bauteile verwendet, deren Temperaturfestigkeit über den Werten der US-amerikanischen MIL-Spezifikationen liegt. In diesem Normenwerk sind Anforderungsprofile für Bauteile und Geräte festgelegt, die im militärischen Bereich zum Einsatz kommen.

2.1 Bohrlochvermessung

Die Meßverfahren zur Bestimmung des Bohrlochverlaufes nehmen innerhalb der Bohr- und besonders in der Richtbohrtechnik eine wichtige Stellung ein. Für viele geologische und lagerstättentechnische Entscheidungen ist die Kenntnis des exakten Bohrlochverlaufes von großer Bedeutung. Im direkten Bohrbetrieb ist das Wissen um den genauen Bohrlochverlauf für die Minimierung des Casingverschleißes durch kleine Doglegs oder auch die Bekämpfung eines Blow-outs durch eine Entlastungsbohrung von Wichtigkeit.

Der Verlauf einer Bohrung wird durch die Messung der Neigung und der Richtung (Azimut) des Bohrloches in verschiedenen Teufen kontrolliert. Je mehr Daten aufgenommen werden können, desto genauer läßt sich der Bohrlochverlauf bestimmen.

Als Meßinstrumente stehen sowohl mechanisch als auch elektronisch arbeitende Geräte zur Verfügung.

Die heute verfügbaren Meßsysteme sind hinsichtlich ihrer Temperatur- und Druckfestigkeiten auf den Einsatz bis zu ca. 125°C und 1500 bar begrenzt. Die Einsatzfähigkeit dieser Systeme kann durch die Verwendung von Hitzeschildern und Druckgehäusen gesteigert werden. Konstruktionsbedingt können Hitzeschilder die Wärme nur für eine begrenzte Zeit vom Meßsystem fernhalten. Der aktuelle Stand der Technik repräsentiert Hitzeschilder, die für einen Zeitraum von fünf Stunden Temperaturen von 270°C vom Meßsystem fernhalten. Der Durchmesser dieser Hitzeschilder liegt bei ca. 2 1/8". Bei Hitzeschilddurchmessern von 3" können die Meßsysteme bis zu 6 Stunden bei Außentemperaturen von ca. 315°C eingesetzt werden. Allerdings ist die Druckfestigkeit von Hitzeschildern mit einem Durchmesser von 3" kleiner als die der 2 1/8" Hitzeschilder. Druckgehäuse sind für Drücke bis zu 2000 bar lieferbar, auch in Verbindung mit Hitzeschildern mit 2 1/8" Durchmesser.

2.2 Bohrlochnavigation

Die Bohrlochnavigation dient nicht der nachträglichen Vermessung einer Bohrung, sondern der laufenden Kontrolle der Bohrung hinsichtlich Neigung und Richtung während des Bohrens. Die möglichst nahe am Meißel erfaßten Daten werden on-line nach Übertage übertragen, sofort ausgewertet und angezeigt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, umgehend die Stellung des Neigungsüberganges zu korrigieren und dadurch Richtbohrungen plangerecht abzuteufen. Prinzipiell lassen sich zwei unterschiedliche Systeme zur Bohrlochnavigation anhand der Art der Datenübertragung unterscheiden. Zum einen werden die Daten über ein Kabel nach Übertage übertragen, zum anderen wird die Spülungssäule zur Datenübertragung herangezogen.

Systeme, die die Informationsübertragung durch Kabel vornehmen, können nur beim Bohren mit Vorortantrieben unter Verwendung eines Hilfsspülkopfes, durch den das Kabel geführt wird, eingesetzt werden.

Vorteile kabelgebundener Systeme (Steering-Tools) sind die hohe Datenübertragungsrate, die Realisierung eines Kommunikationssystemes und die Spannungsversorgung des untertägigen Systems per Wireline. Dadurch sind die Systeme vergleichsweise einfach im Aufbau, kostengünstig und zuverlässig. Der Hauptnachteil dieser Systeme ist im relativ großen Zeitbedarf für das Ziehen und Einfahren des Tools vor Roundtrips zu sehen sowie beim Nachsetzen, sofern kein Side-Entry-Sub verwendet wird.

Da Bohrlochnavigationssysteme während des Bohrens eingesetzt werden, werden sie ständig durch den Spülstrom gekühlt. Hochtemperaturlösungen mit Hitzeschild sind daher kaum verfügbar. In der Regel sind MWD-Systeme und Steering-Tools für Umgebungstemperaturen bis zu 140°C ausgelegt. Einige Steering-Tools sind jedoch auch bei höheren Temperaturen bis zu 200°C einsetzbar.

2.3 Festpunktbestimmung und Casingverschleißmessung

Beim Abteufen von Bohrungen kann es unter bestimmten Bedingungen dazu kommen, daß der Bohrstrang im Bohrloch fest wird. Es wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, einen festgewordenen Bohrstrang wieder zu lösen.

Bei vielen dieser Verfahren ist die Kenntnis des Festpunktes, des Punktes oberhalb dessen der Bohrstrang im Bohrloch frei beweglich ist, von großer Wichtigkeit.

Zur Festpunktbestimmung werden Meßgeräte eingesetzt, die auf den Strang wirkende Zug- und Torsionsbelastungen erfassen, die von Über-tage eingeleitet werden. Ein mehrfacher Zugversuch, bei dem die Dehnung des Stranges am Drehtisch gemessen wird, ist für eine genaue Festpunktbestimmung nicht ausreichend. Die Freipunktsonden werden am Kabel in den Bohrstrang eingefahren und nehmen die Meßwerte in einer bestimmten Teufe auf. Die Meßwertübertragung erfolgt über das Kabel, so daß die Auswertung umgehend erfolgen kann. Prinzipiell lassen sich zwei Meß-Systeme zur Freipunktbestimmung unterscheiden. Mechanisch arbeitende Geräte erfordern eine feste Verbindung zwischen Bohrstrang und Meßgerät, auf magnetischer Basis arbeitende Geräte messen berührungslos.

Die derzeit angebotenen mechanisch arbeitenden Geräte zur Freipunktbestimmung sind nicht für den Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen ausgelegt. Die Spezifikationen der Geräte liegen bei 175°C hinsichtlich der Temperatur und bei max. 1370 bar hinsichtlich des Druckes.

Substantielle Weiterentwicklungen werfen Probleme im Zusammenspiel der mechanischen Teile und bei den Dichtungselementen auf.

Zur Zeit ist lediglich ein magnetisch messendes Gerät zur Freipunktbestimmung am Markt verfügbar. Erfahrungen mit diesem Gerät werden in den USA gesammelt. Einsätze in Europa sind nicht bekannt. Spezifikationen des Gerätes hinsichtlich Druck- und Temperaturfestigkeit sind nicht verfügbar.

Durch Defekte an Futterrohren können sehr kostenintensive Schäden entstehen. Schlimmstensfalls kann ein Casingdefekt zur Aufgabe der Bohrung führen. Der Messung des Casingverschleißes kommt daher, insbesondere bei langen Bohrzeiten während des Erbohrens größerer Teufen, eine große Bedeutung zu.

Der Verschleiß des Casings wird durch Casing-Caliper-Geräte gemessen. Die Futterrohrtour wird durch mechanische Fühlerarme abgetastet. In den Geräten werden 15 bis 80 Fühlerarme verwendet. Je größer die Anzahl der Fühler ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, auch kleinere Casinganomalien zu erfassen.

Die zur Zeit verfügbaren Casing Caliper Geräte werden in verschiedenen Versionen zur Messung von Durchmessern von 2 3/8" bis 20" angeboten. Sowohl die mechanisch als auch die elektronischen Eigenschaften begrenzen die Einsatzmöglichkeiten der Geräte auf 175°C und 1200 bar.

2.4 Sprengstoffe

In der Tiefbohrtechnik werden Sprengstoffe u.a. zur Beseitigung von Havarien verwendet. Der hierfür zum Einsatz kommende Sprengstoff wird in Form von Sprengschnüren geliefert. Die Zündung des Sprengstoffes erfolgt elektrisch über einen Sprengzünder.

Die Zuverlässigkeit des Komplexes Sprengzünder/Sprengschnur hängt neben der Dichtigkeit des Sprengzündergehäuses und der Verbindung zur Sprengschnur von der Streustromsicherheit und der Temperaturstabilität ab.

Ursachen für das Versagen von Sprengstoffen sind das Erreichen der Verpuffungstemperatur und das Erreichen der Schmelztemperatur. Bei der Verpuffungstemperatur zündet der Sprengstoff selbständig und verpufft ohne zu detonieren. Beim Erreichen der Schmelztemperatur geht der Sprengstoff in den flüssigen Aggregatzustand über, wodurch er für die Verwendung in Sprengschnüren ungeeignet wird.

Die Temperaturfestigkeit der Sprengstoffe ist zeitabhängig. In der Tiefbohrtechnik eingesetzte Sprengstoffe können für zwei Stunden Temperaturen von max. 275°C bzw. für zehn Stunden Temperaturen von max 250°C widerstehen. Die Druckfestigkeit liegt bei ca. 1400 bar. Die in den USA für den Einsatz in Geothermalbohrungen entwickelten Spezialsprengstoffe können bei Temperaturen bis zu 290°C eingesetzt werden.

2.5 Kabel

Bohrlochmeßkabel haben folgende Aufgaben:

- Tragen des Meßgerätes
- Datenübertragung nach Übertage
- Spannungsversorgung des Meßgerätes

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, muß das Kabel eine Reihe von Anforderungen erfüllen.

Um das Eigengewicht und das Gewicht des Meßgerätes sicher tragen zu können, muß die Reißfestigkeit sehr hoch sein. Durch das Ein- und Ausfahren des Meßgerätes ist das Kabel insbesondere bei stark geneigten Bohrlochsabschnitten stark verschleißgefährdet.

Die Anforderungen hinsichtlich Reißfestigkeit und Verschleißfestigkeit können durch eine geeignete Stahlarmierung erfüllt werden.

Die Forderungen nach einer hohen Druck- und Temperaturfestigkeit sind vor allem für die Isolationsmaterialien relevant. Kabel mit einer Isolierung aus Polypropylen sind lediglich bis zu Temperaturen von 150°C einsatzfähig. Temperaturbeständiger sind Kabel, die fluorhaltige Kunststoffe als Isolationsmaterial verwenden. Die elektrischen Eigenschaften dieser Kunststoffe und ihre Beständigkeit gegen Chemikalien sind sehr gut. So lassen sich z.B. Kabel mit einer Isolierung auf der Basis von Fluorethylenpropylen bei Temperaturen bis zu 260°C einsetzen.

Die elektrischen Anforderungen hinsichtlich eines geringen Widerstandes und einer hohen Durchschlagspannung sind durch genügend große Leiterquerschnitte und die Auswahl des Isolationsmaterials und dessen Stärke zu beherrschen. Allerdings ist der Kabeldurchmesser herkömmlicher Bohrlochmeßkabel durch die Forderung nach engen Biegeradien begrenzt. Er liegt zur Zeit bei 15/32" (12 mm).

Prinzipiell ist die Länge von Kabeln herstellungstechnisch nicht begrenzt. In der Praxis werden Bohrlochmeßkabel jedoch nur bis zu Längen von 10.000 m gefertigt. Zum einen bestand bislang keine Nachfrage für Kabel größerer Länge, zum anderen kann das hohe Gewicht, 10.000 m 15/32" Mehraderkabel können 5.100 kg wiegen, eine Einschränkung des Einsatzbereiches des Wireline-Fahrzeuges bedeuten.

Die Reißlängen von Bohrlochmeßkabeln liegen zwischen 18.000 m und 20.000 m bei einer Dichte der Spülung von 1g/cm³. Werkzeuggewichte von 300 kg entsprechen Kabellängenäquivalenten zwischen 800 m und 4000 m, so daß für extrem tiefe Bohrungen der Kabelauswahl besondere Beachtung geschenkt werden muß.

3 RICHTBOHRTECHNIK UND CASINGVERSCHLEISS

Der Casing wird je nach Aufgabenstellung gegen Außendruck, Innendruck und Abstreifen ausgelegt. Die Wandstärkendimensionierung und die Auswahl der Stahlqualität erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland entsprechend der Richtlinien zur Rohrauslegung des WEG. In diesen Richtlinien sind seit 1983 ergänzende Empfehlungen zur Berücksichtigung des Casingverschleißes enthalten. Bei Futterrohren besteht im Gegensatz zum Bohrgestänge nicht die Möglichkeit des Ausbaus und der über-tägigen Kontrolle.

Verschleiß an Futterrohren wird durch die Reibung des Bohrgestänges am Casing verursacht. Reibung zwischen den Verschleißpartnern tritt sowohl bei der Rotation als auch beim Ein- und Ausbau des Gestänges auf. Untersuchungen haben ergeben, daß der Futterrohrverschleiß überwiegend durch Rotation des Bohrstranges verursacht wird. Der Ge-stängeein- bzw. -ausbau bewirkt einen um den Faktor 100 geringeren Verschleiß. Der Verschleiß, der durch den Einbau bzw. das Ziehen von Werkzeugen am Bohrlochmeßkabel verursacht wird, ist unerheblich und daher zu vernachlässigen.

Ein entscheidender Faktor für den Futterrohrverschleiß ist die Bohr-lochgeometrie. Doglegs sind bevorzugte Anlagepunkte zwischen Bohrge-stänge und Futterrohr. Durch die Vermeidung von Doglegs durch geeig-nete richtbohrtechnische Maßnahmen und den Einsatz von Meißeldirektan-trieben kann der Casingverschleiß gering gehalten werden.

3.1 Vermeidung des Casingverschleißes durch Meißeldirektantriebe

Da der Casingverschleiß hauptsächlich durch die Rotation des Bohr-stranges verursacht wird, liegt es nahe, das zum Bohren erforderliche Drehmoment nicht Übertage am Drehtisch, sondern Untertage direkt oberhalb des Meißels durch einen Meißeldirektantrieb einzuleiten. In der Erdölindustrie haben sich Bohrturbinen und Moineaumotoren als wirtschaftlich sinnvoll einsetzbare Meißeldirektantriebe durchge-setzt.

Moineaumotoren arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und halten bei konstantem Volumenstrom eine nahezu feste Drehzahl ein. Leistung und Drehmoment werden durch den technisch möglichen Druckabbau be-stimmt. Da der Druckabbau dem abgeforderten Drehmoment proportional ist, muß die Energiezufuhr durch die Spülungsflüssigkeit dem tat-sächlichen Bedarf angepaßt werden. Die günstige Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik und die Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen sind die wesentlichen Gründe für den häufigen Einsatz von Moineau-motoren in der Richtbohrtechnik. Die Ausführung des Stators aus Elastomeren ist zur Abdichtung gegen den Rotor nötig. Die Begrenzung der Temperaturfestigkeit der Elastomere auf ca. 140°C ist als Haupt-nachteil von Moineaumotoren anzusehen.

Bohrturbinen sind hydrodynamische Antriebe. Die Bewegungsenergie der strömenden Flüssigkeit wird in mechanische Arbeit umgesetzt. Bei konstantem Volumenstrom stellt sich die Drehzahl abhängig vom geforderten Drehmoment ein. Druck und die damit zugeführte Leistung sind unabhängig von der tatsächlich benötigten Leistung und nahezu konstant. Die Konstruktion der Turbinen aus fast ausschließlich metallischen Werkstoffen ermöglicht den Einsatz auch unter hohen Temperaturen. Positive Erfahrungen hinsichtlich der Temperaturfestigkeit konnten beim Abteufen von Geothermalbohrungen in den USA gesammelt werden. Von entscheidendem Einfluß auf die Lebensdauer einer Turbine ist die Temperaturbeständigkeit der Lager und Dichtungen. Bohrturbinen erreichen in der Regel Drehzahlen, für die konventionelle 3-Rollen-Meißel nicht ausgelegt sind. Zur Drehzahlreduzierung kommen Planetengetriebe zum Einsatz, die in den Turbinenkörper integriert sind.

3.2 Minimierung des Casingverschleißes durch das Abteufen einer vertikalen Bohrung

Verschiedene Modellrechnungen haben gezeigt, daß bei den auftretenden sehr hohen Hakenlasten beim Abteufen einer Bohrung von 14.000 m der Doglegminimierung zur Vorsorge gegen extremen Casingverschleiß eine Schlüsselrolle zukommt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß auch durch das Auftreten vieler sehr kleiner Doglegs die Hakenlast beim Ziehen des Bohrstranges stark zunimmt. Das Bohrloch sollte daher, insbesondere im oberen Bereich, möglichst vertikal abgeteuft werden.

Das Abteufen eines exakt vertikalen Bohrloches stellt richtbohrtechnisch eine der schwierigsten Aufgaben dar. Für die Neigungskontrolle von Richtbohrungen werden vorwiegend unterschiedliche Anordnungen von Stabilisatoren eingesetzt. Die Stabilisatoren sind Werkzeuge, die dem Bohrstrang nahe am Meißel eine Führung geben und es ermöglichen, den Verlauf der Bohrlochachse während des Bohrvorganges zu beeinflussen. Die Positionierung der Stabilisatoren ist neben Bohrparametern wie

- Bohrlochdurchmesser
- Schwerstangendurchmesser
- Meißelbelastung
- Bohrlochneigung
- Stabilisatordurchmesser
- Spülgewicht

auch von den gesteinspezifischen Größen

- Schichteinfallen
- Härte der Formation

abhängig.

Soll mit einer Stabilisatorgarnitur eine konstante Bohrlochneigung beibehalten oder ein Neigungswinkel kontrolliert auf- bzw. abgebaut werden, müssen die wichtigsten Parameter, die einen Einfluß auf die Neigungskontrolle haben, bekannt sein. Durch das richtige Ausnutzen des Pendelverhaltens der Garnitur und der Kräfteverhältnisse am Meißel kann der Neigungsauf- bzw. -abbau kontrolliert verändert werden.

Die Bohrstranggarnitur hat oberhalb des Pendelpunktes, das ist der Punkt, an dem die Schwerstangen Kontakt mit der Bohrlochwand haben, praktisch keinen Einfluß mehr auf die Neigungskontrolle. Zur Beurteilung einer bestimmten Stabilisatoranordnung ist daher lediglich der Bohrstrangabschnitt vom Meißel bis zum Pendelpunkt zu betrachten.

In Richtung der Bohrlochachse wirkt die Meißellast, senkrecht dazu eine Seitenkraft, die das Gebirge auf den Meißel ausübt und die den Meißel zu einem Abweichen von der Bohrlochachse zwingt. Diese Seitenkraft bzw. der resultierende Kraftwinkel, der sich zwischen der Resultierenden der Kräfte und der Bohrlochachse einstellt, läßt sich durch Variation der Stabilisatorabstände und des Pendelpunktes beeinflussen. Eine positive Seitenkraft führt zu einem Neigungsaufbau, eine negative zu einem Abbau des Neigungswinkel. Zum Halten eines konstanten Neigungswinkels muß der resultierende Kraftwinkel möglichst klein sein, d.h. die Seitenkraft muß im Verhältnis zur Meißelbelastung klein werden.

Zum Neigungsabbau kommen in der Richtbohrtechnik Garnituren zum Einsatz, die den Meißel mit Seitenkräften in vertikaler Richtung beaufschlagen. In der Regel entfällt bei diesen Garnituren der Meißelstabilisator und es kommen lediglich ein bis zwei Strangstabilisatoren zum Einsatz. Problematisch wird der Einsatz von Pendelgarnituren bei geringen Neigungswinkeln des Bohrloches. Da der resultierende Kraftwinkel und mit ihm die wirksame Seitenkraft mit abnehmender Neigung kleiner wird und schließlich gegen Null geht, ist das Erreichen einer Neigung von 0° mit einer Pendelgarnitur theoretisch nicht möglich.

Ein Nachteil, den Pendelgarnituren aufweisen, ist das Fehlen des Bitstabilisators. Das Fehlen dieses Stabilisators bewirkt, daß die Meißelachse nicht mit der Bohrlochachse übereinstimmt. Der auftretende Winkel, der Kippwinkel, läßt den Meißel auf der Bohrlochsohle taumeln. Dadurch werden die Bohrgeschwindigkeit und die Meißellebensdauer reduziert sowie ein übermäßiges Loch gebohrt. Besonders beim Bohren mit Diamantwerkzeugen hat der Kippwinkel einen großen Einfluß auf die Lebensdauer des Meißels. Bei großem Kippwinkel ist eine gleichmäßige Spülungsverteilung auf die Schneidflächen nicht mehr gewährleistet, der größte Teil der Flüssigkeit geht auf der angehobenen Meißelseite ungenutzt verloren. Als Folge der mangelnden Kühlung treten an den Diamanten Verbrennungen auf, die die Standzeit des Meißels verringern.

Die hohen Anforderungen an die Vertikalität von Schachtvorbohrungen führten zu der Entwicklung eines Stabilisators, der während des Bohrens formschlüssig an der Bohrlochwand anliegt. Herkömmliche Stabilisatoren haben einen geringfügig kleineren Durchmesser als der Bohrmeißel, um einerseits hang-ups der Stabilisatoren zu vermeiden und andererseits das Festwerden der Stabilisatoren zu verhindern, wenn die Bohrstrecke aufgrund von Kaliberabnahme des Meißels einen etwas geringeren Durchmesser aufweist. Dieser im Vergleich zum Meißel kleinere Durchmesser des Stabilisators wirkt sich negativ auf die Stabilisation aus, da der Strang nicht exakt in der Bohrlochachse zentriert werden kann.

Diesen Nachteil weist der speziell für exakt vertikale Schachtvorbohrungen entwickelte Spring-Loaded Stabilisator nicht auf. Sechs durch Federkraft ausfahrbare Rippen stützen den Stabilisator radial an der Bohrlochwand ab und zentrieren die Strangachse in der Bohrlochachse. Zur Reibungsminderung ist das Gerät konstruktiv als nichtrotierender Stabilisator ausgeführt. Die das Drehmoment übertragende Hohlwelle ist durch ölgeschmierte Wälzlager gelagert.

Diese Stabilisatoren wurden bei Schachtvorbohrungen im Goldbergbau über Strecken bis zu 2000 m erfolgreich eingesetzt. Verschleiß an den Stabilisatorrippen konnte praktisch nicht festgestellt werden.

3.3 Sonstige Möglichkeiten zur Reduzierung des Casingverschleißes

Neben den o.g. Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Minimierung des Casingverschleißes kommen als weitere verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verschleißminderung in Betracht:

- Verbesserung der "Schmierfähigkeit" der Spülung durch spezielle Zuschlagstoffe
- Verwendung von ölbasischen Spülungen
- Einsatz von Protektoren
- Spezielle Panzerung der Gestängeverbinder
- Einsatz von Aluminiumbohrgestänge

Der Zusatz von reibungsmindernden Additiven zur Spülung verringert nachweislich den Casingverschleiß. Bei nicht allzu hohen Spüldichten bis etwa 1,4 kg/l hat Schwerspat eine gute verschleißmindernde Wirkung. Da Baryt ohnehin als Beschwerungsmittel verwendet und in großen Mengen bezogen wird, stellt es eine relativ preiswerte Möglichkeit zur Verminderung des Futterrohrverschleißes dar.

Ölbasische Spülungen bewirken zwar gegenüber wasserbasischen Spülungen einen deutlich geringeren Futterrohrverschleiß, ihr Einsatz empfiehlt sich in der Regel jedoch nicht. Die Ursachen sind in den hohen Kosten, dem problematischen Handling und in Umweltschutzgründen zu sehen.

Der Einsatz von Protektoren ist ein wirksames und oft angewendetes Verfahren zur Reduzierung des Verschleißes von Futterrohren und Gestänge. Die Protektoren sind leicht zu kontrollieren und im Falle eines Defektes leicht auszuwechseln. Die optimale Platzierung von Protektoren ist ein viel diskutiertes Problem. Für die Bestimmung der Befestigungspunkte bieten die Protektorhersteller die Benutzung von Rechenprogrammen als Service an. Ein Hauptgesichtspunkt bei der Platzierung von Protektoren auf dem Bohrstrang ist die Bohrlochneigung. Werden je Stange zwei Protektoren gefahren, liegt das Bohrgestänge theoretisch auch bei Doglegs von $1,2^\circ/10\text{ m}$ nicht an den Futterrohren an. Die ständige Kontrolle und der unverzügliche Austausch verschlissener Protektoren sind eine unabdingbare Voraussetzung für diese Art des Verschleißschutzes.

Der Einfluß der Panzerung der Gestängeverbinder auf den Verschleiß der Futterrohre ist erheblich. Für die Verbinderpanzerung kommt eine Reihe von Metallegierungen in Betracht. In der Regel handelt es sich dabei um Hartmetalle. Die Mehrzahl der Legierungen gehört zur Gruppe der für ihre Härte und Verschleißfestigkeit bekannten Wolframkarbide. Es werden Wolframkarbide unterschieden, die unterschiedliche Verschleißbeträge an Futterrohren hervorrufen.

Gesintertes und anschließend zerkleinertes Wolframkarbid bewirkt extrem hohen Verschleiß an Futterrohren. Es ist daher nicht als Material für die Verbinderpanzerung geeignet. Bessere Eigenschaften bezüglich des Verschleißes zeigt gegossenes und anschließend zerkleinertes Wolframkarbid. Gesintertes und anschließend pelletiertes Wolframkarbid ist besonders als Hartmetall für Zweischichtpanzerungen geeignet.

Neben dem Herstellungsverfahren haben auch die Korngröße des Hartmetalls und die nachträgliche Oberflächenbehandlung der Gestängeverbinder einen großen Einfluß auf den Casingverschleiß. Feinkörnige Materialien rufen deutlich geringeren Verschleiß hervor als grobkörnige. Abgedrehte Verbinderpanzerungen verursachen weniger Verschleiß.

Der Einfluß des Spülungstyps auf den Casingverschleiß ist ebenfalls erheblich. Bei wasserbasischen Spülungen liegt der Reibbeiwert deutlich über dem, der bei ölbasischen Spülungen zu beobachten ist. Allerdings beeinflussen der Feststoffgehalt und die Art der Feststoffe in der Spülung sowie der Bohrkleinanteil das Verschleißverhalten. Schwerspat bildet einen Schutzfilm zwischen den Verschleißpartnern und bewirkt eine gute Reibungsminderung. Eisenoxid zeigt hingegen keine reibungsmindernde Wirkung.

Der Einfluß des Bohrkleins auf den Futterrohrverschleiß ist unterschiedlich und hängt von der durchteuften Formation ab. Im allgemeinen wird das Bohrklein jedoch eher eine Erhöhung des Verschleißes hervorrufen.

Aluminiumbohrgestänge ist sehr viel leichter als konventionelles Bohrgestänge aus Stahl. Beim Einsatz von Aluminiumbohrgestänge sind daher die Andruckkräfte zwischen Casing und Gestänge kleiner. Dieses macht sich insbesondere in stark geneigten Bohrungen durch einen geringeren Casingverschleiß bemerkbar. Bei hohem pH-Wert der Spülung ist das Aluminiumgestänge starker Korrosion ausgesetzt. Ein hoher pH-Wert ist jedoch besonders bei Sauerogasbohrungen aus sicherheitstechnischen Gründen notwendig.

4. ERWEITERUNG DER EINSATZBEREICHE

Die derzeit verfügbaren Systeme zur Erstellung richtungsstabiler Bohrungen, zur Richtungskontrolle, zur Beseitigung von Havarien und zur Bestimmung des Casingverschleißes sind zumeist hinsichtlich ihrer Druck- und Temperaturfestigkeit derart begrenzt, daß ein Einsatz bei Drücken über 1750 bar und Temperaturen über 300°C für einen längeren Zeitraum ausgeschlossen werden muß. Für das Abteufen von übertiefen und heißen Bohrungen sind die Einsatzbereiche zu erweitern, so daß auch extreme Bohrlochbedingungen sicher beherrscht werden können.

Neben der Erhöhung der kritischen Parameter Druck und Temperatur muß ein Augenmerk auf die Erhöhung der Richtungsstabilität für das zielgenaue Teufen gelegt werden.

4.1. Bohrtechnik für vertikale Bohrungen

Der Aufwand für das Erreichen eines festgelegten Zielpunktes einer Bohrung ist sehr hoch. Häufige Roundtrips zur Umstellung der Garnitur sind, insbesondere in tiefen Bohrungen, zeit- und kostenintensiv. Der Minimierung der Roundtripzeiten durch den Einsatz spezieller Richtbohrwerkzeuge kommt daher eine große Bedeutung zu.

4.1.1. Steuerbare Untertageantriebe

Konventionelle Bohrgarnituren zwingen den Meißel in der Regel nicht zum Bohren in die gewünschte Richtung. Richtungsänderungen durch die Hinzunahme eines Meißeldirektantriebes mit Bent-Sub, der einorientiert werden muß, erfordern zusätzliche Roundtrips. Möglichkeiten, diese Roundtrips einzusparen, sind im Einsatz steuerbarer Untertageantriebe zu sehen.

Steuerbare Untertageantriebe ähneln zwar prinzipiell den Garnituren mit Meißeldirektantrieb und Bent-Sub, eignen sich jedoch auch zum Bohren gradliniger Bohrlochsabschnitte. Für diese Abschnitte wird zusätzlich der Bohrstrang gedreht, für die gekrümmten Sektionen wird ausschließlich der Meißeldirektantrieb eingesetzt.

Die für die Richtungsänderung erforderliche Auslenkung der Meißelachse aus der Bohrlochachse kann durch folgende zwei Verfahren, die auf dem gleichen Grundprinzip beruhen, erreicht werden:

- Exzentrische Stabilisation im Bereich des Meißels
- Herstellen eines Knickwinkels zwischen Meißel und Meißeldirektantrieb

4.1.2 Steuerbarer Stabilisator

Basierend auf dem Spring-Loaded Stabilisator wird im Hause Preussag im Rahmen eines F + E Projektes ein von Übertage steuerbarer Stabilisator entwickelt.

Dieser Stabilisator wird durch seine Form bzw. durch die variablen Querschnitte die richtbohrtechnische Charakteristik von Bohrgarnituren ändern können. Dadurch wird es möglich sein, Bohrungen mit lediglich einer einzigen Garnitur mit exakt dem gewünschten Bohrlochverlauf abzuteufen.

Der Querschnitt des Stabilisators wird durch die Stellung der Stabilisatorrippen beeinflusst. Sie werden hydraulisch bzw. elektro-hydraulisch um das erforderliche Maß aus- oder eingefahren. Die erforderliche Energie wird durch den Spülstrom erzeugt. Zur Datenübertragung zwischen steuerbarem Stabilisator und den Übertagekomponenten kommt ein Zweiwegekommunikationssystem zum Einsatz, das elektromagnetische Wellen als Übertragungsmedium nutzt.

4.1.3 Zielbohrstange

Die Zielbohrstange ist ein selbsttätig steuerndes Zielbohrwerkzeug, das für den Einsatz im Bergbau konzipiert wurde. Dieses von der Bergbauforschung GmbH und der Schwing Hydraulik Elektronik GmbH+ Co. entwickelte System besteht im wesentlichen aus einer inneren Welle, die mit dem Bohrgestänge und dem Meißel verbunden wird, um einem äußeren im Idealfall nicht rotierenden Teil mit vier beweglichen Steuerleisten. Im äußeren Teil befinden sich die Elektronik und die Hydraulik zur Bewegung der Steuerleisten. Die erforderliche Energie wird durch einen Generator, der Bestandteil der Zielbohrstange ist, erzeugt.

Neigungsmesser überwachen kontinuierlich die Stellung der Zielbohrstange bezüglich der Lotrechten. Treten Abweichungen auf, wird die Stellung der Steuerleisten umgehend korrigiert. Die Überwachung des Systems erfolgt durch ein Spülungsdruckpulssystem von Übertage.

Die Zielbohrstange wird ausschließlich im Bergbau zum Erstellen von Zielbohrungen mit 8 1/2" Durchmesser eingesetzt. Ein Einsatz für Tiefbohrungen bedingt Verbesserungen im Bereich der Wellendichtungen, um auch feststoffreicher Spülung unter hohem Druck widerstehen zu können und die Überprüfung der Temperaturstabilität. Die Anwendung der Zielbohrstange in heißen Bohrungen macht die Auslagerung des Elektronikteils in ein durch Hitzeschutzmaßnahmen versehenes Gehäuse erforderlich.

4.1.4 Quadratische Schwerstangen

Der Einsatz von quadratischen Schwerstangen führt zu sehr biegesteifen Garnituren, die als Haltegarnituren verwendet werden können.

Quadratische Schwerstangen haben in ihrer Diagonalen nur ein geringes Untermaß gegenüber dem Meißel. Sie wirken deshalb wie ein langer Stabilisator. Durch ihren Einsatz werden Doglegs minimiert. Dem hohen Verschleiß an den Kanten wird durch Hartmetallbesatz entgegengewirkt. Von Nachteil ist die Gefahr des Festwerdens im Bereich quadratischer Schwerstangen.

4.2 Erhöhung der Druckfestigkeit

Die Auslegung der Druckgehäuse für Messungen im offenen Bohrloch für die vorkommenden Drücke bis ca. 2 kbar stellt keine allzu hohen Anforderungen an die Konstruktion. Da der gesamte Bohrlochdurchmesser für das Druckgehäuse zur Verfügung steht, kann durch Anpassung der Wandstärke an die Druckgegebenheiten eine entsprechende Festigkeit erreicht werden.

Probleme ergeben sich bei Geräten, welche innerhalb des Stranges Messungen vornehmen. Da hier der zur Verfügung stehende maximale Gerätedurchmesser eine Wandstärkeerweiterung zu einer Verringerung des Platzangebotes innerhalb des Gerätes führt, ist eine zusätzliche Versteifung durch Rippen oder innen aufgebraute Ringe erforderlich. In einem solchen Fall ist die Verwendung von hochfesten Stählen unerlässlich. Bei magnetisch wirkenden Meß-Systemen ist darauf zu achten, daß die verwendeten Stähle aus austenitischem Material bestehen.

Probleme durch die Differenz Innendruck zu Außendruck können durch verschiedene Methoden minimiert werden:

- Aufladung des Innengehäuses, der Innenraum wird durch ein Gas (z.B. Stickstoff) auf den Außendruck gebracht bzw. so weit aufgepumpt, daß der Differenzdruck den Gegebenheiten angepaßt wird.
- Füllung des Gehäuses mit Öl, das gesamte Innengehäuse wird vollständig mit einem gering kompressiblen Medium (z.B. Öl) gefüllt. Dadurch wird die Verformung des Gehäuses durch den Außendruck minimiert.
- Druckausgleich, durch eine Druckkompressionskammer wird der Innendruck dem Außendruck angepaßt.

Diese Möglichkeiten verhindern auch ein Eindringen von Spülung in das Meß-System an Stellen wie dem Kabelkopfübergang oder dem Austritt von Meßfühlern beim Casing-Caliper-Meß-System.

Neben der Verwendung von metallischen Dichtflächen ermöglicht die Konstruktion von Labyrinthdichtungen ein Absenken des Druckes an der Dichtfläche selbst.

4.3 Erhöhung der Temperaturfestigkeit

Aus den Grundgesetzen der Physik geht hervor, daß zwischen zwei sich berührenden Stoffen unterschiedlicher Temperatur ein Wärmeaustausch stattfindet. Dieser Energieaustausch ist auf Dauer nicht zu verhindern. Er sorgt dafür, daß zwischen beiden Stoffen ein Temperatúrausgleich erfolgt.

Der Vorgang des Wärmetransportes kann durch geeignete Maßnahmen nur verlangsamt, jedoch nicht verhindert werden.

Für Geräte, welche in der Bohrtechnik eingesetzt werden, ergibt sich daraus die Forderung, daß auch für abgeschirmte Bauteile innerhalb eines Gerätes eine möglichst hohe Temperaturfestigkeit erforderlich ist, sofern die Geräte über längere Zeit in einer heißen Umgebung arbeiten sollen.

4.3.1 Reduzierung der Wärmeeinwirkung

Das Wärmepotential des Gesteinskörpers kann mit technisch vertretbarem Aufwand nicht wesentlich abgebaut werden. Ein Schutz empfindlicher Meßgeräte kann durch die gezielte Speicherung eindringender Wärme und die Wärmeabfuhr von gefährdeten Baugruppen in unkritische Bereiche erfolgen.

4.3.1.1 Passive Kühlung durch Hitzeschilde und Wärmespeicher

Die z.Zt. für hohe Temperaturen ausgelegten Meß-Systeme sind in der Regel mit einer Abschirmung gegen hohe Temperaturen versehen, die eine Kombination aus Hitzeschild und Wärmespeicher darstellt.

Ziel des Hitzeschildes ist es, durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit für einen möglichst geringen Wärmeaustausch zwischen der Außenhaut eines Meßsystemes und dem Innenraum zu sorgen. Das Hitzeschild besteht aus einem evakuierten Ringraum, der die zu schützenden Bauteile umgibt. Es dient dazu, Wärmekonvektion zwischen Außengehäuse und Innenraum zu minimieren. Damit die Wärmeenergie nicht in Form von Wärmestrahlung in den Innenteil gelangt, ist der Ringraum mit einer Vielzahl von reflektierend beschichteten Folien aus Tefla versehen.

Zur Aufnahme der Wärme, sowohl der von außen zugeführten als auch durch den Betrieb des Meßgerätes entstehenden, wird ein Wärmespeicher verwendet. Der Wärmespeicher ist ein mit einem Stoff hoher spezifischer Schmelzwärme gefülltes Reservoir, dessen Schmelzpunkt unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur der verwendeten Meß-Systeme liegt. Die von außen eindringende Wärmeenergie wird zu diesem Wärmespeicher geleitet und löst bei Erreichen der Schmelztemperatur dort den Schmelzvorgang aus. Ebenso kann Wärme, welche durch den Betrieb elektronischer Bauteile entsteht, zum Wärmespeicher hin abgeleitet werden.

Üblicherweise wird für diesen Wärmespeicher eine Metallegierung verwendet, welche unter dem Namen "Woodsches Metall", bestehend aus 50 % Wismut, 25 % Blei, 12,5 % Zinn, 12,5 % Kadmium und einem Schmelzpunkt von 71,7 °C, bekannt ist. Durch Variieren der prozentualen Zusammensetzung der Legierung können die physikalischen Eigenschaften den Erfordernissen angepaßt werden.

Das Woodsche Metall besitzt eine relativ hohe Dichte von 9,7 kg/l. Dadurch steigen die mechanischen Belastungen des Außengehäuses des Meßinstrumentes, besonders bei hohen Beschleunigungen, wie sie z.B. beim Bohrbetrieb auftreten. Es werden daher Anstrengungen unternommen, Ersatzmaterialien hierfür zu finden, welche die gleichen oder ähnliche Schmelzeigenschaften besitzen. Hierfür bieten sich spezielle Kohlenwasserstoffverbindungen an.

4.3.1.2 Aktive Kühlung

Die passive Kühlung mittels Hitzeschild und Wärmespeicher erweist sich bei längerer Verweilzeit im Bohrloch als nicht ausreichend. Sobald sich die Phasenumwandlung von fest in flüssig im Wärmespeicher vollzogen hat, steigt die Temperatur trotz Hitzeschild innerhalb des Gerätes auf die Außentemperatur an. Besonders für elektronische Bauteile ist eine weitere, aktive Kühlung notwendig.

Folgende aktive Kühlverfahren sind bekannt:

- thermodynamische Kreisprozesse
- thermoelektrische Kühlverfahren
- magnetokalorische Kühlverfahren
- chemische Kühlverfahren

Anwendbar im Bohrloch sind aus prinzipiellen Erwägungen die Kühlung durch Kreisprozesse sowie die thermoelektrische Kühlung. Energiebetrachtungen zeigen, daß eine Kühlung des gesamten Meßinstrumentengehäuses nur durch die Anwendung von Kreisprozessen zu erreichen ist. Der Einsatz von Peletierelementen zur Kühlung von Meßgeräten oder auch nur einzelner Bauelemente ist kaum möglich. Peletierelemente haben einen sehr geringen Wirkungsgrad von lediglich ca. 5 %. Das bedeutet, daß 95 % der dem Peletierelement zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird und 5 % der zugeführten Energie zur Kühlung zur Verfügung stehen. Da auch die Peletierelemente in das einzusetzende Hitzeschild eingebaut werden müssen, wird die Temperatur im Inneren des Hitzeschildes durch die Verwendung von Peletierelementen aufgrund des schlechten Wirkungsgrades ansteigen und nicht gesenkt. Die Verwendung von Peletierelementen ohne ein Hitzeschild verbietet sich von selbst, da sie nur bis zu Temperaturen von 250°C einsetzbar sind.

Bei der Betrachtung der zur Verfügung stehenden Energie wird unterschieden zwischen Geräten am Kabel und solchen, welche Energie Untertage durch einen Generator erzeugen.

Bei den kabelgebundenen fällt der Ohmsche Widerstand des Kabels ins Gewicht. Durch eine Erhöhung der Eingangsspannung läßt sich die Untertage zur Verfügung stehende elektrische Leistung zwar erhöhen, jedoch ist die Spannung durch die Durchschlagfestigkeit des Kabels begrenzt.

Für Meß-Systeme, welche mittels eines Spülstromgenerators die elektrische oder auch mechanische Leistung zum Betrieb von Kältemaschinen zur Verfügung stellen, besteht der Nachteil, daß sie gerade dann nicht funktionieren, wenn der kühlende Spülstrom wegfällt und die Umgebungswärme des Gebirges in besonderem Maße auf das Meß-System einwirkt. Für kurze Zeit kann hier eine Überbrückung der Energieversorgung durch Batterie- oder Akkumulatorpufferung erfolgen, jedoch reicht die dabei zur Verfügung stehende Energie zur längeren Kühlung nicht aus.

Hier gilt es, besonders beim Einsatz elektronischer Meßverfahren, Möglichkeiten der Hybridkühlung (Kombination von Kühlsystemen) zu entwickeln, welche verhindern, daß auch bei längerem Spülstromausfall ein Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur möglich ist.

Bei allen anwendbaren Kühlprozessen wird wegen der geringen Temperaturdifferenz einer Kühlstufe eine Kaskadierung notwendig. Dieses gilt besonders beim Einsatz von Peltier-Elementen.

4.3.2 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Elektronik

Beim Einsatz elektronischer Meß-Systeme Untertage ist eine hohe Umgebungstemperatur ein Faktor, der besonderer Berücksichtigung bedarf. Elektronische Bauelemente, vor allem Halbleiter, sind sehr empfindlich gegenüber hohen Temperaturen. Zu berücksichtigen ist die Verlustwärme, die die Bauteile selbst abgeben.

4.3.2.1. Selektion elektronischer Bauteile

Aktive elektronische Bauelemente wie Halbleiter und auch passive Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren etc. unterliegen Fertigungstoleranzen, welche auch die Überlebenswahrscheinlichkeit beim Überschreiten von Temperaturgrenzen beeinflußt.

Bei Halbleiterbauelementen ist die Überschreitung der sog. "Junction-Temperatur" von Bedeutung. Bei Erreichen dieser Temperatur wird das Halbleiterkristall zum Nichtleiter. Dieser Vorgang ist nicht reversibel. Er führt zur Zerstörung des Bauteiles.

Die Vermessung von übertiefen Bohrlöchern stellt eine besonders hohe Anforderung an die Höhe der Junction-Temperatur einzelner Bauelemente. Allgemein gültige Norm für die Belastbarkeit elektronischer Bauteile ist die MIL-Spezifikation, welche den Einsatzbereich abdeckt, der gewöhnlich in der Militärelektronik erreicht wird. Diese Spezifikation gibt als Temperaturgrenze eine maximale Betriebstemperatur von 125 Grad Celsius an. Für Anwendungen in der Tiefbohrtechnik reicht diese Temperaturgrenze nicht aus. Um den Aufwand an passiver und aktiver Kühlung gering zu halten, muß die Zerstörungsgrenze möglichst nahe an der Umgebungstemperatur im Bohrloch liegen.

Die Fertigung von Halbleitern läßt derzeit keine Beeinflussung der Fertigungstoleranzen in Richtung einer höheren Temperatur zu. Eine Selektion von Bauteilen für eine höhere Temperatur als 125 °C läßt sich nur durch Ausnutzung der Streubreite der Toleranzen erreichen. Die Auswahl erfolgt durch ein K.O.-Verfahren. Die Bauteile werden auf die gewünschte Temperatur, z.B. 175 °C, aufgeheizt und einige Stunden im Ofen belassen. Bauteile, die dieser Temperatur standhalten, werden zur Herstellung von Bohrlochmeßsystemen verwendet. Von eintausend Bauteilen der höchsten MIL-Gütestufe, die dieser Prozedur unterzogen werden, überleben etwa fünfzig. Die Erfahrung zeigt, daß diese Teile dann im praktischen Betrieb eine solche Temperatur auch über einen längeren Zeitraum hinweg ohne Schaden überstehen.

Dieses Verfahren ist bei teureren Bausteinen wie Mikroprozessoren sicherlich eine kostenintensive Lösung. Da jedoch zur Erforschung der Grundlagen der Erhöhung der Temperaturfestigkeit umfangreiche Untersuchungen erforderlich sind, ist dieses Verfahren derzeit das kostengünstigste.

4.3.2.2 Schaltungsauslegung

Die Eigenschaften aller in der Elektronik verwendeten Bauteile sind temperaturabhängig. Bei der Konzeption einer Schaltung für die Erfassung von Parametern Untertage ist diese Temperaturcharakteristik zu berücksichtigen.

Meßsensoren können in Brückenschaltung betrieben werden. Der Einfluß des Temperaturverlaufes, der sich dem Nutzsignal überlagert, wird durch die Brückenschaltung kompensiert. Bei der Auswahl passiver Bauelemente kann durch die Verwendung von Bauteilen mit gegenläufiger Temperaturkennlinie ein Ausgleich erzielt werden.

Bei allen Geräten der analogen Meßwertaufzeichnung und -verarbeitung erfolgt ein Einfluß der Temperatur auf die Kalibrierung des Meßgerätes. Um diese Drift zu minimieren, ist eine frühzeitige Digitalisierung der Meßwerte anzustreben. Dabei ist dann nur noch die Drift der Meßwertnehmer und der Meßverstärker bis zum Analog-Digitalwandler zu beachten. Alle digitalen Signale unterliegen zwar noch in ihrer Amplitude einem Temperatureinfluß, jedoch nicht in der zahlenmäßigen Kodierung. Durch Begrenzung der Amplitude im Meßwertempfänger kann eine Auswirkung von Amplitudenschwankungen verhindert werden.

4.3.2.3 Hybridisierung

Die Entwicklung der Elektronik in den letzten Jahren ist gekennzeichnet von der Zusammenfassung elektronischer Funktionen in einzelne integrierte Schaltkreise .

Die Integrationsdichte der Bauteile ist immer weiter erhöht worden. Der Vorteil der damit verbundenen Miniaturisierung wird durch die Anzahl der verwendeten Lötverbindungen und damit potentieller Störstellen sowie der schlechten Wärmeableitmöglichkeit wieder zunichte gemacht. Durch die Vielzahl der externen Bauteile bei der Verwendung von IC' s auf einer Leiterplatte treten innerhalb einer Schaltung Temperaturgradienten auf, die Einfluß auf die Funktionstüchtigkeit der Schaltung nehmen.

Abhilfe läßt sich durch die Zusammenfassung einer kompletten Schaltung in Hybridtechnik erreichen. Die passiven Bauteile (Widerstände) werden auf ein Substrat (Keramik) aufgedampft oder im Siebdruckverfahren gedruckt. Kondensatoren und Induktivitäten werden ohne Gehäuse auf die vorgedruckten Leiterbahnen aufgelötet. Gleiches gilt für die Halbleiterbauelemente.

Durch den Verzicht auf das Gehäuse bei diesen Bauteilen wird der Miniaturisierungsgrad der Hybridschaltung gegenüber herkömmlichen IC's weiter erhöht. Der besondere Vorteil liegt in der gleichmäßigen Ableitung der entstehenden Verlustwärme über die Keramikleiterplatte. Zum Schutz gegen sonstige Umgebungseinflüsse werden Hybridschaltungen in ein Gehäuse eingebettet. Dieses Gehäuse schirmt die Schaltung hermetisch gegenüber der Umgebung ab.

4.3.2.4 Verzicht auf elektronische Systeme

Bei der Entwicklung von Meß-Systemen für heiße und übertiefe Bohrungen müssen u.U. neue Wege beschritten werden, um die Meßparameter aufzuzeichnen. Gerade im Bereich besonders hoher Temperaturen kann ein völliger Verzicht auf die elektronische Meßwertaufnahme notwendig werden. Überlegungen in diese Richtung führen zu Meßgeräten mit mechanischen Meßwertaufnehmern, wie sie in der Anfangszeit der Bohrtechnik üblich waren. Die Verwendung von Filmaufzeichnungen ist bei derart hohen Temperaturen ebenfalls nicht mehr möglich, so daß auch die Aufzeichnung der Meßwerte Untertage mechanisch oder durch andere Mittel vorgenommen werden muß.

Der Neigungsindikator von TOTCO, der die Neigung des Bohrloches durch einen Nadelstich durch ein Papierplättchen markiert, könnte ebenso wieder in Überlegungen einbezogen werden wie die Glasflasche mit Säure, welche aus der Anfangszeit der Richtbohrtechnik stammt.

4.3.3 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Mechanik

Das Erreichen der Schmelztemperaturen ist bei Umgebungstemperaturen von 350 bis 450 °C bei der Verwendung von Stählen nicht zu erwarten. Daher ist eine geringe Abnahme der Zugfestigkeit bei der Auslegung von Druckgehäusen zwar zu berücksichtigen, wird aber nicht zum Problem.

Im Bereich der mechanischen Meß-Systeme können sich allerdings Probleme bei der Verwendung von unterschiedlichen Materialien ergeben. So treten bei gelagerten Meßinstrumenten Probleme durch unterschiedliche Längenausdehnung auf. Insbesondere bei mechanischen Kreiseln zur Bohrlochvermessung ist ein solches Verhalten kritisch. Da ein Kreisel auf die Einwirkung von äußeren Kräften mit einem Auswandern aus seiner Richtung reagiert, müssen temperaturbedingte Lagerreibungskräfte unbedingt so klein wie möglich gehalten werden. Hier gäbe es die Möglichkeit des Einsatzes von Kardanaufhängungen, welche aus Keramik hergestellt werden.

Die Längenausdehnung verschiedener Materialien spielt auch bei der Verwendung von elektro-mechanischen Sensoren eine Rolle. Accelerometer sind ein Beispiel für einen solchen Sensor. Eine dünne Glasplatte wirkt als Pendel. Auf der Platte ist eine Spule aufgebracht, mit welcher die Auslenkung des Plättchens aus seiner Ruhelage abgegriffen wird. Durch Temperatureinfluß kommt es zur Ausdehnung des Plättchens und damit zu einer Verstimmung der Kalibrierung. Ähnlich wie bei der Drift der elektronischen Bauteile kann hier Abhilfe durch eine Temperaturkalibrierung oder Kompensationsschaltung geschaffen werden. Bei Verwendung von herkömmlichen Isolationsmaterialien, insbesondere bei Kabeln zur Übertragung von Meßdaten, treten Temperaturprobleme auf. Das normalerweise verwendete Teflon ist nur bis 320 °C einsetzbar. Japanische Entwickler haben ein Mehrleiterkabel entwickelt, dessen Isolationsschicht aus Magnesium-Oxyd-Puder besteht.

In Frankreich wurde ein neuartiges Isoliermaterial für elektrische Kabel entwickelt, das besonders temperaturstabil ist. Ohne Änderung der elektrischen Eigenschaften kann der Verbundwerkstoff auf der Grundlage von Glimmer, Magnesium, einem Polymerisat sowie Aluminiumsilikaten für ca. 4 Std. einer Temperatur von 1050 °C ausgesetzt werden. Dieser patentierte Werkstoff weist weiterhin eine hohe mechanische Abriebfestigkeit und eine große chemische Beständigkeit auf.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- ALFORD, S.E. (1976): New Technique evaluates drilling mud lubricants - World Oil (7/86)
- BAKKE, S. (1986): Directional Drilling: The State Of The Art - Petroleum Review (3/86)
- BENCZ, G.; DERES, J. (1983): Heat Resistant Explosives Produced In Hungary With Possible Space Applications - Budapest (Ungarn)
- BENNETT, G.A. (1985): Upgrades in Thermal Protection for Downhole Instruments - Kailua-Kona (Hawaii/USA)
- BENNETT, G.A.; SCHERMAN, G.R. (1983): Analysis and Thermal-Design Improvements of Downhole Tools for Use in Hot-Dry Wells - Los Alamos (New Mexiko/USA)
- BEST, B. (1983): Casing Wear Caused by Tooljoint Hardfacing - San Francisco (Californien/USA)
- BOYER, B. (1983): Downhole motors help control casing wear - Petrol.-Eng. (4/83)
- BRADLEY, W.B.; FONTENOT, J.W. (1975): The Prediction and Control of Casing Wear - J. of Petrol. Technol (2/75)
- BRADLEY, W.B. (1975): Drill-Pipe Rubbers Reduce Rotating Wear at High-Contact Loads - Oil & Gas J. (20.01.1975)
- BRITTENHAM, T.L. et al (1982): Directional Drilling Equipment and Techniques for Deep, Hot Granite Wells - J. of Petrol. Technol. (7/82)
- BURGER, E.; WINKLER, K. (1980): Richtbohren - Methoden und Anwendung - Erdöl-Erdgas-Z. (4/80)
- COBURN, M.D. et al (1980): Development of AFX-511 and AFX-521 Two New Thermally Stable Explosives - Los Alamos (New Mexico/USA)
- EICKELBERG, D. et al (1982): Meßgeräte und Bohrwerkzeuge für die Richtbohrtechnik - Stand der Technik - Celle (Deutschland)
- GAYNOR, T.M. (1986): Downhole Control of Deviation with Steerable Straight Hole Turbodrills - Dallas (Texas/USA)
- GOOCH, A.E. (1977): New Tool-Joint Hard-Facing Minimizes Casing Wear - Oil & Gas J. (21.03.1977)
- HELMICK, C. et al (1982): Planning and Drilling Geothermal Extraction Hole EE-2-a Precisely Orientated and Deviated Hole in Hot Granite Rock - Los Alamos (New Mexico/USA)

HERBERT, P. (1982): Turbodrilling in the Hot-Hole Environment - J. of Petrol. Technol. (10/82)

Koczan, S.P. et al (1982): Drill-Pipe Severing Tool with High-Temperature Explosive - Los Alamos (New Mexico/USA)

KOZLOVSKY, Y.A. (1984): The World's Deepest Well - Sci. Amer. (6/84)

LUBINSKI, A. (1961): Maximum Permissible Dog-Legs in Rotary Boreholes - J. of Petrol. Technol. (2/61)

LUBINSKI, A.; WILLIAMSON, J.S. (1984): Usefulness of Steel or Rubber Drillpipe Protectors - J. of Petrol. Technol. (4/84)

MAKOHL, F. (1986): Evaluation and Differences of Directional and High-Performance Downhole Motors - Dallas (Texas/USA)

MARSHALL, G.D. (1975): Surveying and Steering while Drilling with a Mud Motor - Petrol. Eng. (7/75)

MAURER, W.C. et al (1977): New Turbodrill for Geothermal Drilling - Washington D.C. (Maryland/USA)

MAURER, W.C. (1981): Geothermal turbodrill ready for oilfield-use - Oil & Gas (09.05.1981)

MAYER, P.A. (1979): Two Additives Combine to Reduce Torque and Drag - Drill Bit (7/79)

MILLHEIM, K. (1986): Advances in Drilling Technology (1981-1986) and Where Drilling Technology is Heading - Beijing (China)

MILLHEIM, K. (1979): Behaviour of multiple-stabilizer bottom-hole-assemblies - Oil & Gas J. (01.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Controlling hole direction in very soft formations - Oil & Gas J. (15.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Control techniques for medium - soft and medium formations - Oil & Gas J. (29.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Hard-formation directional drilling calls for special care - Oil & Gas J. (12.02.1979)

MERTENS, V.; WALLUSSEK, H. (1984): Selbsttätig steuerndes Zielbohrsystem - Glückauf (13/84)

MERTENS, V.; WALLUSSEK, H. (1984): Aktiv gesteuertes Zielbohren, Entwicklungsrichtlinien und erste Erfahrungen Untertage - Nobel Hefte (2/84)

NEUDECKER, J.W.; ROWLEY, J.C. (1982): High-Temperature Directional Drilling Turbodrill - Los Alamos (New Mexico / USA)

PATTERSON, W.W. et al (1979): Capacitive Discharge Firing System for Providing Acoustic Sources in the Hot Dry Rock Geothermal Development Project - Los Alamos (New Mexico / USA)

RISCHMÜLLER, H.; NATSCHACK, R. (1984): Stand der Entwicklung moderner Perforationstechnik - Clausthal (Deutschland)

RISCHMÜLLER, W.; WINKLER, K. (1978): Erfahrungen mit neuen Geräten für die Bohrlochverlaufsüberwachung in gerichteten und nichtgerichteten Bohrungen - Erdöl-Erdgas-Z. (9/78)

SCHOENMAKERS, J.M. (1986): Prediction of Casing Wear Due to Drillstring Rotations: Field Validation of Laboratory Simulations - Dallas (Texas/USA)

TRUE, M.E.; WEINER, P.D. (1975): Optimum Means of Protecting Casing and Drillpipe Tool Joints Against Wear - J. of Petrol. Technol. (2/75)

WILLIAMSON, J.S. (1981): Casing Wear: The Effect of Contact Pressure - J. of Petrol. Technol. (12/81)

WILLIAMSON, J.S.; BOLTON, J.B. (1983): A User's Guide to Drillstring Hardfacing - Petrol. Eng. International (9/83)