

**LEHRBRIEFE FÜR DAS HOCHSCHULFERNSTUDIUM**

HERAUSGEGEBEN

VON DER ZENTRALSTELLE FÜR DAS HOCHSCHULFERNSTUDIUM DES  
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN

---

**AUFSCHLUSS UND GEWINNUNG  
FLUSSIGER UND GASFÖRMIGER  
ROHSTOFFE**

F 56/1

# **AUFSCHLUSS UND GEWINNUNG FLÜSSIGER UND GASFÖRMIGER ROHSTOFFE**

**Reihe 1: Bohrtechnik**

**Kapitel 1: Bohrlochhydraulik**

**Lehrbogen 1.1: Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im Gebirge**

**1. Auflage 1971**

**Autoren: Doz. Dr.-Ing. H.-G. N e u m a n n**  
**Dipl.-Ing. L. W o h l g e m u t h**

**Kapitel 1 umfaßt folgende Lehrbögen:**

- 1.1. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im Gebirge**
- 1.2. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im Bohrloch**
- 1.3. Bohrmeißelhydraulik**
- 1.4. Druckgleichgewicht zwischen Bohrloch und Gebirge**
- 1.5. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten bei der Zementation**
- 1.6. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im nichtzementierten Ringraum**
- 1.7. Prozeßoptimierung und -automatisierung**

**Bestell-Nr. F 57/1 · Auflage 500 · Veröffentlicht unter Ag 601/39/72 DDR**  
**Verfaßt für die Zentralstelle für das Hochschulfernstudium des Ministeriums für**  
**Hoch- und Fachschulwesen Dresden · Herausgegeben im Auftrag des Mini-**  
**steriums für Hoch- und Fachschulwesen der Deutschen Demokratischen Republik**  
**von der Zentralstelle für das Hochschulfernstudium des Ministeriums für Hoch-**  
**und Fachschulwesen**

# Kapitel 1: Bohrlochhydraulik

## Lehrbogen 1.1: Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im Gebirge

Inhaltsverzeichnis:	Seite
0. Aufgabenstellung	5
1. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im unverritzten Gebirge	7
2. Störungen im bohrlochnahen Bereich	14
2.1. Definition des bohrlochnahen Bereiches	15
2.2. Wechselwirkungen im bohrlochnahen Bereich	17
2.2.1. Petrographische Besonderheiten	18
2.2.2. Mechanische Wirkkomponenten	20
2.2.3. Hydraulische Wirkkomponenten	22
2.2.4. Physiko-chemische Einflüsse	25
2.2.5. Temperatureinflüsse	26
2.2.6. Zeitfaktor	32
3. Druckanomalien im Gebirge	34
3.1. Ursachen von Druckanomalien	36
3.1.1. Entstehung von Hochdruckzonen	36
3.1.2. Entstehung von Niederdruckzonen	38
3.2. Anzeichen von Druckanomalien	39
3.2.1. Dichteverringering von Tonschiefern	40
3.2.2. Bohrkleinausbildung beim Durchteufen von Druckanomalien	42
3.2.3. Bohrbarkeitsänderung des Gesteins	43
3.2.4. Veränderungen im Spülungskreislauf	47
4. Meßtechnische Erfassung von Druckanomalien	48
4.1. Direkte Meßmethoden	49
4.1.1. Widerstandmessung	49
4.1.2. Elektrische Leitfähigkeit	52
4.1.3. Neutronen-Gamma-Messung	53
4.1.4. Schalleitfähigkeit	53
4.1.5. Dichtemessung	55

	Seite	
4.2.	Indirekte Meßmethoden	57
4.2.1.	Bohrgeschwindigkeitsänderung	59
4.2.2.	SpülungskreislauF	61
4.2.3.	Drehmomentenänderung	63
4.3.	Aussagefähigkeit und Anwendungsgrenzen	63
5.	Auswirkungen auf den Bohrprozeß	64
6.	Literaturverzeichnis	67
7.	Bildverzeichnis	70
8.	Symbole und Einheiten	72
9.	Sachwörterverzeichnis	73

## O. Aufgabenstellung

Die Lehrbogen Bohrlochhydraulik in der Reihe Bohrtechnik haben die Aufgabe, die Bedeutung der Hydraulik im modernen Bohrprozeß herauszustellen. Es kommt dabei vor allem darauf an zu klären, unter welchen Bedingungen die Steuergröße -Hydraulik- wesentlich oder unbedeutend für die Beherrschung und Optimierung des gesamten Bohrprozesses ist. Die zahlreichen inneren und äußeren, den Prozeßablauf beeinflussenden Faktoren, lassen nur dann eine vollständige Beherrschung des hydraulischen Systems zu, wenn die möglichen petrographischen und geodynamischen Störgrößen eines Gebietes vorher analytisch ermittelt und ihre Auswirkungen durch entsprechende Ausrüstungen und Technologien weitgehend aufgefangen werden können.

Es kommt dabei vor allem darauf an, die bestehenden Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, zu beweisen und ihre Anwendung auf geeignete Objekte zu erlernen. Das Beherrschen des Prozeßablaufes sowie seine ständige Vervollkommnung müssen auch auf dem Gebiet der Bohrlochhydraulik als Komplex betrachtet und somit auch komplex gelöst werden. Aus einer geeigneten Zusammenfassung und Interpretation von Meßwerten, analytischen Werten und gespeicherten Daten ist für den laufenden Prozeß das günstigste Ergebnis zu ermitteln. Als Funktion der geologischen Situation, des Wissens über die Wechselbeziehungen im Bohrprozeß und der Korrelation mit geophysikalischen Meßwerten ist die Bohrlochhydraulik im System Bohrloch - Gebirge ein Faktor von entscheidender ökonomischer und technischer Bedeutung. Ihre Beherrschung spiegelt den Stand der Bohrtechnik, den Prozeßablauf bis zur Übernahme der Bohrung in die Produktion oder bis zu ihrer technischen Verfüllung wieder.

Der sich ständig entwickelnde Bohrprozeß, die enorme Leistungssteigerung beim Bohren und bei den Bohrnebenarbeiten läßt die Anforderungen an die Bohrspülung und insbe-

sondere an die Bohrlochhydraulik in besonders starkem Maße steigen. Ausgehend von einer geeigneten Maßtechnik sind die Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenauswertung dem ablaufenden Gesamtprozeß anzupassen. Eine manuelle Bewertung der hydrostatischen und hydrodynamischen Verhältnisse im Bohrloch muß in immer stärkerem Maße durch den Einsatz von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen ersetzt werden.

In einigen Bohrgebieten erscheint die Anwendung gasförmiger Spülmedien vorteilhaft. Die pneumatischen Gesetzmäßigkeiten werden der Vollständigkeit halber im Komplex Bohrlochhydraulik mit abgehandelt. Beide Stoffphasen werden als Ausgangspunkt für eine den jeweiligen Bedingungen optimal angepaßte Lösungsvariante angesehen. Eine moderne Bohrlochhydraulik geht dabei beträchtlich über das unter diesem Begriff verstandene Problem einer optimalen Spülpumpen-Meißelhydraulik hinaus und gestattet es, Ansätze zur Optimierung und Automatisierung des Gesamtprozesses abzuleiten.

## 1. Hydraulische Gesetzmäßigkeiten im unverritzten Gebirge

Die moderne Bohrlochhydraulik befaßt sich mit der Optimierung der hydraulischen Leistung an der Bohrlochohle unter den Randbedingungen des gesamten Spülungskreislaufes und des zu durchteufenden Gesteins. Das Vordringen der Bohrungen in immer größere Tiefen stellt an die Beherrschung der Bohrlochhydraulik ständig höhere Anforderungen. Neben der Optimierung der Bohrleistung hat die Hydraulik in immer stärkerem Maße andere, weiter reichende Aufgaben zu erfüllen. Durch diese Entwicklung ist die Bohrlochhydraulik nunmehr in Abhängigkeit von den geomechanischen und hydraulischen Bedingungen des anstehenden Gesteins sowie den geometrischen Bohrlochverhältnissen zu betrachten.

Im folgenden wird deshalb der Ausgangszustand, das unverritzte Gebirge, kurz umrissen und auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Spülungskreislauf hingewiesen. Entsprechend den Druckbedingungen ist ein beliebiger Punkt im Gebirge als unter allseitig gleichem Druck stehend anzusehen. Der Druckwert ist nicht proportional dem Überlagerungsdruck, der Ablagerungsteufe oder dem geologischen Alter der Formation, sondern setzt sich vielmehr aus mehreren größeren und kleineren Einflußfaktoren zusammen, auf die an anderer Stelle noch kurz eingegangen wird. An dieser Stelle sei nur darauf verwiesen, daß sich der absolute Druckwert auf engstem Raum beträchtlich ändern kann, wenn sich ein oder mehrere Einfluß-

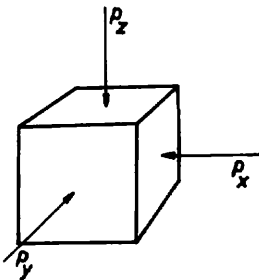


Bild 1  
Gesteinselement unter  
allseitig gleichem  
Druck  $p_x = p_y = p_z$



faktoren gleichzeitig ändern.

Die weiteren Betrachtungen beschränken sich auf Sedimentgesteine, da sie den größten Anteil an den jährlich abgeteufte Bohrmetern ausmachen. Im Gegensatz zu Eruptivgesteinen sind Sedimentgesteine inhomogener im Aufbau und in der räumlichen Verteilung. Sie besitzen in den meisten Fällen eine wesentlich geringere Eigenfestigkeit und eine Anisotropie. In geringen Teufen ist die Eigenfestigkeit des Gesteins beträchtlich höher als der Oberlagerungsdruck. Dieser Festigkeitsüberschuß nimmt jedoch mit der Teufe ab und kehrt sich in geringsten Gesteinspartien sogar ins Gegenteil um, d.h., im unverritzten Gebirge wirken sich solche Anomalien in plastischer Verformung eines quasiplastischen Gesteins aus. Das typische Beispiel einer solchen Entwicklung ist die Salzstockbildung. Diese in großen Zeiträumen ablaufenden Vorgänge bedürfen nur geringer Druck- und Festigkeitsunterschiede, zeigen aber trotzdem große Wirkungen.

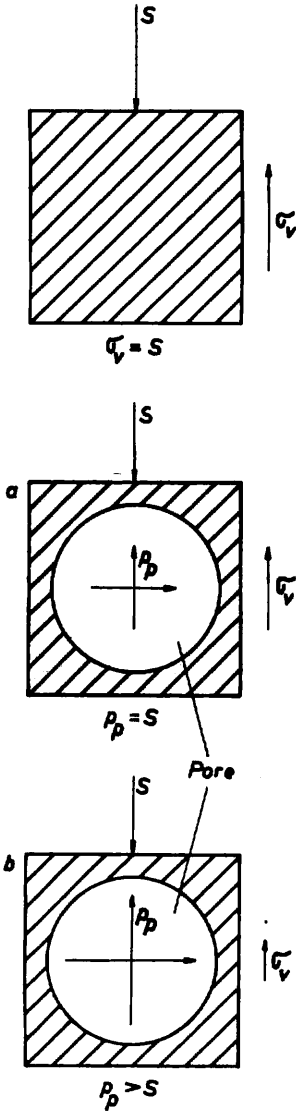
Sedimentgesteine sind aber - mit Ausnahme einzelner chemischer Sedimente - durch eine mehr oder weniger große Porosität und in besonderen Fällen durch eine unterschiedlich große Permeabilität gekennzeichnet, die sich aber durch den Oberlagerungsdruck und durch den Einfluß tektonischer Kräfte ändern. Hierbei kommt es allgemein zu einer Verringerung des Porenvolumens und zur Bildung von Mikro- und Makrokluft, Rissen, Spalten und sogar zu Verwerfungen.

Die meisten Sedimentgesteine sind marinen Ursprungs; aride Sedimente bilden jedoch eine Ausnahme. Dies bedeutet, daß das Porenvolumen mit einem primär flüssigen, sekundär aber auch gasförmigen Medium ausgefüllt ist. Während man der Gesteinsmatrix einen allseitig gleichen Spannungszustand in einem Punkt zuordnet, kann man die daraus resultierende Druckkomponente nicht auf den Porenhalt übertragen.

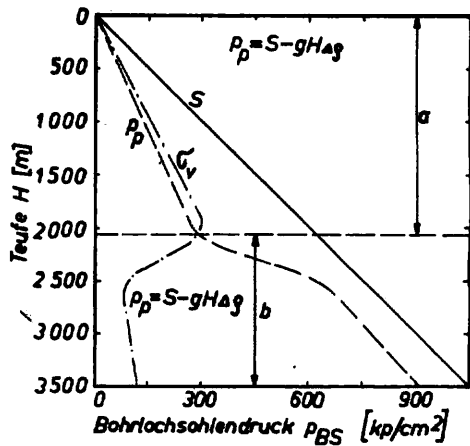
Bild 2

Vergleich der Spannungsverteilung in dichtem und porösem Gestein bei unterschiedlichen Porenraumdrücken

$S$  = Oberlagerungsdruck,  
 $\sigma_v$  = Vertikalspannung im Gerüst,  
 $P_p$  = Porenraumdruck  
 $\Delta \rho$  = Dichtedifferenz (Gebirge-Spülung)



Abschnitt a:  $\Delta \rho = \text{konst}$   
 Abschnitt b:  $\Delta \rho = \text{variabel}$



Den Aufbau eines Sedimentgesteins kann man vereinfacht, wie im Bild 2, darstellen. Die bei Sedimenten entstehungsbedingte Porosität schwankt in weiten Grenzen, so daß sich unterschiedliche Verhältnisse von Matrix zu Porenraum ergeben. In der Regel wird der Überlagerungsdruck durch das Gesteinsgerüst übertragen. Hierbei entstehen im Gestein Spannungen. Liegt der Porenraumdruck jedoch über der vertikalen Spannungskomponente, so beteiligt sich der Poreninhalt an der Druckübertragung und ändert gleichzeitig den Spannungszustand in der Matrix.

Auf Grund geomechanischer, thermischer, bakteriologischer und chemischer Einflüsse ändern sich Porenvolumen und Porenraumdruck sowie die aus dem Überlagerungsdruck abzuleitenden Spannungen in weiten Grenzen. Hierdurch treten bei bestimmten Druck- und Spannungsunterschieden zwischen Porenraum und Gestein Überbeanspruchungen der Matrix auf, die einen Festigkeiterückgang des Gesteins und eine Druckentlastung des Porenraumes in einer räumlich begrenzten Zone eines Sedimentpaketes zur Folge haben. Dieser Vorgang führt zu einer höheren Aufladung des Porenraumes in anderen Bereichen des geologischen Profils, zu einem zeitlich unterschiedlichen Ausgleich innerhalb des primär betrachteten Gesteinspaketes und letztlich zu der Tatsache, daß mit zunehmender Teufe die hydraulischen und geomechanischen Anomalien zunehmen müssen. Hierbei hat die bisherige Praxis eine sinkende Tendenz der relativen Porenraumdrücke, bezogen auf Teufe und Überlagerungsdruck, gezeigt. Gleichzeitig ist mit einer auf engstem Raum wechselnden Eigenfestigkeit des Gesteins zu rechnen, was besonders bei tonhaltigen Sedimenten und Salzen zu quasiplastischem Verhalten führt.

Im Gegensatz zu Gebieten mit einer ausgeglichenen, "ruhigen" Tektonik, ist in Mitteleuropa eine bewegte Tektonik fast in allen geologischen Formationen zu verzeichnen.

Hierdurch ist die Gesteinsausbildung durch auf engstem Raum wechselnde Mineralisation, Mächtigkeit, Porenvolumen, Poreninhalt u.a.m. gekennzeichnet. Aus dem Ergebnis der bisher angestellten Untersuchungen und Auswertungen lassen sich noch keine eindeutigen Voraussagen über den Spannungszustand der Matrix und den Porenraumdruck eines bestimmten Gesteins ableiten. Im unverritzten Gebirge treten zwar unter den Bedingungen des ständigen Wechsels geringmächtiger Gesteine größere Druckanomalien nur in den Gebieten mit größeren homogenen Gesteinspaketen und gleichzeitig großen Porositäts- und Festigkeitsunterschieden auf, jedoch ist gleichzeitig abzuleiten, daß die absoluten Porenraumdrücke, auf Grund der insgesamt geringeren Eigenfestigkeit der Gesteinspakete im ganzen betrachtet, kleiner bis wesentlich kleiner auftreten werden als in anderen Gebieten. Ausnahmen von dieser Regel bilden Gebiete mit mächtigen Zwischenlagen von Eruptivgesteinen, die auf Grund ihrer hohen Eigenfestigkeit als bedeutender Spannungsakkumulator auftreten können. Im Gegensatz zur Erhöhung des Überlagerungsdruckes und des Porenraumdruckes unter plastischen und quasiplastischen Gesteinsabfolgen ist in hochfesten Gesteinspartien mit verringerten Drücken zu rechnen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß das hochfeste Gestein durch die Tektonik ebenfalls beansprucht ist und daß die dadurch entstandenen Risse und Klüfte den Porenraumdruck der darunter liegenden Speichergesteine, entsprechend der Eigenfestigkeit des unmittelbaren Hangenden, entlasten konnten. Im Gegensatz dazu stehen die plastischen Gesteine, in denen sich diese Migrationswege nicht bilden konnten oder sich in kurzer Zeit wieder verschlossen haben.

Aus dem bisher Gesagten sind folgende Schlußfolgerungen zu ziehen:

- Die hydraulischen und geomechanischen Druckkomponenten einer Schicht sind abhängig von deren Eigenfestigkeit, Porenraum und Porenhalt sowie von den Festigkeits- und Verformungseigenschaften der über- und unterlagernden Gesteinsfolge.
- Die hydraulischen und geomechanischen Druckkomponenten einer Schicht sind außerdem abhängig von der Ausbildung des Gesteinspaketes, in dem die Schicht eingelagert ist, und von den Kraftwirkungen, denen dieses Gesteinspaket ausgesetzt ist.
- Die hydraulischen und geomechanischen Druckkomponenten einer Schicht können durch verschiedene Einflußfaktoren auf engstem Raum stark voneinander abweichen.
- Die Unterschiede zwischen den hydraulischen und geomechanischen Druckkomponenten sind in mächtigen, homogenen Gesteinspaketen größer als in geringmächtigen Gesteinen.
- Die Unterschiede zwischen hydraulischen und geomechanischen Druckkomponenten wachsen mit zunehmender Teufe an, wobei die hydraulischen Druckwerte stärker sinken, als die geomechanischen Druckwerte steigen.
- Auf Grund der mit wachsender Teufe eintretenden Temperatur- und Druckerhöhung ist der Porenraum in zunehmendem Maße mit Gasen und Kondensaten anstelle mit Flüssigkeiten gefüllt.
- In geringfesten Gesteinspartien ist der Beherrschung des Gebirgsdruckes größere Aufmerksamkeit zu schenken als der des Porenraumdruckes und der des eigentlichen Bohrprozesses.
- Der meßtechnischen Erfassung, Rekonstruktion und Berechnung des ursprünglichen Spannungszustandes ist im Interesse der Beherrschung des Gebirges beim Abbohren, Unter-

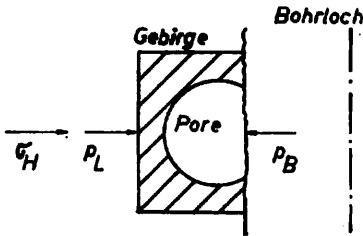
suchen und Abbau einer Lagerstätte größte Beachtung zu schenken.

Zusammenfassend muß noch darauf hingewiesen werden, daß sich diese Eigenschaften unter den Einflüssen eines Bohrloches ändern können. Die Störung des Quasi-Gleichgewichtes der einzelnen Druckkomponenten ergibt veränderte Situationen, die zwischen Bohrloch und Gebirge zu einem labilen Gleichgewicht führen können und eine sichere Beherrschung des Bohrloches mit zunehmender Teufe immer weiter erschweren.

Ein Nichtbeachten der hydraulischen Besonderheiten des zu durchteufenden Gebirges führt somit zu geringeren Leistungen bei höheren Kosten sowie zu stärkeren Auswirkungen von Druckanomalien und zu erhöhter Unsicherheit.

## 2. Störungen im bohrlochnahen Bereich

Bei der Schaffung eines Hohlraumes im Gebirge, in unserem Falle durch den Bohrprozeß, ändern sich der primäre Spannungszustand im Gestein und das Druckverhältnis im Porenraum. Diese gleichzeitige Änderung zweier wesentlicher Komponenten ist dadurch begründet, daß der Gebirgsdruck größer bis wesentlich größer als der Porenraumdruck ist und daß beiden der in weiten Grenzen schwankende Druck der Spülungssäule entgegenwirkt. In der Gesteinsmatrix stellt sich ein sekundärer Spannungszustand ein, der sich entsprechend den Druckschwankungen des Systems geringfügig ändern kann.



**Bild 3**  
Wechselwirkung zwischen  
Bohrloch und Porenraum

$p_B$  = Spülungsdruck

$p_L$  = Lagerstättendruck

$\sigma_H$  = Horizontalspannung

Im Bohrprozeß wird in erster Linie eine Stabilisierung des Gleichgewichtes zwischen Porenraumdruck und Druck der Spülungssäule angestrebt, was bei der Heterogenität der Gebirgsausbildung und dem Bestreben, möglichst große Strecken ohne weitere Hilfsmittel abzubohren, zuweilen auf nicht zu unterschätzende Schwierigkeiten stößt. Trotz dieser Bemühungen werden durch kurz- oder langfristige Störungen des hydrodynamischen Gleichgewichtes auch Veränderungen im Spannungszustand der Gesteinsmatrix hervorgerufen.

Die hydrodynamischen Beanspruchungen des Gesteins sind besonders im hochpermeablen, geringfesten Gesteinen als kritisch anzusehen, wenn die im Komplex zu betrachtenden Sekundärspannungen die Eigenfestigkeit der Matrix übersteigen. Es ist dabei besonders darauf zu achten, daß die

hydrodynamischen Wirkungen nicht nur unmittelbar an der Bohrlochwand oder an der Bohrlochohle auftreten, sondern entsprechend der Druckdifferenz unterschiedlich weit in das Gebirge hineinreichen können, was wiederum zu Veränderungen des Spannungszustandes in einem größeren Raum führt.

Es gilt als nachgewiesen, daß Veränderungen des Porenraumes, des Porenhaltes und des Porenraumdruckes zu Veränderungen des Spannungszustandes und damit zur Änderung der absoluten Gesteinesfestigkeit führen. Da sich Porenhalt und Porenraumdruck kurzfristig sowie das Porenvolumen langfristig ändern können, sind auch lang- und kurzfristige Spannungsänderungen zu erwarten. Es sei darauf verwiesen, daß entsprechend der Wirkgröße auch der Zeitfaktor als wichtige Komponente in die Betrachtungen einzugehen hat.

#### 2.1. Definition des bohrlochnahen Bereiches

Als bohrlochnaher Bereich wird in einem vertikalen Bohrloch die Zone angesehen, in der mehrere, unterschiedlich wirkende Einflußfaktoren als resultierende aus den gegenseitigen Wechselwirkungen wirksam werden. Bei geneigter bis horizontaler räumlicher Lage einer Bohrung, bei wechselndem Schichtefallen und auch bei starker Anisotropie des Gesteins kann man den bohrlochnahen Bereich in erster Näherung nicht mehr als koaxial zur Bohrlochachse ansehen.

Im Normalfall wird dieser Bereich von einem Kreiszylinder begrenzt, dessen Innenradius dem halben Bohrdurchmesser entspricht. Die Innenfläche dieses Zylinders stellt die unterschiedlich ausgebildete Bohrlochwand dar, die bei Beherrschung des Bohrprozesses als konstant angesehen werden kann. Der Außenradius ist von verschie-



denen Faktoren abhängig, die teilweise durch das Gebirge und teilweise durch den ablaufenden Bohrprozeß bedingt sind. Aus den genannten Gründen ist eine exakte Festlegung nicht möglich.

Die Entwicklungstendenz beim Bohren ist durch das Vordringen in immer größere Teufen und durch eine ökonomische Optimierung des Bohrdurchmessers gekennzeichnet. Hierdurch werden die Wertigkeiten einzelner prozeßbedingter Faktoren verändert, was sich auch auf den bohrlochnahen Bereich überträgt. Es muß deshalb empfohlen werden, die äußeren Randbedingungen von Fall zu Fall exakt zu definieren, um dadurch von vornherein Widersprüche und Verwechslungen auszuschalten.

Zur Vermeidung ernsthafter Komplikationen beim Abteufen tiefer und übertiefer Bohrungen wird z.Z. die Bohrlochwandstabilität in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt. Für den bohrlochnahen Bereich lassen sich in einem bestimmten Punkt folgende Belastungsfälle annehmen:

- Die Belastung durch den jeweils herrschenden statischen Oberlagerungsdruck;
- die Belastung durch den Porenraumdruck;
- die Belastung durch den Strömungsdruck;
- die Belastung durch den Fracdruck;
- die Belastung durch den Wärmeaustausch und
- die Belastung durch dynamischen Druck infolge von Spannungsänderungen im Gebirge.

Im Gegensatz zu bisherigen geomechanischen Untersuchungen für geringe Teufen, bei denen die Probleme der Bohrlochstabilität durch eine Zone ausgedrückt werden, deren Radius nicht größer als der fünffache Bohrdurchmesser ist, muß in größeren Teufen infolge höherer absoluter Spannungen und Drücke mit größeren Anomalien gerechnet werden. Dort können die Beeinflussungen der das Bohrloch

umgebenden Gesteine, entsprechend den jeweils herrschenden Bedingungen, einen größeren Wert erreichen, zumal die Eigenfestigkeit des Gesteins nicht in gleichem Maße wie die Spannungen zunehmen.

Wesentlich anders verhält es sich bei den Porendruck- und Strömungsverhältnissen im bohrlochnahen Bereich. Hier werden in permeablen Bereichen Beeinflussungen des Gebirges bis über den 100fachen Bohrlochdurchmesser hinaus festgestellt. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, sind durch den Porendruck Wechselbeziehungen zur Gebirgsmechanik vorhanden, die aber vergleichsweise als gering angesehen werden. Deshalb sollte man zunächst noch nicht die Beeinflussung des Poren- und Kluftraumes zur Definition des bohrlochnahen Bereiches heranziehen.

Der bohrlochnahe Bereich, dessen Einflußfaktoren zur Beherrschung der Bohrlochhydraulik von außerordentlicher Bedeutung sind, läßt sich demnach nur als Begriff einführen, der sich in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Bedingungen im Bohrloch und Gebirge sowie unter Berücksichtigung des Faktors Zeit genau definieren läßt. Größe und Richtung des Bereiches ändern sich entsprechend den wechselnden Bedingungen in einem Bohrloch ständig.

## 2.2. Wechselwirkungen im bohrlochnahen Bereich

Durch den Bohrprozeß entstehen im Gesteinsverband irreversible Veränderungen, deren Zustand sich unter den ständig veränderten Bedingungen ebenfalls verändert. Zur Verdeutlichung der auftretenden Hauptstörungen, die selten als Folge der Änderung eines Parameters eintreten, werden ihre Ursachen herausgearbeitet und nebeneinander behandelt. Die nachfolgend aufgeführte Reihenfolge stellt dabei keine Wertigkeit dar. Eine genaue Analyse oder auch Deutung der komplexen Vorgänge im bohrlochnahen Bereich

fordern die Kenntnis der Wechselbeziehungen gewisser Einzelparameter im Gesamtsystem. Diese Ergebnisse sind nur durch vielseitige Auswertung aller im Bohrprozeß anfallenden Meßwerte und durch Korrelation mit anderen indirekten Meßergebnissen hinreichend genau zu erhalten. Es zeigt sich dabei an verschiedenen Stellen, daß die Beherrschung eines Bohrloches nicht mehr von der Kunst des Bohrens, sondern vielmehr von der wissenschaftlichen Beherrschung des Gesamtsystems abhängig ist.

### 2.2.1. Petrographische Besonderheiten

Aus der Vielzahl der praktisch möglichen Gesteine, ihrer variablen mineralogischen Zusammensetzung und dem unterschiedlichen Aufbau der Gesteinspakete sollen in den weiteren Untersuchungen vorrangig nur die Sedimentgesteine betrachtet werden. Im Gegensatz zu metamorphen Gesteinen und Eruptivgesteinen besitzen Sedimentgesteine im allgemeinen geringere Eigenfestigkeit, Porosität, Permeabilität und Anisotropie, vertikal und parallel zur Ablage-  
rungsebene, sowie häufig eine ausgeprägte Schichtung. Außerdem wechseln entsprechend den Entstehungsbedingungen und den geotektonischen Veränderungen des geologischen Baues, z.B. durch Salzstockaufpressungen, die oben genannten Eigenschaften horizontal und vertikal in einer als gleichartig anzusprechenden Schicht auf engstem Raum.

Bei der Einschätzung der petrographischen Bedingungen eines konkreten Bohrgebietes sind deshalb in tektonisch schwach beanspruchten Gebieten wesentlich größere Verallgemeinerungen und Vernachlässigungen zulässig als in tektonisch stark beanspruchten Teilen. In den bisherigen Bohrteufen von durchschnittlich 2000 m besteht außerdem ein großer Festigkeitsüberschuß im Gestein gegenüber dem Überlagerungsdruck und den Spannungen im bohrlochnahen Bereich. Mit dem Vordringen der Bohrungen in Teufen von 4000 bis

7000 m geht dieser Festigkeitsüberschuß mehr und mehr zurück und führt bei Störungen des allseitigen Spannungszustandes in extrem geringfesten Zwischenlagen zu einer plastischen Deformation der Gesteine.

Im Bohrprozeß stehen das Bohrloch und das vom Bohrwerkzeug freigelegte Gestein in direktem Kontakt. Dabei unterliegt das Gestein hauptsächlich mechanischen, hydraulischen und physikochemischen Beanspruchungen, d.h. jede Komponente wechselt entsprechend dem Prozeßablauf nach Größe, Angriffsfläche und Einwirkdauer. Jede Prozeßänderung führt zu einer entsprechenden Reaktion im bohrlochnahen Bereich und damit zu einer kurzzeitigen oder dauerhaften, geringen oder hohen, einfachen oder kombinierten Beanspruchung des Gesteins und des Porenraumes im bohrlochnahen Bereich.

Störungen bzw. Veränderungen des ursprünglichen Druck- und Spannungszustandes im Gestein können demnach nicht unabhängig voneinander auftreten, sondern sind stets aus den Veränderungen des Gesamtsystems abzuleiten. In Abhängigkeit des Druck- und Spannungsniveaus von der Eigenfestigkeit des jeweils betrachteten Gesteins werden gleich große, absolute Änderungen unterschiedliche Reaktionen hervorrufen. Deshalb muß man sich bei der Beherrschung des Gesteins im Bohrprozeß vor allem auf dessen primäre bzw. sekundäre Eigenfestigkeit unter Berücksichtigung des Spannungszustandes orientieren. Als Steuergröße steht dabei z.Z. nur die Bohrlochhydraulik zur Verfügung.

Die Beherrschung der petrographischen Situation erfordert deshalb eine genaue Kenntnis der Gesteinsausbildung und ihrer technisch-physikalischen Kennziffern. Von praktischem Wert sind jedoch in letzter Konsequenz nur in situ ermittelte Ergebnisse. Da eine direkte Messung in absehbarer Zeit noch ausscheidet und mit den derzeitigen Meßmethoden den Prozeßablauf nur nachteilig beeinflussen würde, ist ausschließlich auf die indirekte Messung oder

die analytische Auswertung anderer Meßergebnisse zu orientieren. Aus den genannten Gründen sind an die meßtechnische Erfassung, Überwachung, Auswertung und Korrelation der Bohrprozeßmeßwerte höchste Anforderungen zu stellen. Die Beherrschung der Gesteinsfestigkeit in mittleren und großen Teufen ist somit eine Funktion der Meßtechnik, die wiederum ohne entsprechende kurzzeitige Auswertetechnik und ohne feinfühligere Regeltechnik nicht wirksam werden kann.

Die Genauigkeit muß direkt proportional der Häufigkeit von Wechsellagerungen, der tektonischen Beanspruchung des Gebietes und dem Wechselverhältnis zwischen Gesteinsfestigkeit und Ablagerungstiefe sowie, wie an anderer Stelle beschrieben wird, dem gesamten Aufbau des Deckgebirges und der Stellung mächtiger Gesteinsepakte zueinander sein. Gleichzeitig ist daraus die Bedingung abzuleiten, daß die Meß- und Auswertetechnik ständig weiterzuentwickeln sind. Störungen und Havarien auf Grund von elastischen oder plastischen Deformationen des Gesteins sowie durch das Überschreiten der Bruchfestigkeit können nur vermieden werden, wenn die Petrographie im betrachteten System den richtigen Platz einnimmt. Die zahlreichen Einflußfaktoren müssen zuverlässig erfaßt und durch den Steuerkreis Bohrpülung-Bohrlochhydraulik kurzfristig abgefangen werden können. Numerische Meß- und Registriereinrichtungen sind als Voraussetzung für eine umfangreiche Datenspeicherung und eine allseitige Korrelation mit den laufenden Prozeßwerten erforderlich. Der Werkstoff Gestein muß für eine zuverlässige Bearbeitung durch das technisch-physikalische Maßsystem dargestellt werden.

### 2.2.2. Mechanische Wirkkomponenten

Die mechanische Beanspruchung des bohrlochnahen Bereiches reicht von der gesteinszerstörenden Meißelarbeit beim Abteufen der Bohrung bis zum Einstellen der Bohrung, d.h.

bie zu einer längeren Ruhepause, in der sich wieder ein Gleichgewichtszustand ausbildet.

Aus dieser Definition ist abzuleiten, daß die mechanischen Beanspruchungen des Gesteins schwellend mit unterschiedlicher Intensität und Richtung auftreten. Da sich die Bohrlochssole nur kurzfristig als unveränderliche oder andererseits als endgültige Begrenzung der Bohrung einstellt, ist der Beanspruchung der Bohrlochwand die Hauptbeachtung zu schenken.

In inpermeablen Gesteinen werden auf der Bohrlochwand und in permeablen Gesteinen im bohrlochnahen Bereich folgende Kräfte wirksam:

- Druckkräfte - Meißel, Schwerstangen, Bohrrohre, Futterrohre
- Schlagkräfte - Meißel, Schwerstangen, Bohrrohre, Bohrgarnitur- und Futterrohreinbau
- Zugkräfte - Zementsteinschrumpfung

Reibungskräfte - Bohrrohre, Futterrohre.

Die Kraftwirkungen sind allgemein auf kleine Kontaktflächen eines zunächst konzentrischen Ringes an der Bohrlochwand konzentriert. Aus dem Verhältnis von Kraft:Fläche:Gesteinsfestigkeit geht die kreiszylindrische Bohrlochform mit unterschiedlicher Intensität verloren. Dabei orientiert sich die Kraftwirkung in der vorgegebenen Richtung und erhöht die Unrundheit der Bohrung. Im Gegensatz zu vertikalen Bohrlochabschnitten, in denen die horizontalen Kraftwirkungen allgemein als gering anzusehen sind, ergeben sich in geneigten Intervallen, bei Richtbohrungen und besonders bei sogenannten Knicken in der Bohrlochachse große Kräfte, die eine intensive Gesteinszerstörung und eine hohe Beanspruchung des bohrlochnahen Bereiches zur Folge haben.

Alle mechanischen Wirkkomponenten können klein gehalten werden. Ihre Größe ist umgekehrt proportional der Beherrschung des Bohrprozesses. Bei menschlichem Versagen, beim Ausfall von Meßeinrichtungen und bei mangelnder fachlicher Qualifikation können sich nach dem Grundgesetz: actio=reactio schwerwiegende Havarien und komplizierte Fangarbeiten ergeben, deren Auftreten grundsätzlich vermeidbar ist. Die mechanischen Kräfte wirken direkt und über die Spülung sowie den Poreninhalt auf das Gestein ein.

### 2.2.3. Hydraulische Wirkkomponenten

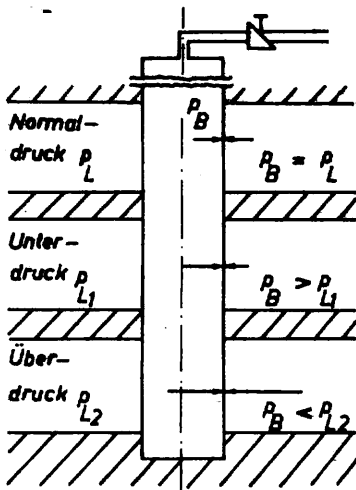
Die hydraulischen Beanspruchungen des bohrlochnahen Bereiches lassen sich folgendermaßen unterteilen:

- hydrodynamische Beanspruchung des Gesteins beim Bohren, Meißelwechsel, Futterrohreinbau und Zementationsvorgang
- hydrodynamische Beanspruchung des Gesteins bei Test- und Produktionsarbeiten
- hydrodynamische Beanspruchung bei Fracarbeiten, Druck-erhaltungsmaßnahmen und thermischer Lagerstättenbehandlung
- hydrodynamische Beanspruchung des Gesteins im unzementierten Ringraum (gleichbedeutend einer schlechten Ringraumzementation)
- hydrodynamische Beanspruchung des Gesteins im Havariefalle (Verluste, Eruptionen, Festwerden etc.)

Sie sind allgemein durch größere Kraftwirkungen gegenüber den mechanischen Kräften einzuschätzen, wirken allseitig gleich und werden vom räumlichen Verlauf der Bohrung kaum beeinflusst.

In unpermeablen Gesteinen beschränken bzw. konzentrieren sich die Kraftwirkungen auf die Bohrlochwand. Beim Bohren in permeablen Gesteinen tritt eine Wechselwirkung mit

dem Porenraum ein. Dementsprechend sind in gering- bis hochpermeablen Gesteinen unterschiedliche statische und dynamische Druckwirkungen zu erwarten. Eine Veränderung des Porenraumdruckes führt zunächst zu einer Störung des hydraulischen Gleichgewichtes in dieser Schicht. Da diese Schicht über das Bohrloch jedoch mit anderen Schichtkomplexen und mit dem Spülungskreislauf verbunden ist, kommt es zu Gleichgewichtsstörungen in jedem einzelnen Objekt und im gesamten System. Es kommt zu Verlusten von Spülmedium durch Wegfließen oder zu Schädigungen durch Zutritt von Schichtinhalt in den Spülungskreislauf. Beide Auswirkungen müssen als kritisch angesehen werden und sind durch Balancieren um das Gleichgewicht in technisch und ökonomisch vertretbaren Grenzen zu halten.



In geringen Teufen, bei großen Festigkeitsüberschüssen der Gesteinsmatrix gegenüber dem Gebirgedruck kann das hydrodynamische Gleichgewicht zwischen Bohrloch und Porenraum in weiten Grenzen und mit geringem Aufwand aufrecht und zum Vorteil des gesamten Bohrprozesses angewendet werden. Mit zunehmender Teufe geht dieser Vorteil mehr und mehr verloren. Es sind zahlreiche Fälle bekannt, in denen plastische und quassiplastische Gesteine durch ent-

Bild 4

Störungen des hydrodynamischen Gleichgewichtes bei konstantem Druck im Bohrloch und wechselnden Lagerstättendrücken



sprechende hydrodynamische Gegendrücke an der plastischen Deformation gehindert werden. An dieser Stelle sei nur erwähnt, daß gleiche Wirkungen in Tongesteinen durch physikochemische Verfahren erfolgreicher bekämpft werden.

Beim Vordringen in große Teufen muß das hydrodynamische Gleichgewicht zugunsten einer besseren Beherrschung des Gebirgsdruckes gestört werden. Dies bereitet insofern besondere Schwierigkeiten, da der Oberlagerungsdruck mit der Teufe zunimmt und der Porenraumdruck sich zwar absolut ebenfalls erhöht, aber relativ bis in die Nähe des hydrostatischen Druckes abfällt. Hierdurch werden an das Spülmedium ebenso hohe Anforderungen gestellt wie an die technologische Beherrschung der Bohrlochhydraulik. Es soll mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, daß die Bohrlochhydraulik nicht mehr unabhängig vom gesamten Bohrprozeß betrachtet werden kann.

Das Beherrschen beider Teilsysteme, des Gleichgewichtes zwischen Porenraumdruck und Druck der Spülungssäule einerseits und des Nichtunterschreitens des erforderlichen Gegendruckes zur Abstützung der Bohrlochwand andererseits, stellen hohe Anforderungen an die Meß-, Auswerte- und Regeltechnik auf diesem Gebiet. In geologisch wenig bekanntem Gebirge oder bei hoher tektonischer Beanspruchung sind an die Auswertung besonders hohe Anforderungen zu stellen.

Der moderne Bohrprozeß stellt völlig neue Anforderungen an die Beherrschung der Bohrlochhydraulik. Während bisher der Anteil der Stillstands- und Nebenzeiten bei Bohrarbeiten sehr groß war und dadurch die statischen Bedingungen im Bohrloch vorherrschten, konnte über Jahrzehnte hinweg die Spüldichte als Steuergröße verwendet werden. Vor ca. 20 Jahren begann man diesen Komplex weiterzuentwickeln und die rheologischen Eigenschaften in die Betrachtungen einzubeziehen. Man kann heute bereits einschätzen, daß diese Entwicklung nicht den erwarteten Erfolg brachte.

Die hydrodynamische Beanspruchung des bohrlochnahen Bereiches läßt sich somit feinfühlig nur durch eine Steuerung innerhalb des Systems beherrschen. Sie erfolgt im Bohrprozeß über eine Gegendruckregelung im Ringraum, über eine allseitige Auswertung der dabei gewonnenen Erkenntnisse und über eine gezielte Anwendung der Ergebnisse bei allen nachfolgenden Arbeiten im Bohrloch bis zum Abwerfen einer Bohrung.

#### 2.2.4. Physiko-chemische Einflüsse

Im bohrlochnahen Bereich treten physiko-chemische Wechselwirkungen nur dann auf, wenn das hydrodynamische Gleichgewicht gestört ist, d.h. wenn ein anderes als bisher im Porenraum vorhandenes Medium mit dem Gestein in Kontakt kommt. Besonders stark sind diese Einflüsse, wenn intensive Infiltrationen in das Gebirge oder chemisch aktive Medien die ursprünglichen Bedingungen kurzfristig verändern.

Die physikochemischen Wechselwirkungen in der Bohrlochsohle können bei den derzeit erzielten Bohrgeschwindigkeiten vernachlässigt werden. In der Bohrlochwand treten immer geringere Wechselwirkungen auf, da Bohrgeschwindigkeit und Meißelstandlänge ständig verbessert werden.

An der Bohrlochwand und im bohrlochnahen Bereich sind die physiko-chemischen Einflüsse demzufolge abhängig von

- der Reaktionsgeschwindigkeit der Medien untereinander,
- der Kontaktfläche mit dem Gestein,
- der Eindringtiefe in das Gebirge,
- der Einwirkdauer bei langsam ablaufenden Reaktionen,
- den Veränderungen der Fließwege und
- dem Temperaturhaushalt der betreffenden Schicht.

Die engen Wechselbeziehungen zwischen Bohrlochhydraulik und physiko-chemischen Einflüssen werden durch den Über-

gang zu feststoffarmen bis zu feststofffreien Spülmedien noch deutlicher. Stellt bei den feststoffreichen Spülungen die sich ausbildende Filterkruste einen natürlichen Filter und eine Drosselung des Volumenstromes in das Gebirge dar, so geht dieser Schutz bei den modernen Spülmedien völlig verloren, d.h. die eingesetzten Spülmedien müssen gegenüber dem Gestein und dem Poreninhalt möglichst inaktiv sein. Gleichzeitig muß man bestrebt sein, die Aufmahlung des Gesteins, die Entsandung und Entsiltung eines Spülmediums in zulässigen Grenzen zu halten, um chemisch aktives Material nicht im Bohrprozeß zu erzeugen und damit Veränderungen der Stabilität des Spülmediums einerseits und der Gesteinsfestigkeit im bohrlochnahen Bereich andererseits einzuleiten.

Entsprechend der großen Bedeutung für das sichere Abteufen einer Bohrung ist den physiko-chemischen Wechselwirkungen zwischen Spülmedium und bohrlochnahen Bereich besonders mit zunehmender Teufe, d.h. bei größeren Störungen des hydrodynamischen Gleichgewichtes, besondere Beachtung zu schenken.

#### 2.2.5. Temperatureinflüsse

Die Temperaturdifferenz zwischen Bohrloch und Gebirge nimmt mit größer werdender Teufe immer mehr zu. Im Zusammenhang mit den bereits vorher erwähnten Einflußfaktoren kann der Temperatureinfluß zu Veränderungen in der Bohrlochwand führen. Während man anfangs bei statischen Gebirgstemperaturen von 150 °C eine natürliche Grenze für den Einsatz wasserbasischer Spülungen sah, ist dieser Wert in letzter Zeit bis auf fast 200 °C gestiegen. Andererseits sind aber mit ölbasischen Spülmedien bereits statische Gebirgstemperaturen von 263 °C erreicht worden.

Auf den Temperaturhaushalt im bohrlochnahen Bereich wirken sich besonders folgende Faktoren aus:

- statische Gebirgstemperatur,
- Wärmeleitfähigkeit des anstehenden Gesteins,
- Temperatur der Spülung,
- Bewegungsgeschwindigkeiten des auf- und absteigenden Spülstromes,
- Kontaktflächen für den Wärmeaustausch,
- Zeitdauer des Wärmeaustausches, d.h. das Verhältnis von Meißelmarsch zu Round trip, bzw. der Veränderung des absoluten Temperaturniveaus.

Auch an dieser Stelle ist eindeutig zu erkennen, daß die Temperaturwirkungen in starkem Maße von der Beherrschung des ablaufenden Prozesses abhängen. Die oben aufgeführten wesentlichen Einflußfaktoren zeigen die hohen Anforderungen an die Erfassung und Auswertung einer beliebigen Situation und die Notwendigkeit, sich in jedem Bohrgebiet und jeder neuen Bohrung mit diesem Problem ernsthaft zu beschäftigen. Es kommt darauf an, die Temperaturspannungen im bohrlochnahen Bereich in den zulässigen Grenzen zu halten.

Betrachtet man den bohrlochnahen Bereich relativ zu seiner Umgebung als mehrschichtiges, dickwandiges Rohr oder als Zylinder, so treten nach RÖDIGER - KNESCHKE im Zylinder bei verhinderter thermischer Verformung Wärmespannungen auf, die je nach Größe und Richtung des Temperaturgefälles unterschiedliche Größe und Vorzeichen haben. Die Bestimmung dieser Spannungen ist jedoch nur möglich, wenn die Elastizitätsmoduln und Wärmeausdehnungskoeffizienten der anstehenden Gesteine bekannt sind und wenn die effektive Spülungstemperatur genau ermittelt werden kann.

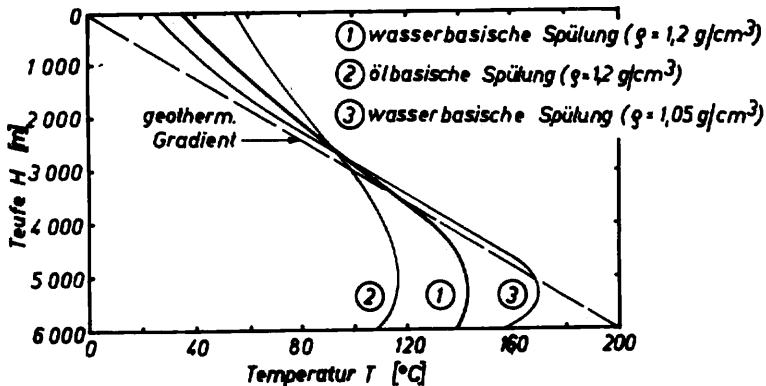


Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß die geothermische Tiefenstufe, die als Mittelwert über größere Teufenintervalle festgelegt wird, den Anforderungen des modernen Bohr- und Förderprozesses nicht mehr genügt. Die unterschiedliche Gesteinsausbildung sowie unterschiedliche tektonische Beanspruchungen führen auf engstem Raum zu stark divergierenden Temperaturen. Außerdem treten aus dem Prozeßablauf Einflüsse auf, die das statische Temperaturgleichgewicht im betrachteten bohrlochnahen Raum ständig stören. Besonders stark treten diese Störfaktoren in Erscheinung, wenn in porösen, klüftigen oder klüftig-porösen Gesteinen das hydrodynamische Gleichgewicht zwischen Bohrloch und Porenraum nicht aufrecht erhalten werden kann und dadurch Medien als Wärmeträger ins Gestein strömen können.

Für die Beherrschung der Gebirgstemperatur und den sich daraus ergebenden Spannungen sind demnach die permeablen Gesteine vorrangig zu behandeln. Neben den thermodynamischen Besonderheiten besitzen sie in der Regel auch die geringsten Eigenfestigkeiten. Allgemein ist festzustellen, daß die Abkühlung des bohrlochnahen Bereiches und die daraus resultierenden Spannungen und Kräfte besonders in großen Tiefen sowie bei stark wechselnden Gesteinseigenschaften zu untersuchen sind.

In geringen Teufen treten bei extrem tiefen Bohrungen umgekehrte Verhältnisse auf, die jedoch für das Gebirge infolge des vorhandenen Festigkeitsüberschusses vernachlässigt werden können. Anders dagegen verhält es sich mit den Temperaturbeanspruchungen der Futterrohre und des Zementmantels. Die ständig höheren Dichtheitsanforderungen sind nur unter Berücksichtigung des Temperatur- und Spannungsverlaufes zu beherrschen. Ähnliche Verhältnisse mit besonders kritischen Folgen treten in Permafrostgebieten auf. Wenn auch während des Bohrprozesses ein Auf-

tauen des Gebirges noch verhindert werden kann, so treten jedoch in der Produktionsphase ernsthafte Komplikationen auf, die die Sicherheit der gesamten Bohrung in starkem Maße gefährden.



Temperaturvorgänge im Bohrloch mit unterschiedlichen Spülungstypen und konstanter Meißelstandzeit (20h)

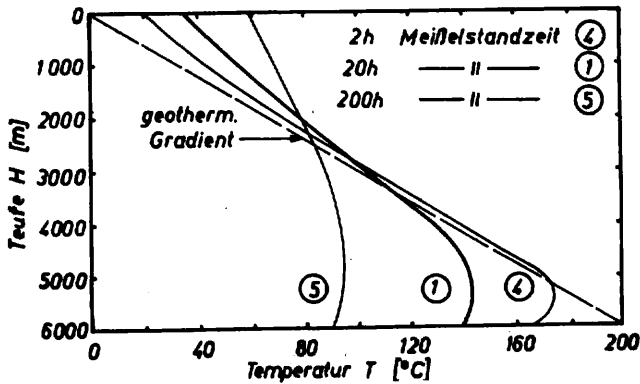


Bild 6

Temperaturvorgänge im Bohrloch mit unterschiedlichen Meißelstandzeiten und konstantem Spülungstyp (wasserbasierte Spülung  $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ )

Bei der Entwicklung geeigneter Berechnungsmethoden tritt eine Reihe von Schwierigkeiten auf. GRODDE, GRAF und HÄFNER stellen die zahlreichen Wechselbeziehungen zusammen und treffen notwendige Annahmen bzw. Vereinfachungen. Für das Abteufen extrem tiefer Bohrungen oder für Bohrungen in Gebieten mit einem jungen Vulkanismus, d.h. mit extremen Temperaturanomalien im Gestein, ist es zumindest wichtig, die Wärmemenge zu kennen, die bei gegebenen technologischen Bedingungen aus dem Gebirge abgeführt werden muß. Aus den rheologischen Eigenschaften des eingesetzten Spülmediums und den technischen Parametern lassen sich dann Teillösungen ableiten, die die Sicherheit des Bohrprozesses weiter erhöhen und wichtige Schlußfolgerungen für alle nachfolgenden Arbeiten wie Verrohrung, Zementation, Test usw. zulassen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, daß die Spannungsänderungen infolge von Temperaturänderungen im bohrlochnahen Bereich allein nicht ausreichen, um das Gestein elastisch oder plastisch zu deformieren. Das Zusammenwirken verschiedener Komponenten und die daraus resultierenden Kräfte kann man aber nicht ohne Berücksichtigung der prozeßbedingten Abkühlung des Gesteins betrachten. Die Thermostabilität der eingesetzten Spülmedien läßt es z.Z. noch nicht zu, den Bohrprozeß mit einer minimalen Wärmeabfuhr aus dem Gebirge durchzuführen. Die ständig längere Lebensdauer der eingesetzten Bohrwerkzeuge führt zu einer größeren Abkühlung des bohrlochnahen Bereiches und zu einem stärkeren Aufheizen des gesamten Spülungssystems. Sie kann somit ebenso zu ernsthaften Komplikationen führen wie eine zu geringe Meißelstandzeit mit den daraus resultierenden, höheren mechanischen und hydrodynamischen Beanspruchungen des Gesteins.



### 2.2.6. Zeitfaktor

Das gleichzeitige Wirken mehrerer Einflußfaktoren auf ein inhomogenes Material, das Gestein, führt zu Veränderungen im Gestein, d.h. zu Veränderungen an der schwächsten Stelle im System. Diese Veränderungen laufen entsprechend dem Anteil der geringfesten Komponenten und der aufgebrachten äußeren Kräfte unterschiedlich schnell ab.

Der durch das Bohrloch gestörte Gleichgewichtszustand einer bestimmten Schicht unterscheidet sich demnach von dem Grad der Störung einer anderen Schicht. Entsprechend dem Größenunterschied der Störung und der Entfernung zweier solcher Schichten zueinander laufen unter gleichen äußeren Bedingungen, in diesem Falle im Bohrloch, zeitlich und räumlich verschiedene Prozesse auf Grund der gleichen Ursache und unter gewissen Umständen auch unter gleich großen äußeren Kräften ab.

Hieraus läßt sich als wesentliche Schlußfolgerung ableiten, daß ein Bohrloch bei gleichen oder nahezu gleichen Beanspruchungen des Gesteins im bohrlochnahen Bereich dann die größte Sicherheit bietet, wenn die technische Leistung nahe dem Maximum und der Zeitaufwand in der Nähe des Minimums liegt. Man muß bestrebt sein, den Zeitaufwand für eine bestimmte Leistung ständig dadurch zu verringern, indem man nicht höhere Energie dem Bohrsystem überträgt, sondern die aufgewendete Energie rationeller der Bohrlochsohle zuführt.

Der Energieaufwand ist aber auch vom gewählten Bohrdurchmesser abhängig. Eine willkürliche Kombination von Bohrdurchmessern verbietet sich von selbst. Mit anderen Worten, es gelingt, den Bohrdurchmesser im Interesse des geringstmöglichen Zeitaufwandes im kritischen Teufenbereich und nicht für die gesamte Bohrung zu optimieren. Andererseits kann man auch schlußfolgern, daß im homoge-

nen tektonisch gering beanspruchten Gestein größere Zeitreserven für den Ablauf der gleichen Veränderungen zur Verfügung stehen als in labilen Gesteinspartien. Dieses führt zu der Forderung, in geologisch wenig bekannten Gebieten sowie im Bereich von stark wechselnden Gesteinseigenschaften eine Meßtechnik einzusetzen, die in kürzester Zeit zuverlässige Aussagen über den Verformungscharakter des Gesteins im bohrlochnahen Bereich zuläßt und damit eindeutige Steuergrößen für das bisher unabhängige System der automatisierten Bohrlochhydraulik zuläßt.

Die Bohrpraxis in großen Teufen bringt täglich neue Erfahrungen. Konnte man bisher feststellen, daß die Meßtechnik den Anforderungen bei homogener Gesteinsausbildung oder bei hoher Gesteinsfestigkeit genügte, so ist doch nicht zu übersehen, daß Bohrungen, die Störungszonen antrafen, in relativ kurzer Zeit nicht mehr beherrscht werden konnten. Eine Verschlechterung der geologischen Bedingungen ist mit zunehmender Teufe ebenso zu erwarten wie der schnellere Ablauf gleichartiger Prozesse entsprechend den absoluten Festigkeitsunterschieden.

Zur genauen Einschätzung des zeitlichen Ablaufes gesteinsdeformierender Prozesse sind jedoch noch zahlreiche Untersuchungen und eine weiterhin verbesserte Auswertung des im Bohr- und Förderprozeß anfallenden Zahlenmaterials erforderlich. Die Beherrschung dieser komplexen Zusammenhänge ist als Voraussetzung für den ökonomischen Abbau von Kohlenwasserstoffen in großen Teufen anzusehen. Als Steuergrößen stehen dem Gesamtprozeß mit geringen Einschränkungen nur hydrodynamische Komponenten zur Verfügung, deren Wirkungsweise näher untersucht werden muß.

### 3. Druckerhöhungen im Gebirge

Der bohrlochnahe Bereich wird entsprechend den betrachteten Wechselwirkungen durch den Prozeß beeinflußt. Damit ist gleichzeitig gesagt, daß größere, längere Beanspruchungen während der Produktion, der Sondenbehandlung, bei Druckerhöhungsmaßnahmen usw. auftreten können. In den weiteren Betrachtungen soll ausschließlich auf die im Bohrprozeß erfaßbaren Druckerhöhungen im bohrlochnahen Bereich und im Gebirge eingegangen werden. An anderer Stelle gilt es dann, die Wechselwirkungen zu den zeitlich danach ablaufenden Prozessen zu ermitteln und für den verlustarmen Abbau von Kohlenwasserstofflagerstätten nutzbar zu machen.

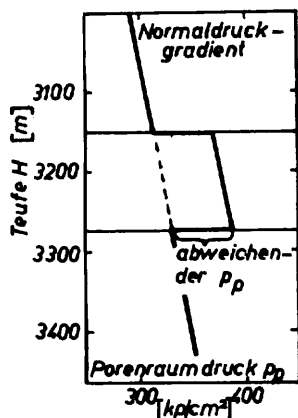


Bild 7  
Vereinfachte Darstellung einer Druckerhöhung im Gebirge

Unter Druckerhöhung ist definitiv zu verstehen: Eine Gesteinsschicht, die entsprechend der Ablagerungstiefe und dem teilweise daraus resultierenden Überlagerungsdruck, einem mehr oder weniger stark abweichenden Porenraumdruck gegenüber den Hangend- oder den Liegend-schichten besitzt. Es besteht demnach ein anomaler Druckunterschied zur Gesteinsmatrix und ein entsprechend modifizierter Druckunterschied gegenüber dem Bohrloch, sobald mehrere permeable Schichten über das Spülmedium wie kommunizierende Gefäße miteinander verbunden sind.

Auf Grund der Tatsache, daß mit zunehmender Tiefe in der Regel größere Unterschiede zwischen Porenraumdruck und Überlagerungsdruck bzw. Eigenfestigkeit der Matrix auftreten, ist es als eine Gesetzmäßigkeit anzusehen, daß Zahl

und Intensität von Druckenomalien nicht unabhängig von den jeweiligen Bedingungen auftreten können. Sie stellen eine Gesetzmäßigkeit dar, die es mit jeder neuen Bohrung eines bestimmten Bohrgebietes zu konkretisieren gilt. Nur unter dieser Voraussetzung ist das technisch-ökonomische Optimum zu sichern. Je weniger diese Druckenomalien und das gesamte Druckverhältnis bekannt sind, desto geringer muß die erzielte Leistung eingeschätzt werden, die einerseits nicht das ökonomische Optimum garantiert und andererseits aus kleinen Komplikationen schwere Havarien entstehen läßt, nur weil die wesentlichen Einflußfaktoren nicht hinreichend bekannt sind. Beherrschen der Druckenomalien bedeutet somit größtmögliche Einschränkung komplizierter Havarien und somit in kürzester Zeit - zu geringsten Kosten - die effektiv größte Leistung zu erzielen.

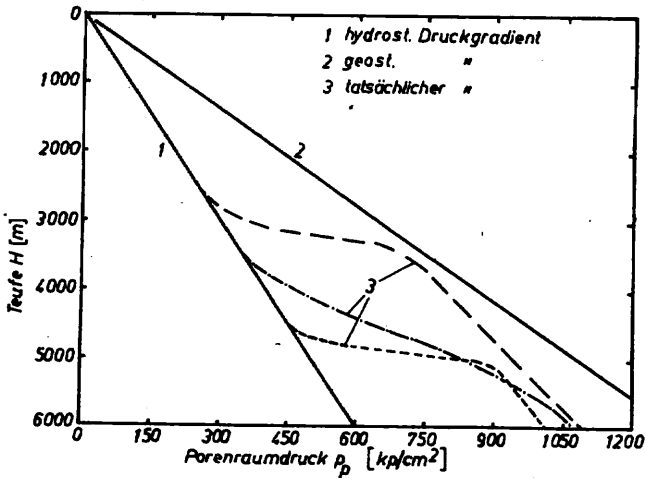


Bild 8

Änderung des Porenraumdruckes über der Teufe in verschiedenen Bohrgebieten

### 3.1. Ursachen von Druckanomalien

Das Auftreten von Druckanomalien ist im wesentlichen nicht an konkrete Gesteine, Teufen, Mächtigkeiten, tektonische Beanspruchungen u.a.m. gebunden, sondern ist auf das Zusammenwirken mehrerer voneinander unabhängiger Faktoren zurückzuführen. Bei der Ursachenanalyse kommt es deshalb darauf an, zwischen primären und sekundären Anomalien ebenso zu unterscheiden wie zwischen großen und kleinen Druckunterschieden mit geringen oder großen Speicherräumen. Als Hauptursachen müssen z.Z. geomechanische, hydraulische, thermische, chemische und mikrobiologische Einflüsse auf den Porenhalt von Sedimentgesteinen angesehen werden. Der Ausgangszustand läßt sich durch das gleichzeitige Wirksamwerden verschiedener Einflußfaktoren nur schwer rekonstruieren. Dieses ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die als Druckkammer um den Porenraum vorhandene Gesteinsmatrix dauerhaft verformt bzw. in den ursprünglichen Festigkeitseigenschaften geschwächt wird. Eine Ausnahme bilden plastische und quasiplastische Gesteine.

#### 3.1.1. Entstehung von Hochdruckzonen

An einigen Beispielen sollen Ursachen und Grenzen der Bildung von Hochdruckzonen, d.h., Zonen erhöhten Porenraumdruckes, dargestellt werden.

- Das bei der ariden oder marinen Sedimentation in einer Schicht vorhandene Porenvolumen ist unterschiedlich groß, verringert sich jedoch mit dem Absinken in größere Tiefen und dem Wirksamwerden eines erhöhten Überlagerungsdruckes. Die Kompression des den Porenraum füllenden Mediums geht dabei soweit, daß der Porenraumdruck die Eigenfestigkeit der Matrix überschreitet und der Porenhalt ganz oder teilweise in Richtung des geringsten Widerstandes entweicht.

Die Eigenfestigkeit der Gesteinsmatrix ist eine Funktion des mineralogischen Aufbaus und des vorhandenen Porenvolumens. Geringpermeable Gesteine und plastische bzw. quasiplastische Gesteine erschweren bzw. verhindern ein Aufsteigen des Poreninhaltes und führen somit zu Druckanomalien.

Die Mächtigkeit und Homogenität einer solchen druckakkumulierenden Schicht ist für das erreichte Druckniveau von entscheidender Bedeutung.

- Tektonische Beanspruchungen führen in spröden Gesteinen zur Bildung von Klüften unterschiedlicher Größe bis zu Verwerfungen. Hierbei können Zonen geringen Druckes mit tieferliegenden Hochdruckzonen in Verbindung treten. Plastische und quasiplastische Gesteine bilden entsprechend ihrer Eigenfestigkeit natürliche Hindernisse für einen schnellen Druckausgleich.
- Thermische Beanspruchungen sind überwiegend durch vulkanische Tätigkeit bedingt. In Verbindung mit der o.a. tektonischen Beanspruchung können jedoch über Klüftsysteme Temperaturbewegungen stattfinden, die durch die Aufheizung des Poreninhaltes zu einer Druckerhöhung bzw. zum Überschreiten der Matrixfestigkeit einer Schicht und damit zur Bildung von Druckanomalien in mehreren anderen Schichten führen kann.
- Chemische Umwandlungen des Poreninhaltes sind als relativ selten anzusehen. Sie können jedoch bei Zutritt reagierender Medien zu einem konstanten Porenhalt oder infolge thermischer Umwandlung desselben zu Volumenänderungen führen, die im feststehenden Porenraum Druckerhöhungen zur Folge haben müssen.
- Mikrobiologische Prozesse sind nach den neuesten Erkenntnissen eine nicht zu unterschätzende Einflußgröße im gesamten Umwandlungsprozeß. Wenn auch bisher noch

nicht von ausschließlichen Effekten berichtet wird, so gilt ihre Wirkung jedoch als nachgewiesen.

Die alleinige Betrachtung des Porenraumdruckes stellt eine Vereinfachung des Systems Poreninhalt-Gestein dar, bei dem eine Komponente sich nicht unabhängig von der anderen ändern kann. Die geomechanischen Auswirkungen würden aber zu weit führen und werden deshalb an dieser Stelle vernachlässigt. Für das Auftreten von positiven Druckanomalien sind somit folgende Bedingungen besonders geeignet:

- hochporöse Speichergesteine großer Mächtigkeit,
- mächtige, feste, inpermeable Nebengesteine,
- hohe tektonische Beanspruchung des Gesteins,
- mächtige plastische oder quasiplastische Gesteinspakete,
- Vulkanismus und Salzstockbildung.

### 3.1.2. Entstehung von Niederdruckzonen

Ergeben Hochdruckzonen Komplikationen bei der Beherrschung des Poreninhaltes, so sind Niederdruckzonen durch Schwierigkeiten bei der Beherrschung des Gebirgsdruckes gekennzeichnet. Zur Aufrechterhaltung des hydrodynamischen Gleichgewichtes zwischen Bohrloch und bohrlochnahem Bereich ist es notwendig, das Druckniveau relativ niedrig einzustellen. Hierdurch wird das Gleichgewicht im gesamten unverrohrten Bohrlochabschnitt besonders stark gestört.

Niederdruckzonen sind ähnlich den Hochdruckzonen nur aus dem Zusammentreffen mehrerer gleichzeitig und unabhängig voneinander wirkender Faktoren zu erklären. Die negative Druckanomalie ist auf folgende Haupteinflüsse zurückzuführen:

- Tektonische Beanspruchung und demzufolge Druckentlastung im Porenraum der druckstarken Horizonte, Entwei-

chen des unter hohem Druck stehenden Mediums in höher gelegene Horizonte und in die Atmosphäre.

- Thermische Aufheizung, dadurch bedingtes Entweichen von Teilen des Poreninhaltes und anschließende Abkühlung des Speichergesteins auf mittlere Gebirgstemperaturen.
- In geringpermeablen Gesteinen mit hoher Eigenfestigkeit sind keine Veränderungen des Porenraumes beim Absinken in große Tiefen aufgetreten.
- Durch biochemische Prozesse ist eine Volumenverringernng des Poreninhaltes eingetreten.

### 3.2. Anzeichen von Druckanomalien

Mit dem Vordringen in immer größere Tiefen ist eine Zunahme des Überlagerungsdruckes zu erwarten. Die Druckzunahme ist unstetig und von verschiedenen Faktoren abhängig, sie wirkt sich neben den bisher genannten Einflüssen auch auf den Porenraumdruck aus. In Gebieten mit stark wechselnden geologischen und petrographischen Bedingungen und beim Vorhandensein plastischer und quasiplastischer Gesteine unterschiedlicher Mächtigkeit und Festigkeit ist deshalb mit dem Auftreten von Druckanomalien zu rechnen.

In den letzten Jahren sind mehrere Untersuchungs- und Auswertemethoden entwickelt worden, mit denen es gelingt, bei vertretbarem oder teilweise auch geringem technischem Aufwand, Horizonte mit abnormalen Porenraumdrücken zu ermitteln. Die Methoden sind teilweise soweit entwickelt, daß aus den Anzeichen zuverlässige Schlußfolgerungen über die absolute Höhe des Porenraumdruckes gezogen werden können. Die wichtigsten Anzeichen sollen der meßtechnischen Erfassung und Auswertung vorangestellt werden. Ihre Erfassung ist in wenig gestörten Lagen oder in hin-



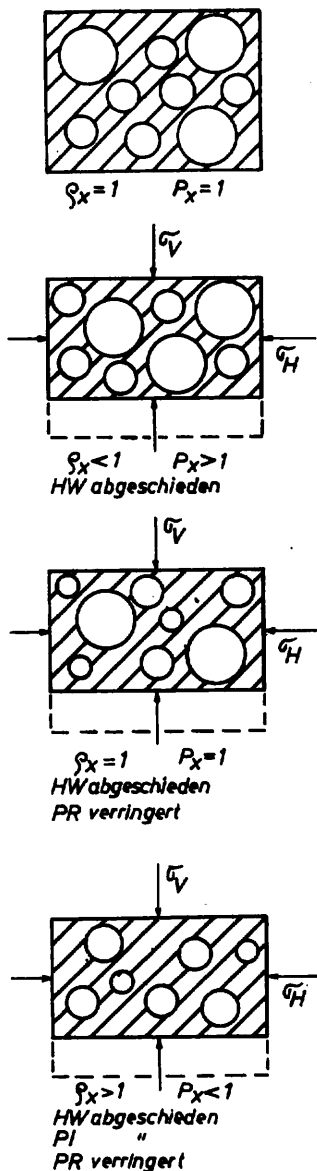
reichend bekannten Gebieten bereits anhand reflexionsseismischer Messungen, also vor Bohrbeginn, möglich.

### 3.2.1. Dichteänderung von Tonschiefern

Beim Absinken eines beliebigen Gesteins in größere Teufen tritt infolge der Oberlagerung durch jüngere Gebirgsschichten in den älteren Schichten in der Regel eine Volumenverringerung auf. Diese ergibt sich aus der Verdichtung des Gesteins oder durch das Abpressen des Poreninhaltes. Als gleichartige Einflüsse können auch starke Gebirgsbewegungen, d.h. das Wirken starker tektonischer Kräfte in horizontaler und vertikaler Richtung nach oben, angesehen werden. Entsprechend der Ausbildung der Gesteinspakete unterscheiden sich die wirksam werdenden Kräfte und demzufolge auch die Dichteänderungen in Abhängigkeit von der Eigenfestigkeit und von dem Elastizitätsmodul eines konkreten Gesteins sowie den Eigenschaften seiner Hangend- und Liegendschichten.

In hochelastischen Gesteinen treten demzufolge Formänderungen bei den bisher erreichten Bohrtiefen nur nach mechanischer Zerstörung wie Haarris, Kluft oder Bruch auf. Anders dagegen in quasiplastischen und plastischen Gesteinen. Hier treten die Formänderungen durch Veränderungen des Porenraumes und der Struktur in Erscheinung. Aus der Ausbildung eines Gesteinspaketes und seiner Einordnung in einen größeren Gesteinsverband ergeben sich deshalb besonders in Verbindung mit der Dichte von Tonen, Schiefer-tonen und Tonschiefern Anzeichen von Druckanomalien.

Mit zunehmendem Oberlagerungsdruck erlangt das Gestein in der Regel eine höhere Dichte. In Tonschiefern tritt häufig diese Kompression ohne wesentliche Änderung des Porenvolumens auf, dadurch ergibt sich eine Dichteverminderung pro Volumeneinheit Gestein. Diese Kompression ist



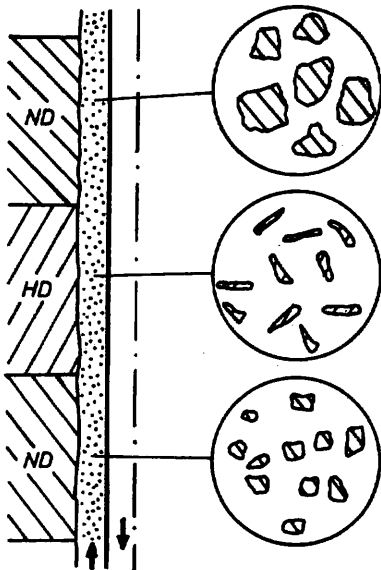
sowohl auf äußere Kräfte auf die Gesteinsmatrix als auch auf innere Kräfte, wie das Eindringen von flüssigen oder gasförmigen Medien in den Porenraum oder beiden gemeinsam zu erklären. Sie tritt in keinem porösen Gestein so deutlich hervor wie im Tonschiefer, was auf die große Homogenität und geringe Permeabilität des Tonmaterials zurückzuführen ist.

Führt man beim Bohren eine ständige Überwachung der Gesteinsdichte im durchteuften Profil anhand von Dichtemessungen an Bohrklein durch, so kann man anhand plötzlicher bzw. allmählicher Dichteänderungen auf das Vorhandensein eines Hochdruckhorizontes schließen und unter Anwendung geeigneter Korrelationen auch mit hinreichender Genauigkeit ermitteln. Inhomogenitäten sind auf unterschiedliche Ausbildungen des Tonschiefers in einem betrachteten Intervall zurückzuführen.

Bild 9  
 Vergleichende Darstellung der Dichteänderung von Tongesteinen  
 $P_x$  - Porenfaktor  
 $S_x$  - Dichtefaktor  
 HW - Haftwasser  
 PR - Porenraum  
 PI - Poreninhalt

### 3.2.2. Bohrkleinausbildung beim Durchteufen von Druckanomalien

Der Übergang von Zonen mittleren Druckes im Bereiche geringeren oder höheren Druckes erfolgt in den seltensten Fällen schlagartig. Entsprechend der jeweiligen Ausbildung der Hangendschichten, homogen-inhomogen, mächtig-geringmächtig, inpermeabel-geringpermeabel, treten unterschiedlich große Übergangszonen auf. Bei voller Beherr-



sung des Bohrprozesses ist das Bohrklein mehr oder weniger kubisch bis quaderförmig gestaltet. Im Bereich von Hochdruckhorizonten fällt das Tonschieferbohrklein dagegen ausgesprochen blättchenförmig bis schuppenförmig an, was als optisches Indiz für genauere Untersuchungen herangezogen werden kann. Fehlsprachen dieses Effektes sind bei ungeeigneten Meißeltypen und Arbeitsregimen an der Bohrlochsohle ebenfalls zu erwarten. Mit Ausnahme bei sehr dichten Kalksteinen und Dolomitgesteinen sind ähnliche Effekte an anderen Gesteinsarten bisher nicht beobachtet worden. Eine Beeinflussung der Bohrkleinausbildung durch Änderung der Bohrprozessparameter ist in Tonschiefern nicht zu erzielen.

Bild 10. Charakteristische Bohrkleinausbildung bei voller Beherrschung des Gesteinszerstörungsprozesses mit geeigneten Bohrwerkzeugen und Bohrregimen

### 3.2.3. Bohrbarkeitsänderung des Gesteins

Alle genannten Ursachen und Faktoren führen zu einer Beeinträchtigung bzw. Veränderung des Spannungszustandes im Gestein und damit zur Änderung seiner Eigenfestigkeit. Die Bohrbarkeit eines Gesteins ist somit im hohen Maße von der relativen Gesteinsfestigkeit, dem herrschenden Spannungszustand und der Störung des ursprünglichen Gleichgewichts durch das Bohrloch abhängig. Die größten Bohrbarkeitsänderungen treten in hochpermeablen Gesteinen, die geringsten in inpermeablen Gesteinen auf. Dieser Effekt wird der Wirkung des Differenzdruckes zwischen Porenraum und Bohrloch zugeschrieben. Herrscht im Bohrloch ein Überdruck, ist mit geringerer Gesteinzertrümmerungsleistung und im entgegengesetzten Falle mit einer höheren Bohrleistung zu rechnen.

Demnach führt eine Verringerung der Spüldichte, eine Senkung der hydraulischen Verluste im aufsteigenden Spülstrom ebenso zu einer Bohrbarkeitsverbesserung wie ein Gestein mit abnormal hohem Porenraumdruck. Ist im Gegensatz dazu mit einer Erhöhung des Differenzdruckes bei abnormal geringem Porenraumdruck, d.h. bei Nichtbeherrschen des Druckgleichgewichtes zwischen Bohrloch und Porenraum, mit Spülingsverlust zu rechnen, so tritt neben dieser Havarie gleichzeitig eine Verschlechterung der Bohrbarkeit und ein Zurückgehen der Bohrleistung auf.

Die Größe des an der Bohrlochssole herrschenden Differenzdruckes ist somit als Funktion des Porenraumdruckes ausschlaggebend für die Standlänge des Bohrwerkzeuges, die Bohrgeschwindigkeit und die Bohrkosten. Eine Berücksichtigung des Porenraumdruckes im Bereich der Bohrlochssole im Bohrprozeß setzt allerdings voraus, vorher, durch feinfühliges Steuern des hydrodynamischen Gleichgewichtes die Druckanomalien im bis dahin abgeteufte Bohrlochabschnitt und im Bereich der Bohrlochssole zu beherrschen.

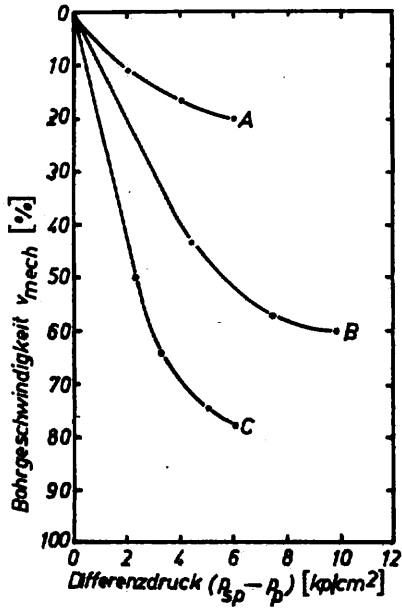
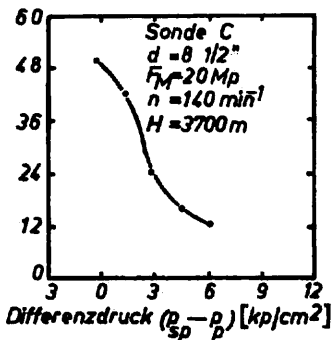
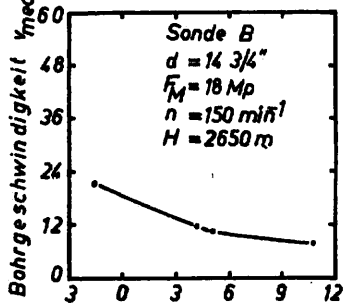
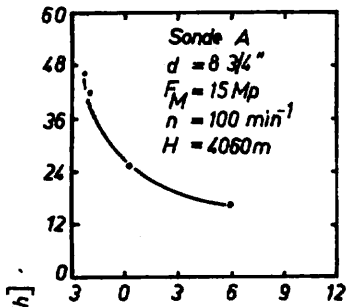


Bild 11

Beispiele für den Einfluß des Differenzdruckes zwischen Porenraum und Bohrloch auf die Bohrbarkeit des Gesteins

Werden Meißelbelastung, Meißeldrehzahl, Drehmoment und der Spülungskreislauf durch den Einsatz von Nachläßvorrichtungen und automatisierten Regelvorrichtungen im Spülungssystem konstant gehalten, können Bohrgeschwindigkeitsänderungen eindeutig auf Formationsdruckänderungen

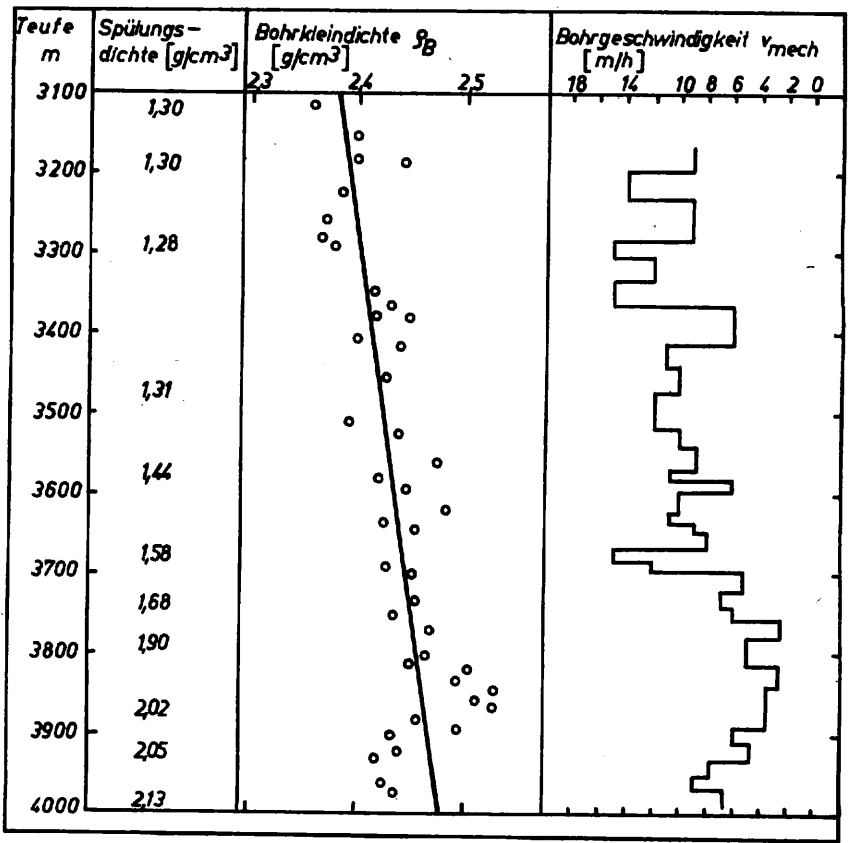


Bild 12  
 Änderung der Gesteinsbohrbarkeit als Funktion der Bohrgeschwindigkeit bei Anpassung der Spülungsparameter an den Porenraumdruck

gen zurückgeführt werden, sobald die Bohrkleinanalyse keinen Gesteinswechsel oder Festigkeitswechsel im gleichen Gestein aussagt. Eine ausreichende Vorarbeit sowie eine gründliche Korrelation mit bereits abgeteuften Bohrungen und eine genaue Erfassung, Registrierung und Auswertung bilden die Grundlage für eine Optimierung des Bohrprozesses unter Einbeziehung sich ständig ändernder Bohrbarkeiten.

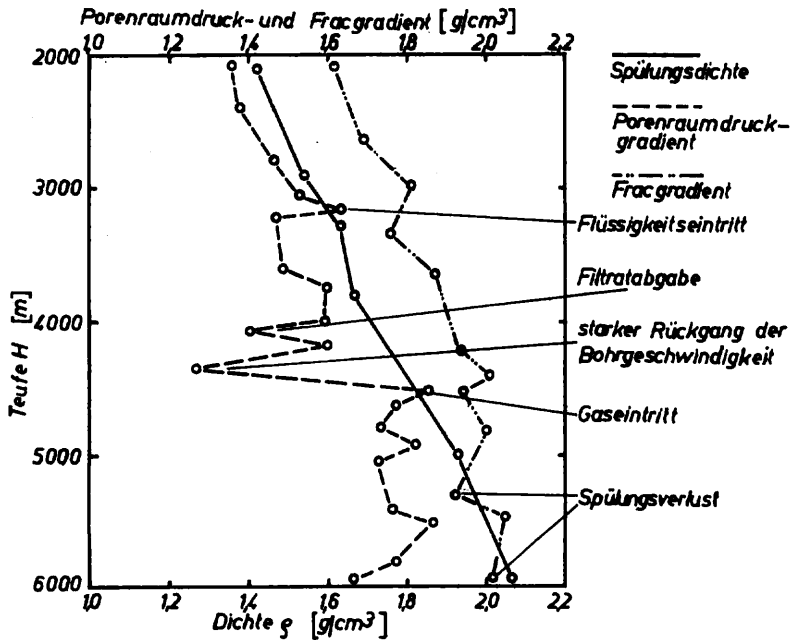


Bild 13  
Einflüsse des Porenraumdruckes auf den Spülungskreislauf

### 3.2.4. Veränderungen im Spülungskreislauf

Bei einer genauen Überwachung des Spülungskreislaufes lassen sich Druckanomalien an verschiedenen Faktoren erkennen:

- Zufluß von Lagerstätteninhalt in die Bohrung,
- Verlust von Filtrat oder Spülung in das an der Bohrlochsohle freigelegte Gestein,
- Änderung des pH-Wertes im Spülmedium,
- Änderung der Spülungsrheologie,
- Änderung des Gasgehaltes im Spülmedium,
- Änderung der Fließwiderstände im Ringraum.

Ein Nichtbeachten oder Nichterkennen dieser Besonderheiten im Anfangstadium und das sofortige Einleiten geeigneter Gegenmaßnahmen führt auch noch heute zu schwerwiegenden Havarien, die vom einfachen Festwerden der Bohrgarnitur, bis zu freien und untertägigen Eruptionen reichen. Andererseits entspricht aber ein willkürliches Erhöhen des Überdruckes im Bohrloch "aus Sicherheitsgründen" einem freiwilligen Verzicht auf hohe Bohrleistung, einer sicheren Beherrschung des Porenraumdruckes und einer geringstmöglichen Schädigung produktiver Horizonte. Für das Beherrschen des Gebirgesdruckes in großen Teufen ist ein sicheres Beherrschen des Spülungskreislaufes nahezu unerlässlich.



#### 4. Meßtechnische Erfassung von Druckanomalien

Das verschiedenartige Auftreten von Druckanomalien erfordert eine genaue Erfassung des absoluten Porenraumdruckes im Gebirge und die Beherrschung des Druckgradienten über die Zeit. Ausgehend von zunächst empirischen Betrachtungen der Wirkungsweise von Druckanomalien, die das verstärkte Auftreten von komplizierten Havarien nicht wesentlich verringerte, war man gezwungen, sich mehr und mehr der meßtechnischen Erfassung des Porenraumdruckes unterschiedlich permeabler Gesteine unmittelbar nach dem Durchbohren oder möglichst beim Durchbohren zuzuwenden.

Die angewendete Meßtechnik kann man heute in die direkten und indirekten Meßmethoden unterteilen, über den Einsatz der einen oder anderen Meßmethode entscheiden:

- geologische Besonderheiten, wie petrographische Ausbildung, tektonische Restspannungen, Stand der Datenspeicherung;
- bohrtechnische Besonderheiten, wie Beherrschung des mechanischen Bohrprozesses, Steuerung der Bohrregimeparameter, Flexibilität der Projektierung, Stand der Datenspeicherung, Optimierung der Bohrleistung;
- hydrodynamische Besonderheiten, wie dynamische Gegen-druckregelung, automatische Dichteregulierung, Regulierung der Spülungsreologie, absolute Bohrlochsohlenreinigung, Stand der Datenspeicherung;
- ökonomische Besonderheiten, wie Abrechnung der erzielten Leistung, Belastung des Endproduktes. Steigerung der Arbeitsproduktivität, Auslastung der Ausrüstung, Stand der Datenspeicherung u.a.m.

Aus den aufgezählten Einflußfaktoren ist abzuleiten, daß der Stand der Messung und Erfassung des Porenraumdruckes beim Bohren den Stand und die Beherrschung der Bohrtechnik im weitesten Sinne widerspiegelt.

#### 4.1. Direkte Meßmethoden

Die Anwendung direkter Meßmethoden beim Bohren ist noch auf wenige Ausnahmen beschränkt und stellt an die Bohrausrüstung besondere Anforderungen. Während die günstigsten und nahezu unverfälschten Porenraumdruckwerte unmittelbar am Meißel zu messen sind, können die Meßinstrumente bestensfalls in 1 bis 2 m Entfernung von der Bohrlochohle an der Bohrgarnitur angebracht werden. Der überwiegende Teil der direkten Meßwerte wird deshalb mit mehr oder weniger großer Verfälschung nach einem oder mehreren Meißelmärschen, d.h. kurze oder längere Zeit nachdem die Verbindung des Porenraumes mit dem Bohrloch hergestellt ist, gewonnen. Im modernen Bohrprozeß werden aber die absoluten Porenraumdrücke zur Steuerung und Optimierung der Bohrleistung ebenso benötigt, wie zur Vermeidung von Skineffekten und Blockierungen in produktiven oder zur Nutzung vorgesehenen permeablen Horizonten. Die direkt gemessenen Porenraumdrücke stellen somit eine notwendige Korrelation zu den indirekten Meßwerten dar, die für eine Auswertung der Porenraumdruckänderung und für die Auswahl der Verrohrung und Zementation der betreffenden Intervalle von großer Wichtigkeit sind.

##### 4.1.1. Widerstandsmessung

Die Berücksichtigung der Meßergebnisse im laufenden Bohrprozeß stellt an die Meßmethoden die Anforderung, eine Auswertung in kürzester Zeit zuzulassen. Es kommt vor allem darauf an, die Auswertezeit von bisher 10 bis 15 Stunden auf weniger als 10 Minuten zu reduzieren. Bei der Durchführung von Widerstandsmessungen unterscheidet man die Messung des Gesteinswiderstandes in der Bohrlochwand mit verschiedenen Meßsonden entsprechend der Differenz zwischen Porenraumdruck und Druck der Spülungssäule von

der Widerstandsmessung am Bohrklein bei geringen Differenzdrücken. Die Meßmethoden werden in Abhängigkeit von der Teufe, der Bohrgeschwindigkeit, dem Meißelmarach, der Tragfähigkeit der Spülung und dem Volumenstrom im Ringraum ausgewählt. Um den Bohrprozeß nicht zu unterbrechen, wird grundsätzlich auf Messungen am Bohrklein orientiert und nur in Ausnahmefällen eine Messung der "kleinen Normalen" im Bohrloch vorgenommen.

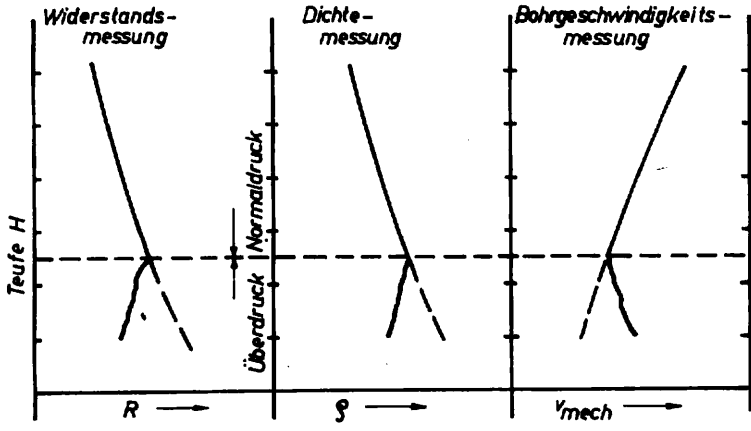


Bild 14

Vereinfachte Darstellung des Zusammenhanges zwischen Dichte, Bohrgeschwindigkeit und Widerstand des Gesteins

Eine Gegenüberstellung der möglichen Gesteinsdichten zeigt in Bild 14 die Unterschiede zwischen beiden Meßwerten auf. Beim Vergleich verschiedener Bohrungen ist deshalb unbedingt der Bezugswert zu berücksichtigen. In gleichen Gesteinen ist mit zunehmender Teufe eine Erhöhung des Widerstandes zu erwarten. Die Bilder 15 und 16 zeigen diesen Trend eindeutig an und lassen erkennen, daß lithologische Änderungen ähnliche Wirkungen zeigen wie die Änderung des Porenvolumens im gleichen Gestein. Die Widerstandsmessung gibt somit keine eindeutige Aussage und erfordert

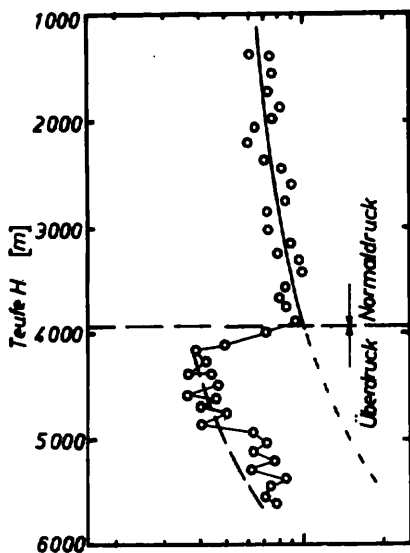


Bild 15

Anderung des Gesteinswiderstandes über der Teufe

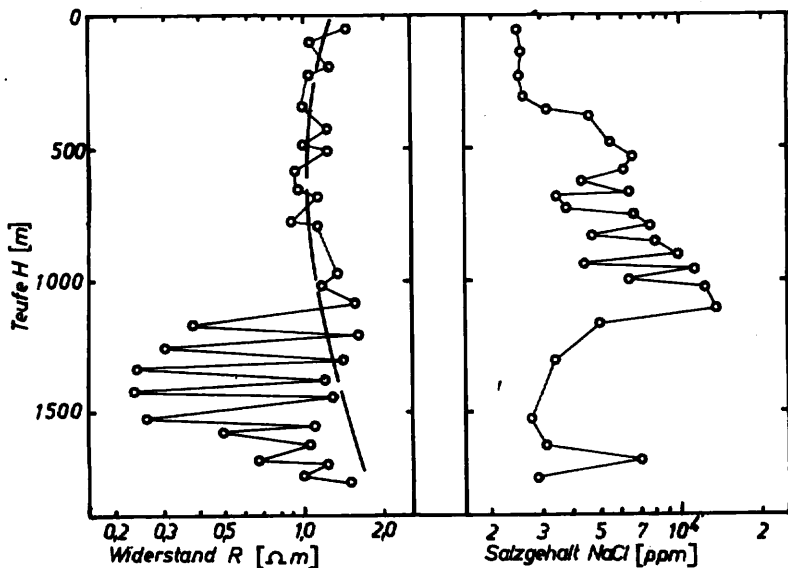


Bild 16

Anderung des Gesteinswiderstandes über der Teufe im Vergleich mit dem Salzgehalt der Lagerstättenwässer

eine Korrelation mit anderen elektrischen Meßwerten oder mit den Bohrprozeßkennziffern. Nachteilig erscheint es, daß dieser Meßwert nur im unverrohrten Bohrloch und unter Berücksichtigung des Salzgehaltes von Poreninhalt und Spülmedium genau, d.h. reproduzierbar, erfaßt werden kann. Eine Beobachtung über längere Zeiträume, bis einschließlich der Produktionsperiode, ist somit nicht möglich.

#### 4.1.2. Elektrische Leitfähigkeit

Mit zunehmender Teufe, d.h. abnehmendem Porenvolumen,

geht in der Regel die Leitfähigkeit zurück.

Ausnahmen bilden unterschiedlicher Salzgehalt des Poreninhaltes und abnormales Porenvolumen. Im Bereich von Druckanomalien weicht demnach die Leitfähigkeit ebenso vom vorgegebenen Mittelwert, nur mit entgegengesetzter Tendenz, ab.

Bild 17 zeigt den Vergleich in Verbindung mit dem Widerstand und dem Eigenpotential für ein bestimmtes Bohrgebiet.

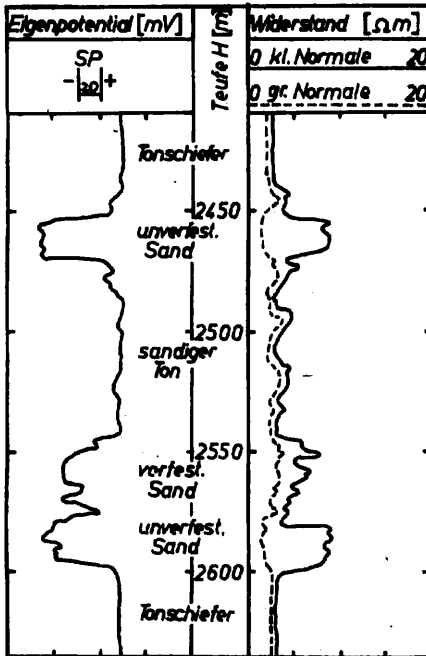


Bild 17

Das Eigenpotential des Gesteins und seine Korrelation mit dem Gesteinswiderstand

#### 4.1.3. Neutronen-Gamma-Messung

Zur Konkretisierung der lithologischen Besonderheiten ist eine Messung der primären und sekundären Gammastrahlung erforderlich; sie dient nur in seltenen Fällen zur Interpretation von Druckenomalien.

#### 4.1.4. Schalleitfähigkeit

Akustische Meßmethoden werden sowohl vor dem Bohrbeginn, als auch im Bohrloch angewendet. In einigen Bohrgebieten sind die Laufzeiten der seismischen Vorerkundung durch die bereits abgeteuften Bohrungen soweit konkretisiert, daß zuverlässige Aussagen über den Druckgradienten der betreffenden Schicht gemacht werden können. Aufbauend auf diesen Ergebnissen lassen sich die einzusetzenden Spülgedichten vor Bohrbeginn konkretisieren sowie gemeinsam mit der Festlegung der Rohrschuh-teufen und der Zementationsintervalle optimieren. Entsprechend den gesammelten Erfahrungen lassen sich in neuen Bohrgebieten in kürzerer Zeit zuverlässige Werte ermitteln. In den Bildern 18 und 19 ist der Ablauf der Untersuchungen einfach dargestellt. Ausgehend von der Schalleitfähigkeitsänderung mit der Teufe wird die effektive Laufzeit im Bereich einer Bohrung ermittelt. Zur Konkretisierung der auftretenden Anomalie wird die Abweichung des Druckgradienten vom Normaldruck über der Teufe dargestellt und abschließend mit der seismischen Laufzeitkurve zur Deckung gebracht. In den einzelnen Bohrgebieten lassen sich somit Voraussagen treffen, die durch Spezialmessungen in den einzelnen Bohrlochabschnitten zu konkretisieren sind.

Wie bereits angeführt, nimmt die Schalleitfähigkeit mit steigendem Oberlagerungsdruck, also größerer Gesteinsdichte, ab. Die Anzeigegenauigkeit der Vertikalseismik von über Tage reicht jedoch in einigen Fällen für die Pla-

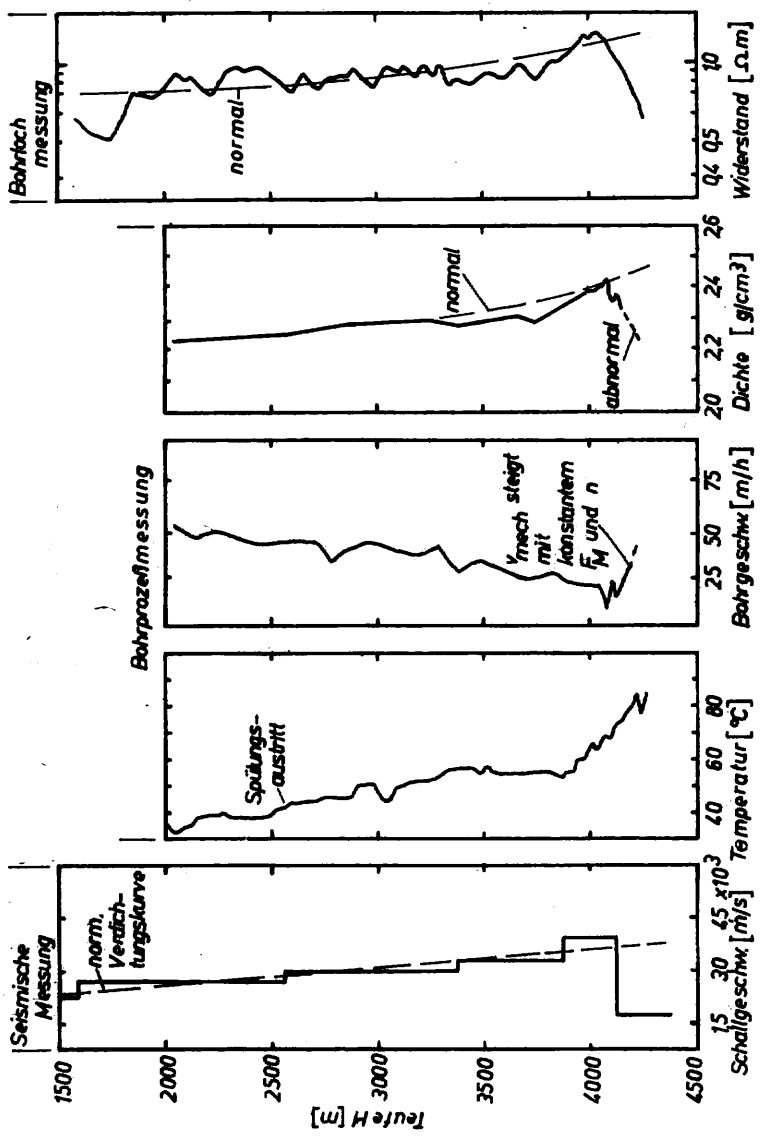


Bild 18 Korrelation der Schalleitfähigkeit mit anderen Bohrprozeßmeßwerten

nung, Projektierung und Vorbereitung der Bohrarbeiten nicht aus, so daß eine Horizontalseismik durch den Einsatz von sogenannten "Sonic-Logs" erforderlich wird. Die wesentlich höhere Meßgenauigkeit läßt in Verbindung mit anderen Meßwerten und auch als Einzelmessung eine direkte Aussage über Porosität und Formationsdruck zu. Aus den ermittelten Werten läßt sich neben dem Formationsdruck auch der Formations-Frac-Gradient ermitteln, der für die Beherrschung des Bohrloches aus gesteinsmechanischer Sicht von großer Bedeutung ist. Wie an anderer Stelle zu erörtern ist, stellt der moderne Bohrprozeß mit seiner Leistungsoptimierung für jeden Arbeitsgang an die Erfassung und Berücksichtigung der Fracfestigkeit eines Gesteins und des gesamten unverrohrten Bohrlochabschnittes höchste Anforderungen. Diese sind besonders in den Gebieten groß, in denen noch mit feststoffreichen, hochviskosen Spülmedien und großen Zementationsintervallen gearbeitet wird. Die Änderung der Schalleitfähigkeit über der Teufe ist in Bild 20 dargestellt. Bild 21 zeigt die Schalleitfähigkeitsänderung dieser Gesteine bei unterschiedlichen Formationsdruckgradienten. Die akustischen Meßverfahren werden zur Ermittlung des Formationsdruckgradienten und des Frac-Gradienten als sehr aussagekräftig angesehen und häufig angewendet.

#### 4.1.5. Dichtemessung

Das  $\gamma$ - $\gamma$ -Verfahren wird zur Bestimmung von Porosität und Gesteinsdichte eingesetzt. Somit ergeben die Meßwerte eindeutige Korrelationsgrundlagen für die Ermittlung von Druckenomalien. Wie bei den bisher betrachteten Meßverfahren ist die Dichtemessung mit hoher Genauigkeit und unter Ausschaltung störender Einflußfaktoren erforderlich. Bei unbalanciertem Bohren ist die Dichtemessung in der Bohrlochwand und bei balanciertem Bohren auch am Bohrklein durchzuführen. Die Meßwerte sind unter-



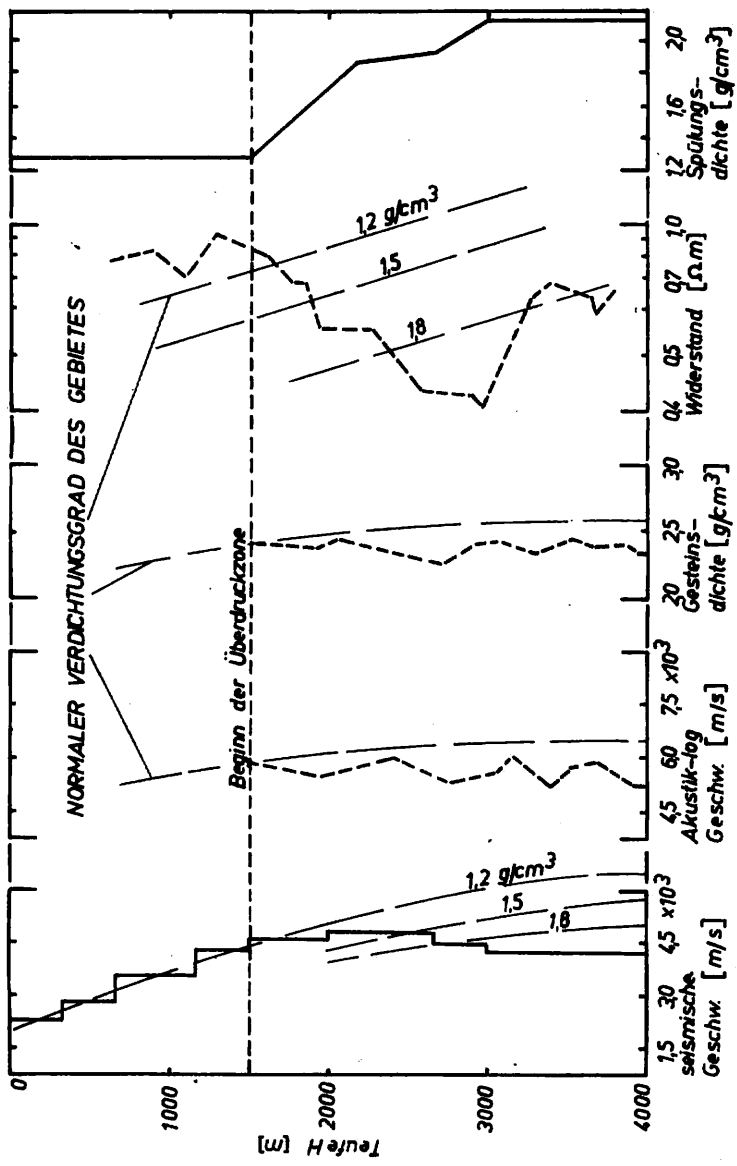


Bild 19 Die Schalleitfähigkeit im Bereich von Druckanomalien

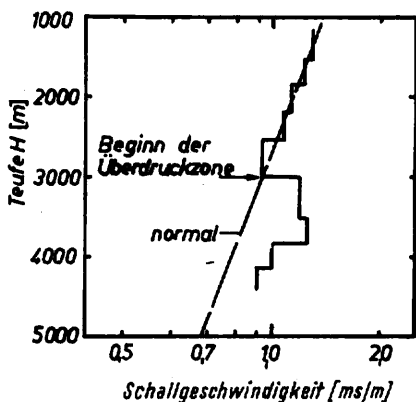


Bild 20  
Charakteristische Darstellung der Schalleitfähigkeit über der Tiefe

schiedlich und können nur bei entsprechend umfangreichen Erfahrungen gegeneinander ausgetauscht werden. Die Dichtemessung ist für die Bewertung der Bohrleistung und für die Festlegung des Bohrprozesses von großer Wichtigkeit.

Bild 23 zeigt die Unterschiede zwischen obertägiger Gesteinsdichte und untertägiger Gesteinsdichte und ihre Änderung über der Tiefe. Die Auswirkung von Dichteanomalien, ist im Bild 22 wiedergegeben.

#### 4.2. Indirekte Meßmethoden

In einigen Fällen, insbesondere in gut bohrbaren Gesteinen mit großen Meißelstandlängen und bei starker Wechselagerung ergeben die direkten Meßmethoden häufig nicht die gewünschten Ergebnisse in Hinblick auf Meßgenauigkeit und Zeitpunkt der Messung. Man ist in diesen Fällen darauf angewiesen, andere im Bohrprozeß anfallende Meßwerte, die auf die Erfassung des Formationsdruckgradienten und die Fracfestigkeit gerichtet sind, auszuwerten. Die Beherrschung des Bohrloches ist in diesen Fällen ebenfalls vom Stand der Meß-, Registrier- und Auswertetechnik abhängig. Außerdem sind für eine allseitige Korrelation umfangreiche Datenspeicher mit den Ergebnissen der bisher niedergebrachten Bohrungen erforderlich.

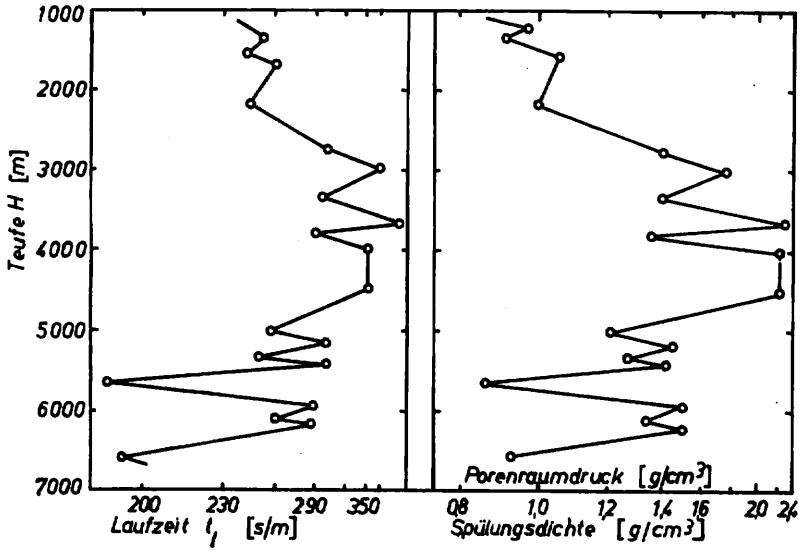


Bild 21 Typischer Akustik-log-Druckverlauf

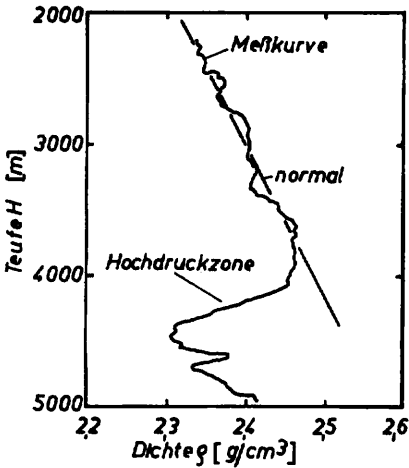


Bild 22  
Die Auswirkung einer  
Druckanomalie auf die  
Dichte des Gesteins

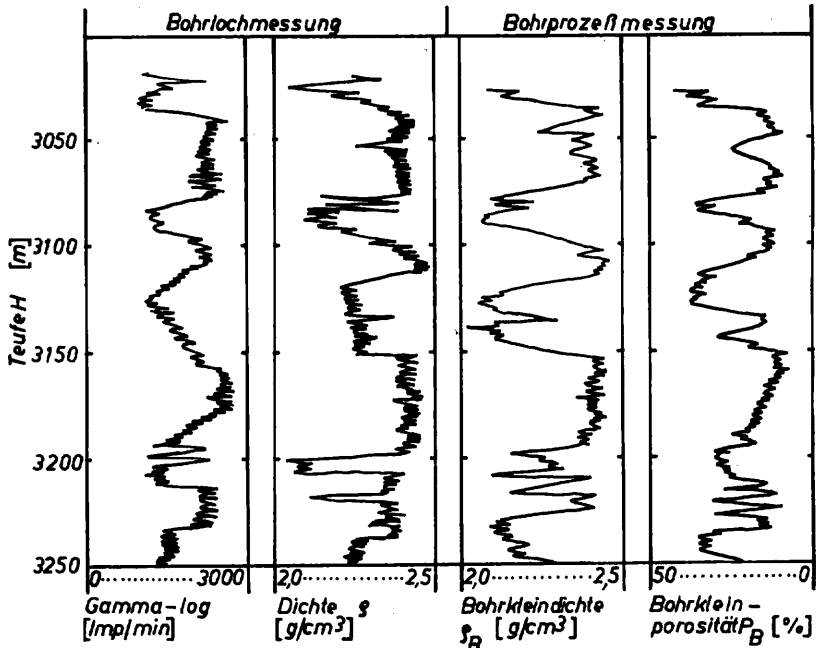


Bild 23

Bestimmung der Druckanomalien aus Bohrloch- und Bohrprozeßmeßdaten

#### 4.2.1. Bohrgeschwindigkeitsänderungen

Bohrgeschwindigkeitsänderungen haben verschiedene Ursachen. Durch den Einsatz hochwertiger Meß- und Steuerausrüstungen ist der menschliche Einfluß auf eine Unstetigkeit im Prozeßablauf jedoch weitgehend ausgeschaltet. Es kommt demnach darauf an, die gesteinsbedingten Parameteränderungen so miteinander zu verbinden, daß zuverlässige Aussagen über die einzelnen Einflußgrößen getroffen werden können. Es kommt weiterhin darauf an, die Bohrregimeparameter in einem Gestein konstant zu halten. Dies setzt allerdings voraus, daß stets eine absolute

Bohrlocheohlenreinigung garantiert wird. Bei konstanter Meißelbelastung und Meißeldrehzahl sowie konstantem Drehmoment stellt sich in einem bestimmten Gestein eine konstante Bohrgeschwindigkeit ein. Bohrgeschwindigkeitsänderungen deuten unter diesen Bedingungen somit auf Veränderungen in der Bohrbarkeit des Gesteins, in der Porosität, in der Gesteinsfestigkeit, im Porenraumdruck und in der Fracfestigkeit des Gebirges hin.

Eine weitere Voraussetzung für die Erfassung von Formationsdruckgradienten aus der Bohrgeschwindigkeitsänderung sind der Einsatz von Bohrpülungen mit geringem Feststoffgehalt und das Balancieren des Bohrlochdruckes in der Nähe des Formationsdruckes. Beim Bohren unter starken Abweichungen von diesen Gleichgewichtsbedingungen sind neben schlechten Bohrleistungen und hohen Bohrkosten insbesondere schwierige Auswertungen der einzelnen Einflußfaktoren zu erwarten. Die Bohrgeschwindigkeitsänderungen sind mit den gespeicherten Daten aus vorangegangenen Bohrungen zu korrelieren und

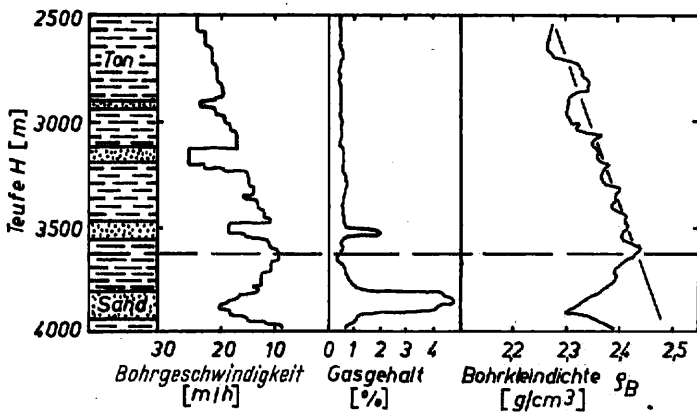


Bild 24 Vergleich der Bohrgeschwindigkeit mit anderen Bohrprozeßmeßwerten

lassen auf diese Weise eindeutige Aussagen zu. Bild 24 zeigt einen Vergleich mit anderen Meßwerten. Nach BINGHAM unterliegt die Bohrbarkeit eines Gesteins der Bedingung

$$\frac{R}{N} = a \left(\frac{W}{D}\right)^d.$$

Bei konstantem Bohrregime unterliegt der Exponent  $d$  den Einflüssen des Differenzdruckes zwischen Bohrloch und Gebirge und, wenn der Druck im Bohrloch hinreichend genau bekannt ist, auch des Formationsdruckes. Die Ermittlung des Exponenten wird unter Anwendung des Nomogramms in Bild 25 wesentlich erleichtert. Zur Ermittlung der Formationsdruckänderung ist es jedoch notwendig, die zahlreichen Bohrgeschwindigkeitswerte und ihre Änderung in geeigneter Form darzustellen und numerisch zu speichern. Aus dem Entwicklungstrend lassen sich die Druckübergangszonen ableiten, und an diesen Stellen läßt sich eine genauere Auswertung ansetzen.

#### 4.2.2. Spülungskreislauf

Im modernen Bohrprozeß wird das hydrodynamische Gleichgewicht zwischen Bohrloch und Porenhalt angestrebt. Ein Balancieren um das Gleichgewicht erfordert eine genaue meßtechnische Erfassung von Druck- und Volumenstromänderungen im Spülungskreislauf sowie eine feinfühligere Steuer- und Regeltechnik. Aus den genannten Gründen besteht die Möglichkeit, Formationsdruckänderungen oder Druckanomalien meßtechnisch zu erfassen und heute bereits teilweise vollautomatisch auszugleichen. Die Überwachung des Formationsdruckes über den Spülungskreislauf stellt allerdings an das Spülmedium und an die Ausrüstung hohe Anforderungen. Neben der Beherrschung des Lagerstättendruckes im Bohrprozeß werden zuverlässige Angaben über die optimale Rohrschuhteufe, die günstigsten Zementationsintervalle und die Fracfestigkeit des Gebirges aus den Meßwerten abgeleitet.

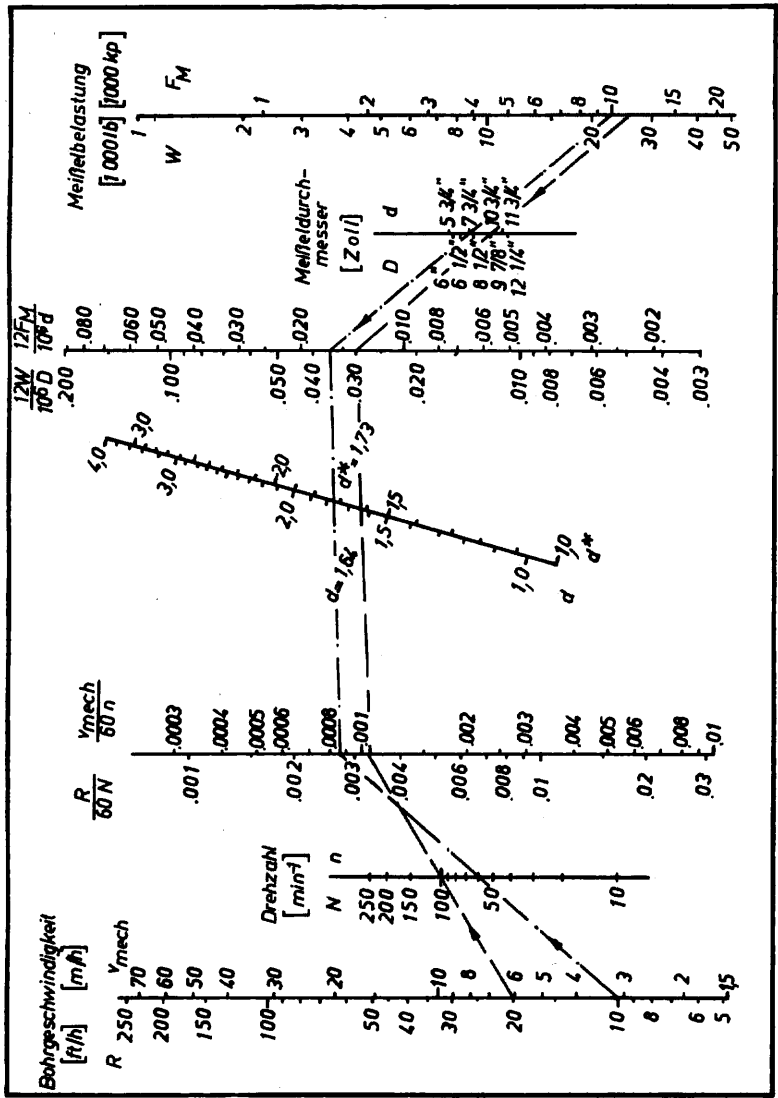


Bild 25 Nomogramm zur Bestimmung des "d"-Exponenten

#### 4.2.3. Drehmomentänderung

Der Einsatz von automatischen oder halbautomatischen Nachlaßvorrichtungen zur Verbesserung der Meißelbelastung und der Meißelstandlänge hat u.a. zwei markante Steuergrößen. Während bei der einen Ausrüstung die Meißelbelastung konstant gehalten wird, haben andere Ausrüstungen eine konstante Bohrgeschwindigkeit zum Ziel. In beiden Fällen ändern sich bei der Konstanz des einen Richtwertes andere Parameter, wenn sich das Gestein oder der Porenraumdruck ändern. Aus diesen Änderungen lassen sich auch an den Drehmomentenänderungen entsprechende Untersuchungen anstellen. Voraussetzung für die Aussagefähigkeit ist allerdings ein vertikaler Bohrlochverlauf, in dem stärkere Änderungen des Reibungswertes zwischen Bohrgarnitur und Bohrlochwand nicht auftreten, und die Beherrschung des Meißelverschleißes.

#### 4.3. Aussagefähigkeit und Anwendungsgrenzen

Bei der Betrachtung verschiedener Meßmethoden stehen petrographische, bohrtechnische und hydraulische Gesichtspunkte im Vordergrund. Letzten Endes ist aber die Beherrschung und Berücksichtigung von Druckenomalien sowohl bei der Optimierung der Bohrleistung als auch bei der Minimierung von Bohrzeit und Bohrkosten von entscheidender Bedeutung.

In einem konkreten Arbeitsbereich stellen deshalb der Stand der Meßtechnik ebenso wie die Auswertung und das Vorhandensein von Anwendungskriterien die Grundlage für eine ökonomische Durchdringung des Prozesses dar. Die Ergebnisse der meßtechnischen Erfassung an sich stellen keine Verbesserung des Gesamtprozesses dar, wenn nicht eindeutig reproduzierbare ökonomische Werte den Erfolg der Investitionen auf dem Gerätesektor und bei der Qualifikation des Personals widerspiegeln.



Die Aussagefähigkeit der einzelnen Meßmethoden ist unterschiedlich. Es kommt darauf an, in jedem neuen Bohrgebiet die Anwendungsgrenzen der verschiedenen Methoden schnell zu ermitteln und die Aussagefähigkeit der angewendeten Meßmethoden ständig zu verbessern. Dies wird allgemein durch eine umfangreiche Datenspeicherung aufbereiteter und korrelierter Primärdaten erreicht. Eine geringe Zugriffszeit für den Einsatz oder die Korrelation im laufenden Bohrprozeß ist von großer Wichtigkeit. In Gebieten mit komplizierten geologischen Bedingungen sind die Anforderungen höher zu stellen als bei ungestörter Lagerung.

#### 5. Auswirkungen auf den Bohrprozeß

Die hydraulischen Gesetzmäßigkeiten des zu durchteufenden Gebirges üben, wie in den einzelnen Punkten nachgewiesen werden konnte, einen Einfluß auf den Gesteinszerstörungsprozeß aus. Wenn man davon ausgeht, daß der im Bohrprozeß zu bearbeitende Werkstoff, das Gestein, in seinem Aufbau nicht geändert werden kann, steht als Steuergröße für die Werkstoffeigenschaften nur der allseitige Spannungszustand zur Verfügung, der durch das Erstellen des Hohlraumes als Bohrloch ohnehin gestört wird. Die Veränderung des Spannungszustandes eines Gesteins in der Bohrlochwand und in der Bohrlochsohle ist besonders groß in hochpermeablen Gesteinen und in Gesteinen mit quellfähigem tonigen Bindemittel oder Tongesteinen, die wiederum durch geringe Eigenfestigkeit gekennzeichnet sind. Die Veränderung des Spannungszustandes im bohrlochnahen Bereich kann somit zu einer Verbesserung oder zu einer Verschlechterung des Gesteinszerstörungsprozesses, sowie zu einer Erhöhung oder Senkung der Bohrlochwandstabilität beitragen.

Unter Berücksichtigung des Zeitfaktors muß demzufolge der Bohrprozeß entweder soweit optimiert werden, daß die Spannungsänderungen im bohrlochnahen Bereich nicht zur Auswirkung kommen, oder, und das ist der technisch-ökonomisch richtige Weg, es müssen die auftretenden Spannungsänderungen soweit erkannt und angesteuert werden, daß die Bohrleistung dem unter den jeweiligen Bedingungen möglichen Optimalwert nahe kommt.

In geringen Bohrteufen, bei geringen Meißelwechselzeiten, wird man sich auf eine optimale Bohrgewindigkeit  $v_{\text{mech}}$  und in großen Teufen auf einen maximalen Meißelmarsch orientieren. Der immer größer werdende Anteil der reinen Bohrzeit an der Gesamtbohrzeit läßt erkennen, daß die Spannungsänderungen besonders während des Bohrprozesses überwacht und beeinflußt werden müssen und daß das Spülmedium entsprechend dem Anteil von Bohrzeit zu Round-trip-Zeit zwei Aufgaben zu erfüllen hat.

Die größte Sicherheit im Bohrprozeß wird heute dadurch erzielt, daß die hydraulischen Bedingungen im bohrlochnahen Bereich, ihr Einfluß auf die Gesteinszerstörung und die Bohrlochwandstabilität meßtechnisch erfaßt und im laufenden Prozeß berücksichtigt werden. Dieses erfordert wiederum eine größtmögliche Anpassung des Bohrprozesses an die tatsächlich angetroffenen Bedingungen.

Die Projektierung, d.h. die Vorplanung des Prozeßablaufes, muß demzufolge auf ein höheres Niveau gehoben werden und schlägt sich ökonomisch in den erzielten Ergebnissen nieder. Eine unzureichende Vorbereitung einer Bohrung erfordert einen großen Regelbereich zur Anpassung an die jeweiligen Bohrbedingungen. Zur Erzielung optimaler Bohrleistungen sind kleine Regelbereiche erforderlich, die mit geringstem Materialaufwand, in kürzester Zeit, also mit geringsten Kosten, eine Bohrung niederbringen lassen.

Dazu ist aber zunächst ein hoher Aufwand an Vorbereitungsarbeiten notwendig.

Zur vollständigen Beherrschung des Bohrprozesses sind somit neben einer umfangreichen Vorbereitung eine in bestimmten Grenzen regelbare Bohranlagenleistung und eine variable Bohrlochhydraulik erforderlich. Vor allem muß die meßtechnische Erfassung der Hydraulik des bohrlochnahen Bereiches und ihre Auswertung in Verbindung mit den Gesteinseigenschaften für die Optimierung der Bohrleistung gewährleistet sein. Ausgehend von einer ständig weiterentwickelten Meßtechnik sind zunächst bereits abgeteufte Intervalle oder ganze Bohrungen auszuwerten und zu bewerten. Die Ergebnisse sind in der Projektierung zu berücksichtigen und ständig weiter zu verbessern.

Die Berücksichtigung der Hydraulik im bohrlochnahen Bereich, als Grundlage für eine bedeutende Steigerung der Bohrleistung bei größter Sicherheit, setzt folgende Faktoren voraus:

- hohe Qualifikation des gesamten mit einer Bohrung betrauten Personals,
- Einführung und ständige Weiterentwicklung der entsprechend den petrographischen Bedingungen erforderlichen Meßtechnik,
- Nachweis der steigenden ökonomischen Effektivität und der erhöhten Arbeitsproduktivität auf der Bohranlage,
- Anpassung der Projektierung an die Istsituation im Bohrloch und die Bereitstellung einer variablen Bohrausrüstung,
- Einführung der EDV in die Aus- und Bewertung des Bohrprozesses.

Im Ergebnis ist ein optimaler Gesteinszerstörungsprozeß mit geringstmöglichem ökonomischem Aufwand zu erwarten, der seinerseits die Grundlage für eine spätere Automatisierung der Bohrarbeiten bildet.

## 6. Literaturverzeichnis

- ALIEV, M.G. u.a.: Opredelenie gidrodinamičeskogo davlenija na stenkiskvaziny pri spusko-podemnyh operacijach Burenie (1965)4, S. 10-12
- BARŠAJ, G.S., APOSTOLSKIJ, P.N.: Vozmožnost sniženija kolebanij davlenija v skvažine pri smene dolota, Neft. Choz. 46(1968)6, S. 13 - 16
- CHORJUŠIN, I.G.: Opredelenie nekotorych parametrov režima burenija gidromonitornymi dolotami malych diametrov Burenie (1970)2, S. 4 - 8
- DEILY, F.H. u.a.: Zapisyvajuščee ustrojstvo dlja registracii zaboynch parametrov pri burenii skvažin, Burenie (1969)4, S. 30 - 37
- GIBBS, M.A.: Sostavlenie plana cementirovanija skvažin s učetom davlenij gidravličeskogo razryva plastov Burenie (1966)5, S. 31 - 34
- KRAVČUK, I. Ja., PUSTOVOJTENKO, P.P.: Matematičeskaja zavisimost vlijanija gidrostaticeskogo davlenija na effektivnost raboty dolot pri burenii v jugo-vostočnoj časti Dneprovesko-Doneckoj vpadeny, Burenie (1966)3, S. 13 - 14
- KRUMAN, B.B.: K metodike ocenki vlijanie temperatury na poteri davlenija v cirkuljacionnoj sisteme skvažiny Neft. Choz. 47(1969)4, S. 18 - 20
- MITELMAN, B.I. u. a.: Iseledovanie effektivnosti raboty gidromonitornych dolot, Burenie (1967)11, S. 37 - 39
- MOVŠUMOV, A.A. u.a.: Opredelenie zakonovernosti izmenenija skorosti i uskorenija spuska burilnoj kolonny i ocenka veličiny gidrodinamičeskogo davlenija, vznikajuščego v skvažine, Neft. Choz. 45(1967)6, S. 16 - 18
- MURAVLENKO, V.I. u.a.: Povyšenie effektivnosti raboty gidromonitornych dolot, Burenie (1970)4, S. 7 - 10
- NAZIROV, S.A., KEIMOV, N.K.: O racionalnom sočetaanii faktorov, vliajuščich na izmenenie gidrodinamičeskogo davlenija v skvažine pri podeme burilnogo instrumenta, TEHNIKA I TECHNOLOGIJA GLUBOKOGO BURENIA, isdatelstvo "NEDRA", Moskva 1965, S. 116 - 122
- NEKRASOV, A. M. u.a.: Iseledovanie gidrodinamičeskogo davlenija i temperatury promyvočnoj židkosti pri burenii skvažin, Burenie (1971)3, S. 17 - 20
- OSIPOV, P.F. u.a.: Iseledovanie raboty gidromonitornych dolot pri turbinnom burenii s primeneniem turbo-tachometrov, Neft. Choz. 46(1968)8, S. 1 - 4

- PHILLIPS, J.N., SYKES, C.R.: Problemy burenija glubokich ekvaziin, Burenie (1971)2, S. 40 - 46
- SIŠČENKO, R.I. u.a.: Obratnyi gidravličeskij udar vekvazi-ne s vjazko-plastičnoj židkostju, Neft, Choz 48(1970) 11, S. 13 - 16
- STRUGOVEC, E.T.: Vlijanie gidrostatičeskogo davlenija na effektivnost razrušenija gornych porod pri burenii Burenie (1969)6, S. 27 - 30
- TIMOFEEV, N.S., VUGIN, R.B.: Eksperimentalnoe issledovanie ustalostnogo razrušenija porod ot ciklinych gidro-dinamičeskych nagrusok, Neft. Choz. 47(1969)6, S. 21 - 24
- VIDRINE, D.J., BENIT, E.J.: Promyslovye issledovanija vlijanija differencialnogo davlenija na mehaničeskuj skroost prochodki, Burenie (1969)7, S. 33 - 40
- ZEL'CER, P. Ja.: O vozmožnosti sniženija gidrodinamičeskich davlenij pri spuske obsadnych kolonn, Burenie (1966)6, 21 - 23
- ALLIQUANDER, O.: Das moderne Rotarybohren, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968
- BOATMAN, W.A.: Drill cuttings give pressure clues, Oil & Gas J. 94 (1967) May 29, S. 66 - 71
- COSTLEY, R.D.: Hazards and costs cut by planned drilling programme, Wld. oil 165 (1967) Oct. S. 92 - 96
- EATON, B.A.: Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations, J. Petrol. Technol. 21 (1969)Oct, S. 1353 - 1360
- FERTL, W.H., TIMKO, D.J.: Occurence and significance of abnormal-pressure formations, Oil & Gas J. 98 (1970) Jan. 12, S. 97 - 98; 105 - 107  
How abnormal-pressure-detection techniques are applied, Oil & Gas J. 98 (1970)Jan. 12, S. 62 - 66; 71
- FOSTER, J.B., WHALEN, H.E.: Estimation of formation pressures from electrical surveys - Offshore Louisiana J. Petrol. Technol. 18 (1966)Febr., S. 165 - 171
- GRAF, L., GRODDE, K.H.: Beiträge zur Bohrtechnik, H. 9, S. 29 - 45; 68 - 74
- GRIFFIN, D.G., BAZER, D.A.: A comparison of methods for calculation pore pressures and fracture gradients from shale density measurements using the computer J. Petrol. Technol. 21(1969)Nov., S. 1463 - 1474
- GRODDE, K.H.: Bohrspülungen und Zementschlämme in der Tiefbohrtechnik, Verlag der EZ, Hamburg 1963

- GRODDE, K.H.: Spülungsprobleme, die der Tiefbohrtechnik Grenzen setzen, EK 15 (1962)4, S. 258
- HÄFNER, F.: Die Berechnung der Spülungstemperatur in tiefen und heißen Bohrungen und deren Anwendung zur Berechnung der temperaturgeschädigten Spülungsmenge bei Zirkulationstillstand, Beiträge zur Bohrtechnik, H. 11, (1966), S. 31 - 52
- JORDEN, J.R., SHIRLEY, O.J.: Application of drilling performance data to overpressure detection, J. Petrol. Technol. 18 (1966)Nov., S. 1387 - 1394
- LAMONT, Dr.N.: Spectrum of formation evaluation and how to use it. Petrol. Eng. 38 (1966)4, S. 60 - 63; 5, S. 100, 101, 103, 104; 6, S. 90, 97, 98, 100, 102, 104
- MAHONY, B.J.: Seven-point program cuts deep well drilling costs, Wld. oil, 169(1969)Oct. S. 87 - 90
- MARX, C.: Über die Gesteinszerstörung in großen Teufen beim drehenden Bohren, EEZ, 83 (1967)10, S. 354 - 363
- MATTHEWS, W.R., KELLY, J.: How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs Oil & Gas J. 95 (1967)Febr. 20, S. 92, 93, 96, 98, 100, 105, 106
- MOORE, P.L.: Formation data are critical in pressure-transition zone, Oil & Gas J. 67 (1969)1, S. 81 - 82
- MOORE, P.L.: Mud maintenance is key in pressure-transition zone, Oil & Gas J. 67 (1969)6, S. 72 - 78
- PENNEBAKER, E.S.: Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure, Wld. oil, 166 (1968) June, S. 73 - 77
- ROGERS, L.: How shell detects high-pressure formation on the Gulf Coast, Oil & Gas J. 94 (1966)May 16, S. 264 - 266
- RÖDIGER-KNESCHKE: Technische Mechanik, Bd. 2, Teubner-Verlagsgesellschaft Leipzig, 1962
- STEWART, J.: Balanced-pressure drilling cuts cost, boosts penetrating rate, Oil & Gas J. 65 (1967)39, S. 97 - 99
- SZABO, J., MIKLOS, F.: 0: Gestaltung von Temperaturverhältnissen in Tiefbohrungen, KEF, 104 (1971)7, S. 205 - 211
- WILLIAMS, D.G., BROWN, W.O., WOOD, J.J.: How to cut drilling costs in high-pressure areas, Oil & Gas J. 93 (1965)Oct. 11, S. 145 - 148, 150 - 152

## 7. Bildverzeichnis

1. Gesteinselement unter allseitig gleichem Druck (7)
2. Vergleich der Spannungsverteilung in dichtem und porösem Gestein bei unterschiedlichen Porenraumdrücken (9)  
Quelle: J. Petrol. Technol., 18 (1966)2, S. 165 - 171
3. Wechselwirkung zwischen Bohrloch und Porenraum (14)
4. Störung des hydrodynamischen Gleichgewichtes bei konstantem Druck im Bohrloch und wechselnden Lagerstätten-  
drücken (23)
5. Vereinfachte Darstellung der auftretenden Wärmespannungen im bohrlochnahen Raum (28)
6. Temperaturvorgänge im Bohrloch (30), Quelle: J. Petrol. Technol., 21 (1969)3, S. 333 - 341
7. Vereinfachte Darstellung einer Druckanomalie im Gebirge (34)
8. Änderung des Porenraumdruckes über der Teufe in verschiedenen Bohrgebieten (35), Quelle: ALLIQUANDER, U.: Das moderne Rotarybohren, Leipzig 1968, S. 244
9. Vergleichende Darstellung der Dichteänderung von Tongesteinen (41)
10. Charakteristische Bohrkleinausbildung bei voller Beherrschung des Gesteinzerstörungsprozesses mit geeigneten Bohrwerkzeugen und Bohrregimen (42)
11. Beispiele für den Einfluß des Differenzdruckes zwischen Porenraum und Bohrloch auf die Bohrbarkeit des Gesteins (44), Quelle: Burenie, (1969)7, S. 33 - 40
12. Änderung der Gesteinsbohrbarkeit als Funktion der Bohrgeschwindigkeit bei Anpassung der Spülungsparameter an den Porenraumdruck (45), Quelle: Wld. oil, 165 (1967) Aug. 1, S. 69 - 74
13. Einflüsse des Porenraumdruckes auf den Spülungskreislauf (46)
14. Vereinfachte Darstellung des Zusammenhangs zwischen Dichte, Bohrgeschwindigkeit und Widerstand des Gesteins (50), Quelle: Oil & Gas J., 98 (1970)Nov. 23, S. 79, 80, 82, 83, 86
15. Änderung des Gesteinswiderstandes über der Teufe (51)  
Quelle: Oil & Gas J., 98 (1970)Jan. 12, S. 62 - 66, 71
16. Änderung des Gesteinswiderstandes über der Teufe im Vergleich mit dem Salzgehalt der Lagerstättenwässer (51), Quelle: Oil & Gas J., 98 (1970)Jan. 5, S. 97, 98, 105 - 108

17. Das Eigenpotential des Gesteins und seine Korrelation mit dem Gesteinswiderstand (52), Quelle: Wld. oil, 168 (1969)3, S. 38 - 43
18. Korrelation der Schalleitfähigkeit mit anderen Bohrprozeßmeßwerten (54), Quelle: Wld.oil, 171 (1970)10, S. 78 - 82
19. Die Schalleitfähigkeit im Bereich von Druckanomalien (56), Quelle: Wld. oil, 171 (1970)10, S. 78 - 82
20. Charakteristische Darstellung der Schalleitfähigkeit über der Teufe (57), Quelle: Oil % Gas int., 9 (1969)3, S. 32, 33 - 36, 39
21. Typischer Akustik-log-Druckverlauf (58), Quelle: Oil & Gas J. 98 (1970)April 27, S. 80 - 83
22. Die Auswirkung der Druckanomalie für die Dichte des Gesteins (58), Quelle: Petrol. Eng., 41 (1969)7. S. 49, 50, 52, 57, 60, 63
23. Bestimmung der Druckanomalie aus Bohrloch- und Bohrprozeßmeßdaten (59), Quelle: Oil & Gas J., 98 (1970) Aug. 24, S. 53 - 55
24. Vergleich der Bohrgeschwindigkeit mit anderen Bohrprozeßmeßdaten (60), Quelle: Oil & Gas J., 96 (1968) Febr. 5, S. 109, 110
25. Nomogramm zur Bestimmung des d-Exponenten (62), Quelle: Petrol. Eng., 41 (1969)9, S. 101-103, 106, 108, 109



## 8. Symbole und Einheiten

$\alpha_1 \dots \alpha_n$	- Wärmeübergangszahlen	kcal/m <sup>2</sup> ·h·grad
d	- Durchmesser	mm
$F_{M,W}$	- Meißelbelastung	kp; lb
H	- Teufe	m
$\lambda_G$	- Wärmeleitfähigkeit (Gebirge)	kcal/m·h·grad
$n, N$	- Drehzahl	min <sup>-1</sup> ; min <sup>-1</sup>
$P_B$	- Bohrkleinporosität	
$p_B$	- Druck im Bohrloch	kp/cm <sup>2</sup>
$PBS$	- Bohrlochsohlendruck	kp/cm <sup>2</sup>
$p_L$	- Lagerstättendruck	kp/cm <sup>2</sup>
$p_p$	- Porenraumdruck	kp/cm <sup>2</sup>
$p_x, p_y, p_z$	- Drücke in axialer Richtung	kp/cm <sup>2</sup>
R	- elektr. Widerstand	$\Omega$
$\rho$	- Dichte	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_B$	- Bohrkleindichte	g/cm <sup>3</sup>
S	- Oberlagerungsdruck	psi
$\sigma_H$	- Horizontalspannung	kp/cm <sup>2</sup>
$\sigma_R$	- Radialepannung	kp/cm <sup>2</sup>
$\sigma_T$	- Tangentialspannung	kp/cm <sup>2</sup>
$\sigma_V$	- Vertikalspannung	kp/cm <sup>2</sup>
l	- Laufzeit	s/m
$T_1 \dots T_n$	- Temperatur	°C
$v_{mech, R}$	- mechanische Bohrgeschwindigkeit	m/h; ft/h

Einheiten im SI-System

$\alpha_1 \dots \alpha_n$	- Wärmeübergangszahlen	$\text{W/m}^2 \cdot \text{grad}$
d	- Durchmesser	m
$F_{M,W}$	- Meißelbelastung	$\text{N/m}^2$
H	- Teufe	m
$\lambda_G$	- Wärmeleitfähigkeit (Gebirge)	$\text{W/m} \cdot \text{grad}$
n, N	- Drehzahl	1/min
$P_B$	- Bohrkleinporosität	
$P_B$	- Druck im Bohrloch	$\text{N/m}^2$
$P_{BS}$	- Bohrlochohlendruck	$\text{N/m}^2$
$P_L$	- Lagerstättendruck	$\text{N/m}^2$
$P_p$	- Porenraumdruck	$\text{N/m}^2$
$P_x, P_y, P_z$	- Drücke in axialer Richtung	$\text{N/m}^2$
R	- elektr. Widerstand	$\Omega$
$\rho$	- Dichte	$\text{kg/m}^3$
$\rho_B$	- Bohrkleindichte	$\text{kg/m}^3$
S	- Überlagerungsdruck	$\text{N/m}^2$
$\sigma_H$	- Horizontalspannung	$\text{N/m}^2$
$\sigma_R$	- Radialspannung	$\text{N/m}^2$
$\sigma_T$	- Tangentialspannung	$\text{N/m}^2$
$\sigma_V$	- Vertikalspannung	$\text{N/m}^2$
l	- Laufzeit	s/m
$T_1 \dots T_n$	- Temperatur	$^\circ\text{K}$
$v_{\text{mech}}, R$	- mechanische Bohrgeschwindigkeit	m/s

## 9. Sachwörterverzeichnis

- Akkumulator, Spannungs- 11  
Analyse des Bohrkleins 46  
Anomalie, Druck- 34  
-, Temperatur- 31  
Ausbildung, Bohrklein- 42  
Auswertung 20
- Balanciertes Bohren 55  
Beanspruchung, Gesteins- 22  
Bereich, bohrlochnaher 15,34  
-, permeabler 17  
Bohrbarkeits/änderung 43  
--index 62  
Bohren, balanciertes 55, 60  
-, unterbalanciertes 55  
Bohrgeschwindigkeit 25  
Bohrgeschwindigkeitsmessung 50  
Bohrklein/analyse 46  
--ausbildung 42  
--dichte 59  
--porosität 59  
Bohrloch/achse 28  
--form 21  
--messung 54  
--naher Bereich 15,34  
--sohle 21  
--sohlenreinigung 48,59  
--wand 21  
--wandstabilität 16  
Bohrprozeßmessung 59  
Bruchfestigkeit 20
- Deformation, elastische 20  
-, plastische 20  
d-Exponent 61  
Dichte, Bohrklein- 59  
--messung 50,55  
-, Gesteins- 41  
-, Spülungs- 46  
Differenzdruck 43  
Druck/anomalie 34  
- der Spülungsäule 14  
-, dynamischer 16  
-, Frac- 16  
-, Gebirgs- 12  
-, statischer Oberlagerungs- 16  
-, Strömungs- 16  
Druckgradient, geostatischer 35
- , hydraulischer 35  
-, tatsächlicher 35  
Druckkraft 21  
Druckkomponenten, geometrische 12  
-, hydraulische 12
- Eigen/festigkeit 16,29  
--potential 52  
Einfluß, physiko-chemischer 25  
-, Temperatur- 26  
Einrichtung, Meß- 22  
Elastische Deformation 20  
Elastizitätsmodul 27  
Elektrische Leitfähigkeit 52
- Festigkeit, Bruch- 20  
- Eigen- 16,29  
Filterkruste 26  
Fließwiderstand 47  
Formations-Frac-Gradient 55  
Fracdruck 16  
Fracgradient 46  
Futterrohre 29
- Gammastrahlung 53  
Gebirge, unverritztes 7  
Gebirgs/druck 12  
--temperatur 27  
Gegendruckregelung 25  
Geomechanische Druckkomponente 12  
Geostatischer Druckgradient 35  
Geothermische Tiefenstufe 29
- Gestein, impermeables 21  
-, permeables 29  
-, Sediment- 8,18  
Gesteins/beanspruchung 22  
--dichte 41  
--matrix 8,14,34  
--widerstand 49  
--zertrümmerungsleistung 43
- Gleichgewicht, hydrodynamisches 14,24,29

Gradient, Formations-Frac- 55  
 -, Frac- 46

Haftwasser 41  
 Havarie 35  
 Hochdruckzone 36  
 Horizontalseismik 55  
 Hydraulische Druckkomponente 12  
 Hydraulischer Druckgradient 35  
 Hydraulische Wirkkomponente 22  
 Hydrodynamisches Gleichgewicht 14,24,29

Infiltration 25  
 Impermeables Gestein 21

Kraft, Druck- 21  
 -, Schlag- 21  
 -, Zug- 21

Längsspannungen 28  
 Leitfähigkeit, elektr. 52  
 -, Schall- 53  
 -, Wärme- 27

Mantel, Zement- 29  
 Mechanische Wirkkomponente 22  
 Meißelstandzeit 25,30  
 Messung, Bohrgeschwindigkeits- 50  
 -, Bohrloch- 54  
 -, Bohrprozeß- 59  
 -, Dichte- 50,55  
 Messung, Neutron-Gamma- 53  
 -, reflexions-seismische- 40  
 -, Widerstands- 49  
 Meß/einrichtungen 22  
 --technik 48  
 Migrationsweg 11  
 Modul, Elastizitäts- 27

Neutron-Gamma-Messung 53  
 Niederdruckzone 38

Permeabler Bereich 17  
 Permeables Gestein 29  
 Petrographie 20  
 Pleistische Deformation 20  
 Poren/inhalt 8,15  
 --raum 10,15  
 --raumdruck 9,15,34  
 --volumen 8,10  
 Porosität, Bohrklein- 59  
 Potential, Eigen- 52

Radiale Zugspannung 28  
 Reflexions-seismische-Messung 40

Regeltechnik 20  
 Regelung, Gegendruck- 25  
 Rheologie der Spülung 47  
 Rohrschuhteufe 53,61

Schalleitfähigkeit 53  
 Schlagkraft 21  
 Sedimentgestein 8,18  
 Seismik, Horizontal- 55  
 Sohlenreinigung, Bohrloch- 48,59

Spannung, Längs- 28  
 -, radiale Zug- 28  
 -, tangentielle Zug- 28  
 -, Temperatur- 27  
 Spannungs/akkumulator 11  
 --zustand 14  
 --verteilung 9  
 Spülungs/dichte 46  
 --kreislauf 23,47,61  
 --rheologie 47  
 --temperatur 27  
 --typ 30  
 --verlust 23  
 Stabilität, Thermo- 31  
 Statischer Oberlagerungsdruck 16,34  
 Strömungsdruck 16

Tatsächlicher Druckgradient 35

Technik, Meß- 48  
 -, Regl- 20  
 Tektonik 10  
 Temperatur/anomalie 31  
 --einfluß 26  
 -, Gebirgs- 27

--gefälle 27  
 --spannung 27  
 -, Spülunge- 27  
 Thermostabilität 31  
 Tiefenstufe, geothermische 29  
 Tonschiefer 40  
  
 Oberlagerungsdruck, statischer 7,34  
 Unterbalanciertes Bohren 55  
 Unverritztes Gebirge 7  
  
 Verlust, Spülunge- 23  
 Verteilung, Spannungs- 9  
 Volumenstrom 26  
  
 Wärme/ausdehnungskoeffizient 27  
 --austausch 27  
 --übergangszahl 28  
 Wechsel/lagerungen 39  
 --wirkung, physiko-chemische 25  
  
 Widerstand, Fließ- 47  
 -, Gesteine- 49  
 Widerstandsmessung 49  
 Wirkkomponente, hydraulische 22  
 -, mechanische 32  
  
 Zeitfaktor 17,32  
 Zementationsintervall 53,61  
 Zementmantel 29  
 Zugkraft 21  
 Zugspannung, radiale 28  
 -, tangentielle 28