

Deutsche Bohrmeisterschule

Breite Straße 1  
3100 Celle

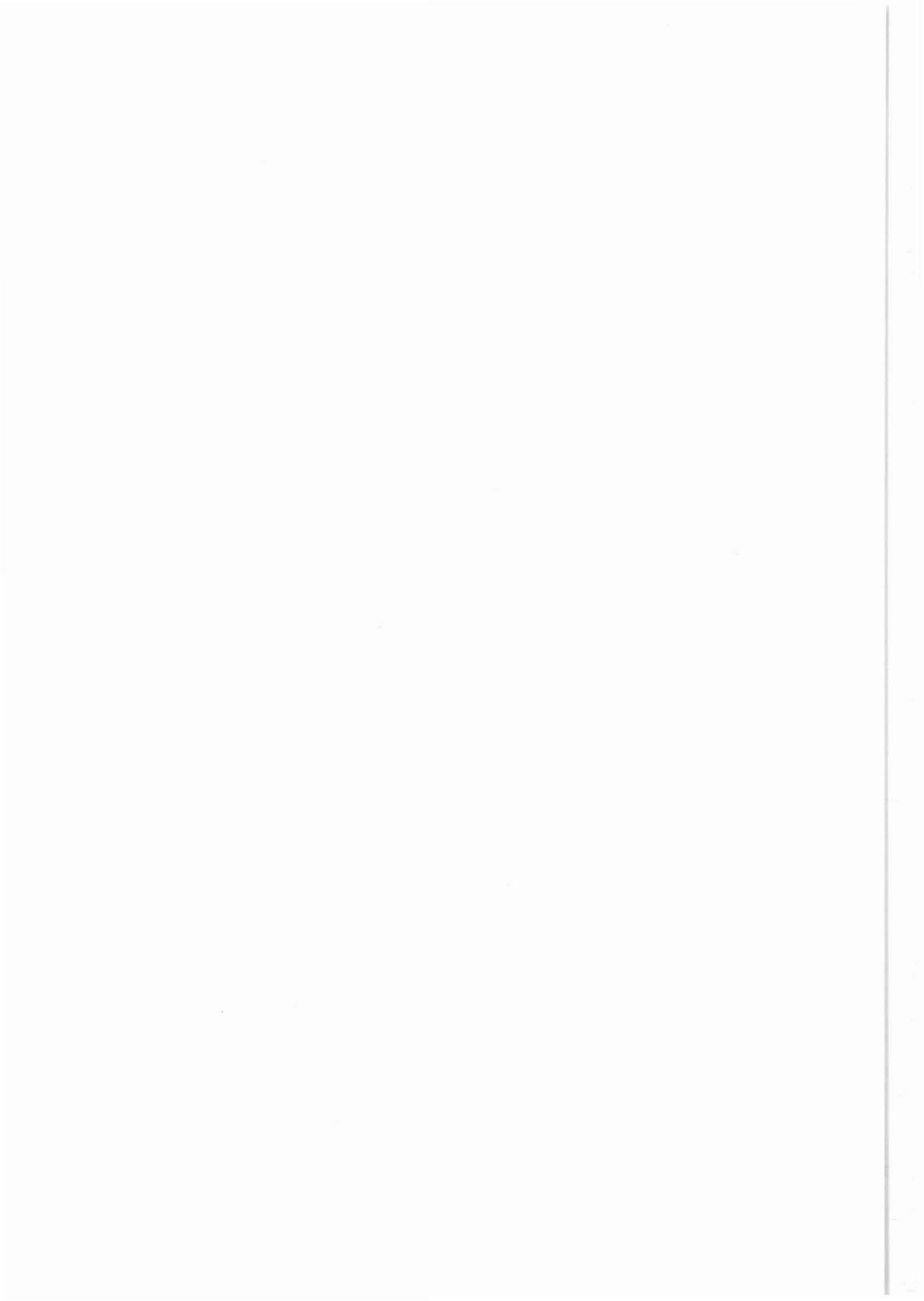
## Studien Bohrlochhydraulik und Bohrlochkontrolle

Dr.-Ing. G. Schaumberg



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung.....	493
2. Einleitung.....	494
3. Kick-Entstehung.....	495
4. Kick-Erkennung.....	497
4.1 Allgemeines.....	497
4.2 Anzeichen während des Bohrens.....	497
4.2.1 Zunahme der Spülungs-Auslaufrate.....	497
4.2.2 Anstieg der Tankfüllstände.....	497
4.2.3 Ausfließen der Spülung bei abgeschal- teten Pumpen.....	497
4.2.4 Änderung der Bohrgeschwindigkeit.....	497
4.2.5 Verschnittene Spülung.....	498
4.2.6 Sonstige Anzeichen.....	498
4.3 Anzeichen während des Roundtrips.....	499
4.4 Anzeichen, wenn sich kein Strang im Bohr- loch befindet.....	499
4.5 Flow-Check.....	499
5. Bohrlochbeherrschung.....	499
5.1 Allgemeines.....	499
5.2 Einschließen von Bohrungen.....	500
5.3 Totpumpverfahren.....	501
5.3.1 Allgemeines.....	501
5.3.2 Totpumpmethoden mit Gestänge.....	503
5.3.3 Die volumetrische Methode.....	504
5.4 Andere Methoden.....	505
6. Sicherheitsberechnungen.....	506
7. Bohrlochkontroll-Rechner-Programm.....	507
8. Literaturverzeichnis.....	509



## BOHRLOCH - KONTROLLE

### I ZUSAMMENFASSUNG

Bohrlochkontrolle mit dem Ziel, einen Ausbruch (blowout) zu verhindern, ist in der Tiefbohrtechnik auf Kohlenwasserstoffe ein besonders wichtiges Thema. Eine Reihe von Vorschriften, die zum Teil bereits internationale Gültigkeit haben (entsprechende EG-Richtlinien), unterstreichen die Bedeutung und die internationale Wichtigkeit, die diesem Kapitel zugemessen wird. Beim KONTINENTALEN TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND spielt die Bohrlochkontrolle jedoch eine untergeordnete Rolle, da bei diesen Bohrung wegen der erwarteten geologischen Struktur, auf die die Bohrungen angesetzt wurden, kaum mit entsprechenden Lagerstätten und Zuflüssen aus diesen zu rechnen ist. Trotzdem gelten auch hier die allgemeinen behördlichen Auflagen, die verlangen, daß mit Bohrlochabsperrorganen gearbeitet wird, und daß die Bohrmannschaft und die Aufsichtspersonen mit deren Bedienung sowie mit den Grundlagen der Bohrlochkontrolle vertraut sind.

Das nachstehende Bohrlochkontroll-Programm versteht sich nicht als Lehrbuch für die Bohrlochkontrolle, sondern ist in erster Linie ein Rechenprogramm, das im Falle eines Kicks in schnellster Zeit die erforderlichen Daten, die zum Totpumpen der Bohrung erforderlich sind, liefert. Das Programm steht in GW-Basic unter MS-DOS und ist auf allen PC's mit MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig. Es ist ebenso anwendbar für Situationen, in denen eine Zirkulation möglich ist, wie auch für Situationen, bei denen eine Zirkulation nicht möglich ist (z.B. weil sich kein Gestänge im Bohrloch befindet). Daneben können Sicherheitsbeiwerte wie die Kick-Toleranz und der Druckverlauf im Ringraum, die Bohrlochsohlendrucke, die Drücke am Rohrschuh der letzten Rohrtour, die Choke-Drücke sowie das Zuflüßvolumen beim Auszirkulieren eines Gaskicks mit dem Kick-Severity-Programm berechnet werden. Da das Gesamt-Programm in Menüform geschrieben wurde, lassen sich die einzelnen Berechnungen unabhängig voneinander schnell durchführen. Ein Korrekturprogramm gestattet es, die einmal eingegebenen und separat abgespeicherten Grunddaten einer Bohrung jederzeit zu modifizieren bzw. den bohrtechnischen Gegebenheiten anzupassen.

2

**EINLEITUNG**

Bohrlochkontrolle und Ausbruchsverhütung (blowout-prevention) haben in der Tiefbohrtechnik einen besonders hohen Stellenwert, weil sie entscheidend mit dazu beitragen, Leben zu schützen, Energievorkommen zu schonen, Bohr- und Erschließungskosten zu senken und nicht zuletzt die Umwelt zu schützen. Aus diesen Gründen sind auch die, die Bohrlochkontrolle betreffenden Vorschriften, weltweit sehr eng gefaßt, so daß die Personen, die sich mit der Erschließung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen beschäftigen, gezwungen sind, sich intensiv mit den Fragen der Bohrlochkontrolle auseinander zu setzen und ihr Wissen um diese Dinge in entsprechenden Schulungen ständig aufzufrischen.

Beim Abteufen der Kontinentalen Tiefbohrung kann allerdings davon ausgegangen werden, daß Kohlenwasserstoffe nicht angetroffen werden, und daß Kicksituationen kaum eintreten dürften. Und wenn, dann könnte es sich höchstens um das Anbohren von gespannten Laugen handeln, die im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen wie Naturgas oder Erdöl vergleichsweise harmlos sind. Trotzdem müssen auch Bohrungen, bei denen die Kickgefahr kaum gegeben ist, wie beispielsweise Kavernenbohrungen oder geologische Aufschlußbohrungen, sofern sie der Bergaufsicht unterstehen, mit den in der KWSt-Bohrtechnik üblichen Bohrloch-Absperreinrichtungen versehen werden, damit im Falle eines Kicks die Bohrung eingeschlossen werden kann. Ausnahmen von dieser Regelung sind nur in Ausnahmefällen möglich.

Aus diesen Gründen ist es richtig, daß auch beim KONTINENTALEN TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND die Möglichkeit gegeben ist, eine Bohrlochkontrollsituation bewältigen zu können. Bohrloch-Absperreinrichtungen und deren Handhabung fallen in den Zuständigkeitsbereich des Bohrpersonals, das dafür entsprechend ausgebildet ist. Ebenso das Erkennen von Kicksituationen und die dann zu ergreifenden Sofortmaßnahmen wie das Einschließen und schließlich das Totpumpen der Bohrung. Deshalb sollen diese Fragen in der vorliegenden Studie auch nur kurz behandelt werden. Hauptzweck der Arbeit war es, mit den in der Tiefbohrtechnik üblichen und international anerkannten Berechnungsgrundlagen ein Rechnerprogramm aufzustellen, das die für die Bohrung Verantwortlichen im Falle eines Kicks in kürzester Zeit in die Lage versetzt, die zum Totpumpen der Bohrung notwendigen Daten zu ermitteln. Da es unterschiedliche Verfahren bei der Kickbekämpfung gibt, wurden diese in Menüform zusammengestellt, wobei alle festen Daten, sowie alle Daten, die sich nur selten ändern, nach einmaliger Eingabe auf Diskette abgespeichert werden und somit bei Bedarf sofort ausgelesen werden können. Dadurch wird die Berechnung beschleunigt und Eingabefehler vermieden.

Das Programm ist auf allen PERSONAL COMPUTERN unter MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig.

3

KICK-ENTSTEHUNG

Ein Kick tritt immer dann auf, wenn der Formationsporendruck, das ist der Druck, den die Porenfüllung eines Gesteins (im weitesten Sinn) auf die Bohrlochswand ausübt, größer ist als der auf die Wand wirkende Druck der Spülungssäule im Bohrloch (hydrostatischer Druck). Durch den Überdruck tritt der Inhalt der Formation (Öl, Gas, Lauge) in das Bohrloch ein und verdrängt dabei die Spülung, so daß es zu einem Überlaufen der Bohrung kommt (Kick).

Wird eine solche Situation schnell erkannt und die Bekämpfung sofort eingeleitet, so kann ein Kick eine verhältnismäßig harmlose Angelegenheit sein. Wird dagegen der Kick zu spät erkannt, so kann dieser leicht in einen Blowout mit allen seinen gravierenden Folgen übergehen.

Da eine Unterdruck-Situation in einem Bohrloch niemals bewußt herbeigeführt werden wird, soll im folgenden kurz aufgelistet werden, wie es zu einer solchen Situation kommen kann.

Einer der wesentlichen Gründe ist eine unzureichende Spüldichte, die allerdings auch wiederum nicht beabsichtigt sein wird, sondern sich im Laufe der Bohrarbeiten ergibt. Ursache hierfür können abnormale Lagerstättendrücke sein. Das kommt insbesondere in geologisch unbekanntem Gebieten, also bei Aufschlußbohrungen, vor, wo plötzlich Formationen angebohrt werden, die unter einem höheren Formationsporendruck stehen, als erwartet wurde. Solche Hochdruck-Lagerstätten können u.a. durch Kompaktion des Speichergesteins entstehen, durch thermische Expansion oder tektonische Vorgänge und sind i.a. nur schwer vorhersagbar.

Erschwerend kommt hinzu, daß in der modernen Bohrtechnik in der Regel druckausgeglichen gebohrt wird, d.h. mit einer Spüldichte, die einen hydrostatischen Druck ergibt, der nur wenige bar über dem erwarteten Formationsporendruck liegt. Dadurch kann ein möglichst hoher Bohrfortschritt erreicht werden, da dieser stark vom Differenzdruck auf der Bohrlochsohle abhängt. Bei diesem Vorgehen können naturgemäß selbst leichte Schwankungen des Formationsporendruckes zu einer Überdrucksituation und damit zu einem Kick führen.

Eine weitere, verbreitete Kick-Ursache ist ein unzureichend mit Spülung gefülltes Bohrloch. Ursache hierfür können beim Bohren Spülungsverluste sein, beim Roundtrip dagegen unsachgemäßes Auffüllen des Bohrlochs beim Ziehen des Stranges. Letzteres ist eine recht häufige Kick-Ursache, weshalb auf das sachgemäße Auffüllen des Bohrloches beim Ausbau des Stranges besonderer Wert gelegt werden sollte. Die Verwendung eines Trip-Tanks ist dabei auf jeden Fall zu empfehlen.

Kicks, die als Folge von Spülungsverlusten eintreten, können große Schwierigkeiten bereiten, da Spülungsverluste teilweise

nur schwer zu bekämpfen sind und Kicks i.a. sehr spät bzw. zu spät erkannt werden, da das Ansteigen des Spülungsspiegels im Bohrloch oft nicht registriert werden kann. Folge solcher Situationen können unterirdische Blowouts, also ein Umsteigen von Lagerstätteninhalten aus tieferen in höhere Formationen sein, die dann meistens außerhalb jeglicher Kontrolle sind.

Swab- und Surge-Effekte können ebenfalls zu Kick-Situationen führen, wobei unter den Swabben oder Ankolben zu verstehen ist, daß z.B. durch zu schnelles Hochfahren des Stranges, insbesondere bei engen Clearance-Verhältnissen, die Spülungssäule unterhalb des Stranges unterbrochen wird, so daß sich der hydrostatische Druck auf der Bohrlochsohle reduziert. Ursache für eine solche Unterbrechung ist, daß die Spülung besonders an den großkalibrigen Strang-Einbauteilen (Stabilizer, Meißel) nicht so schnell vorbei in den unteren Teil des Bohrloches strömen kann, wie der Strang nach oben bewegt wird (Blendeneffekt). Bei einer solchen Unterbrechung wirkt dann nur noch der Druck des unterhalb des Bohrwerkzeugs befindlichen Spülungssäule auf die Bohrlochsohle, was in der Regel völlig unzureichend ist, um den Formationsporendruck zu kompensieren. Abhilfe schafft hier ein langsames Fahren des Stranges.

Surge-Drücke, also Druckwellen, die sich beim schnellen Einlassen eines Stranges vor diesem aufbauen, können zum Fracen des Gebirges und damit zu Spülungsverlusten führen, die wiederum Ursache für Kicks sein können.

Vergaste Spülung (gas cut mud) wird als Kick-Ursache vielfach überbewertet, denn der Einfluß, den eine Vergasung und die damit verbundene Dichtereduzierung auf den Bohrlochsohlendruck hat, ist meistens relativ gering. Allerdings deutet vergaste Spülung darauf hin, daß eine gasführende Schicht durchteuft wurde. Sie ist also ein Anzeichen dafür, daß eine Kicksituation nicht ausgeschlossen werden kann, und daß entsprechende Vorsicht geboten ist. Auch sollte die Spülung bei der übertägigen Aufbereitung ordnungsgemäß entgast werden, da es ansonsten zu Gasansammlungen kommen kann, die dann tatsächlich zu bedeutungsvoller Dichte- und Druckreduzierung führen können.

Ein ganz entscheidender Punkt bei der Kick-Entstehung ist menschliches Versagen, das zusammen mit einer oder mehreren der genannten Ursachen zu Kicksituationen führen kann. Hier hilft nur eine gründliches Aus- und Weiterbildung der Bohrmannschaft, damit diese Kicksituationen jederzeit gewachsen ist und zum richtigen Zeitpunkt die richtigen Maßnahmen ergreift.

## **4 KICK-ERKENNUNG**

### **4.1 Allgemeines**

Kicks kommen meistens nicht überraschend, sondern kündigen sich durch eine Reihe von eindeutigen Signalen an. Diese zu kennen und zu erkennen ist wichtig, um schnell entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Nur durch schnelles und fachgerechtes Handeln kann eine Kicksituation erfolgreich abgewendet und damit die Gefahr eines Blowouts vermieden werden.

Bei den Warnsignalen, die auf einen Kick hindeuten, muß zwischen solchen Anzeichen, die ihre Ursache eindeutig in einer Kicksituation haben, und solchen, die auch andere Ursachen haben können, unterschieden werden. Erstere werden als primäre, letztere als sekundäre Indizien bezeichnet. Die sekundären Indizien sind jedoch deshalb besonders bedeutungsvoll, weil sie, wenn sie einmal Anlaß zu einer Fehldeutung waren, gern verharmlost werden, so daß dann, wenn sie tatsächlich auf einen Kick hinweisen, nicht ernst genommen werden.

### **4.2 Anzeichen während des Bohrens**

#### **4.2.1 Zunahme der Spülungs-Auslaufrate**

Eine Zunahme der Spülungsfließrate bei konstanter Pumprate ist einer der ersten, deutlichen Hinweise auf eine Kicksituation, da hier ein Zufluß aus der Lagerstätte zum Spülungs-Zirkulationsvolumen hinzu kommt. Anzeigerät ist das Flowmeter.

#### **4.2.2 Anstieg der Tankfüllstände**

Steigen die Spülungsspiegel in den Umlauftanks an, ohne daß neue Spülung dem Zirkulationssystem zugesetzt wurde, so zeigt das, aus den vorstehend beschriebenen Gründen, ebenfalls eine Kicksituation an. Anzeigeräte sind die Tankstandsanzeiger.

#### **4.2.3 Ausfließen der Spülung bei abgeschalteten Pumpen**

Fließt auch bei abgeschalteten Pumpen Spülung aus dem Bohrloch aus, so zeigt das wiederum eine Kicksituation an, da der Zufluß aus der Lagerstätte die Spülung aus dem Bohrloch drückt.

#### **4.2.4 Änderung der Bohrgeschwindigkeit**

Eine plötzliche Änderung des Bohrfortschritts (sog. drilling break), ist ebenfalls ein Hinweis auf einen möglichen Kick. Der Grund hierfür ist, daß der Bohrlochsohlen-Differenzdruck umgekehrt wurde. Normalerweise liegt ein Überdruck des hydrosta-

tischen Druckes vor, was dazu führt, daß die vom Bohrelement mechanisch gelösten Gesteinsteilchen (Cuttings) durch diesen Druckanteil auf die Bohrlochsohle gepreßt werden. Überwiegt jedoch der Formationsporendruck (Kick), so wird das Cuttings-teilchen nach dem mechanischen Lösen in den Spülstrom geschleudert und abtransportiert. Das führt zu einer optimalen Bohrlochsohlenreinigung und damit zu gesteigertem Bohrfortschritt.

Allerdings kann für einen erhöhten Bohrfortschritt auch eine Änderung der Bohrbarkeit des Gesteins (Formationswechsel) verantwortlich sein, so daß es sich hier nur um ein sekundäres Indiz handelt. Ein Flowcheck wird Klarheit über die Ursache verschaffen.

#### 4.2.5 Verschnittene Spülung

Verschnittene Spülung oder Cut Mud entsteht u.a. dadurch, daß gashaltige Cuttings mit dem Spülstrom nach oben transportiert werden und in druckschwächeren Zonen entgasen. Dabei ergeben selbst unter Lagerstättenbedingungen geringe Gasinhalte an der Oberfläche große Gasvolumina, was oftmals zu Fehldeutungen führt. Allerdings deutet vergaste Spülung immer auf Gasinhalte in der durchteuften Formation hin, wenngleich in der Regel die Permeabilitäten und/oder Porositäten so gering sind, daß es nicht zu einer Kicksituation kommen kann. Trotzdem ist auch bei diesem Alarmzeichen Vorsicht geboten, da sich ein Kick immer entwickeln kann.

#### 4.2.6 Sonstige Anzeichen

Eine unproportional zum Vertiefen der Bohrung ansteigende Spülungstemperatur, sowie eine Zunahme der Salinität der Spülung seien aus Gründen der Vollständigkeit noch als Kickanzeichen genannt, obwohl sie in der Praxis bedeutungslos sind.

Als weitere Indizien für Kicks zählen die Abnahme des Pumpendruckes und die Zunahme der Pumpenhubzahl. Das liegt in der Dichtereduzierung der Zirkulationsspülung durch das zugeflossene, leichtere Medium aus der Formation begründet. Aus dem gleichen Grund wird es auch zu einer Änderung des Stranggewichtes kommen, da der Auftrieb, der auf den Strang wirkt, abnimmt.

Schließlich kann es noch zu einer Änderung der Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Drehtischs kommen, ausgelöst durch den schwankend erhöhten Bohrfortschritt (drilling break).

### 4.3 Anzeichen während des Roundtrips

Nimmt das Bohrloch während des Gestängeausbaus nicht die erforderliche Spülmengemenge auf, so deutet das darauf hin, daß ein Teil des Bohrlochs aus der Formation aufgefüllt wird, daß also ein Kick eingetreten ist. Gleiches gilt auch, wenn das Bohrloch während des Gestängeeinbaus stärker überläuft, als der Gestängeverdrängung entspricht.

### 4.4 Anzeichen, wenn sich kein Strang im Bohrloch befindet

Befindet sich kein Gestänge im Bohrloch, so gibt es nur ein Anzeichen für einen Kick, das Überlaufen des Bohrloches (Tankzufluß). Selbst wenn solche Kicksituationen selten sind, da die Bohrung normalerweise beim Bohren, spätestens beim Gestängeausbau hätte kicken müssen, sollte eine Bohrung auch dann, wenn sich kein Strang im Loch befindet, ständig auf Zufluß überwacht werden. Das geschieht am besten mittels eines Triptanks, der mit dem Spülsausrücklauf verbunden ist, da hier bereits kleinere Zuflüsse rechtzeitig erkannt werden können.

### 4.5 Flow-Check

Wird ein Kickanzeichen wahrgenommen, das nicht eindeutig auf eine Kicksituation zurückzuführen ist, so sollte mittels eines sog. Flow-Checks geprüft werden, ob ein Zufluß stattgefunden hat oder nicht.

Um einen Flow-Check durchzuführen, werden die Pumpen gestoppt (soweit sie bisher in Betrieb waren) und der Auslauf mit dem Triptank verbunden. Nun wird kontrolliert, ob aus dem Bohrloch Spülung ausfließt, was in dieser Situation normalerweise nicht geschehen dürfte. Tritt Spülung aus, so ist das ein sicheres Indiz für einen Kick, die Bohrung muß nun eingeschlossen und die Totpumpmaßnahmen müssen eingeleitet werden.

## 5 BOHRLOCHBEHERRSCHUNG

### 5.1 Allgemeines

Die Bohrlochbeherrschung, darunter sind die Maßnahmen zu verstehen, die zur Vermeidung eines Kicks bzw. eines Blowouts zu ergreifen sind, können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden.

Unter der primären Bohrlochbeherrschung versteht man, daß man sich jederzeit so verhält, daß es garnicht erst zu einer Kicksituation kommt. Das bedeutet, daß die Drucksituation in einer

Bohrung ständig beherrscht wird, sofern das technisch möglich ist.

Die sekundäre Bohrlochbeherrschung (vgl. Kap. 5.2) umfaßt alle Maßnahmen, die zu ergreifen sind, wenn ein Kick trotzdem eingetreten ist, um das Bohrloch wieder in einen stabilen Zustand zu überführen.

Der tertiären Bohrlochbeherrschung werden i.a. solche Maßnahmen zugeordnet, die zu ergreifen sind, wenn normale Methoden erfolglos bleiben oder sind. Hierzu zählen im wesentlichen Techniken wie das Einstrippen oder Einsnubben des Stranges oder das Einpumpen von Zement- oder Schwerspatstopfen, um eine Kick-situation zu beenden. Teilweise werden dieser Gruppe aber auch Methoden zur Blowout-Bekämpfung (Entlastungsbohrungen, Ausschießen brennender Sonden, Preventermontage auf eruptierende Sonden ...) zugerechnet.

## 5.2 Einschließen von Bohrungen

Tritt eindeutig ein Kick ein, so muß die Bohrung eingeschlossen werden. Nur so ist zu verhindern, daß aus dem Kick ein Blowout wird.

Art und Vorgehensweise beim Einschließen hängt im wesentlichen von Art und Ausrüstung der Bohranlage und von der Art der Preventeranlage ab. Außerdem spielt hier eine gewisse Philosophie des Einschließens eine entscheidende Rolle.

Allgemein ist man heute der Auffassung, eine Bohrung nach Eintritt eines Kicks so schnell wie möglich einzuschließen, unabhängig von der Größe des Kicks. Dabei kann entweder die Methode des sog. harten Einschließens mittels eines Backenpreventers oder des Ringpreventers angewendet werden, oder die Methode des sog. weichen Einschließens. Dabei wird zunächst die Hydraulik-Düse geöffnet und anschließend der Ringpreventer geschlossen. Durch dieses Vorgehen wird der sog. Wasserschlag, der beim harten Einschließen unvermeidbar ist, jedoch auch nicht überbewertet werden sollte, vermieden werden.

Welche Methode letztlich angewendet wird, hängt von der entsprechenden Einstellung des Betriebes zu Fragen der Bohrlochkontrolle ab. Hier muß jeweils auf die geltenden Betriebsanweisungen verwiesen werden. Gleiches gilt auch für die detaillierte Vorgehensweise beim Einschließen einer Bohrung.

Allerdings gibt es für das Einschließen von Bohrungen auch Grenzen, die dann erreicht werden, wenn sich nach dem Einschließen im Bohrloch Drücke aufbauen, die den Fracdruck an besonders gefährdeten Stellen des Bohrloches überschreiten. Als besonders frac-gefährdet wird i.a. der Bereich am Rohrschuh der zuletzt eingebauten Rohrtour angesehen. Da der kritische Druck an dieser Stelle nicht gemessen werden kann, bedient man sich des sog. MAASP (maximum allowable annular surface pressure).

Das ist der Ringraum-Kopfdruck, der zusammen mit dem hydrostatischen Druck zwischen Oberfläche und Rohrschuhteufe dem Fracdruck am Rohrschuh entspricht. Dieser Druck wird berechnet und gilt als Grenzwert. Wird er beim Einschließen überschritten, so muß entweder der Einschließvorgang unterbrochen werden, oder man nimmt einen möglichen Frac mit den entsprechenden Konsequenzen (unterirdischer Blowout) in Kauf. Wird der Einschließvorgang dagegen unterbrochen (Düse nur soweit schließen, bis der MAASP erreicht ist), so tritt weiter Lagerstätteninhalt in das Bohrloch ein. Gleiches gilt auch bei zu flach eingebrachten vorhergehenden Rohrtouren.

In beiden Fällen kann mittels der sog. LOW CHOKE Methode gearbeitet werden. Diese, zu den unkonventionellen Totpumpverfahren gehörende Methode, arbeitet so, daß man unter Berücksichtigung des MAASP so schnell wie möglich beschwerte Flüssigkeiten in das Bohrloch einpumpt, um so einen möglichst hohen Bohrlochsohlendruck und damit Gegendruck gegen den Formationsporendruck zu bekommen.

Ist die Bohrung eingeschlossen worden, so sind neben der Zuflußmenge der Gestänge- und der Casingeinschließdruck zu ermitteln.

Der Gestängeeinschließdruck (auch Steigleitungsdruck) kann nur ermittelt werden, wenn sich Gestänge im Bohrloch befindet und dieses auch bis auf Sohle eingebaut ist. Der Gestängeeinschließdruck ergibt zusammen mit den hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Strang den Formationsporendruck, also den Druck, mit dem der Kick eingetreten ist.

Der Casingeinschließdruck ergibt ebenfalls den Formationsporendruck, allerdings zusammen mit dem hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Ringraum plus dem hydrostatischen Druck der Säule des zugeflossenen Mediums. Da jedoch i.a. weder die Art und Dichte (besonders bei Gaskicks) des zugeflossenen Mediums, noch die exakte Höhe des Kicks im Ringraum bekannt sind, ist der Casingeinschließdruck nur von bedingter Aussagekraft. Dagegen liefert der Gestängeeinschließdruck den Formationsporendruck dann recht genau, wenn die Dichte der einzirkulierten Spülung bekannt ist, was stets der Fall sein sollte.

Aus den geschilderten Gründen wird der Gestängeeinschließdruck bei allen Totpumpoperationen als Meßgröße zugrunde gelegt. Er wird jedoch beim Totpumpen noch vom Zirkulationsdruck überlagert.

### 5.3 Totpumpverfahren

#### 5.3.1 Allgemeines

Ist ein Kick erkannt und die Bohrung eingeschlossen worden, so beginnt die wesentliche Arbeit, das Totpumpen des Bohrloches.

Hierunter ist zu verstehen, daß das eingedrungene Medium kontrolliert aus dem Bohrloch auszirkuliert wird und gleichzeitig oder im Anschluß daran Maßnahmen ergriffen werden, die eine solche Situation im Bohrloch schaffen, daß ein weiteres Eintreten von Porenhalt in die Bohrung ausgeschlossen wird.

Ist die Kicksituation aufgrund zu leichter Spülung (zu geringer hydrostatischer Bohrlochsohlendruck) entstanden, so bestehen diese Maßnahmen darin, die Spülung entsprechend zu beschweren. Ist die Kicksituation jedoch eingetreten, weil ein Druckungleichgewicht auf Sohle durch z.B. abgesunkenen Spülungsspiegel entstanden ist, so braucht die Spülung nicht beschwert zu werden. In einem solchen Fall muß lediglich der Zufluß auszirkuliert und das Bohrloch anschließend gefüllt gehalten zu werden.

Nach dem Einschließen der Bohrung sind die Maßnahmen zum Totpumpen unmittelbar einzuleiten, da es - insbesondere bei Gas-kicks - aufgrund des großen Dichteunterschieds zwischen Spülung und Zuflußmedium zum Aufsteigen des Zuflußmediums im geschlossenen Bohrloch kommt. Man bezeichnet das als Percolation.

Bei der Percolation von Gas transportiert die Gasblase, da sie in einer eingeschlossenen Bohrung nicht expandieren kann, den Lagerstättendruck mit nach oben. Dieser wirkt nun wie ein Kolben nach oben und unten auf die Spülungssäule und schafft damit, je höher sie aufsteigt, umso kritischere Druckverhältnisse im Bohrloch. Aus diesem Grunde ist das Auszirkulieren eines Kicks auch so zu gestalten, daß der (Gas-)Zufluß stets expandieren kann, da nach den Gasgesetzen das Produkt aus Druck und Volumen stets konstant ist. Das bedeutet aber, daß bei größer werdendem Volumen (Expansion) der Druck zwangsläufig abnehmen muß.

Um eine Bohrung totzupumpen, wurden eine Reihe von einschlägigen Konzepten entwickelt, von denen die nachstehend aufgeführten die größte Bedeutung haben:

- \* die Ein-Zirkulations- oder Warte-und-Beschwere-Methode
- \* die Zweizirkulations- oder Bohrmeister-Methode
- \* die Gleichzeitige Methode
- \* die Volumetrische Methode
- \* die Totpumpmethode mit reduziertem Gegendruck, auch Low Choke Methode genannt
- \* die Über-Kopf-Totpumpmethode (bullhead squeezing)
- \* die Totpumpmethode mit linksläufigem Spülungsumlauf (reversed circulating method)

### 5.3.2 Totpumpmethoden mit Gestänge

Als nahezu gleichwertige Totpumpmethoden für den Fall, daß durch den Strang zirkuliert werden kann, sind die Bohrmeister- und die Warte-und-Beschwere-Methode.

Die Warte-und-Beschwere-Methode ist nach Ansicht vieler Bohrtechniker die geeignetste Methode, um einen Kick unter Kontrolle zu bringen. Dabei wird Spülung mit einer dem Formationsporendruck entsprechenden, erhöhten Dichte mit konstanter Rate in das Bohrloch einzirkuliert bei gleichzeitigem Auszirkulieren des Kicks. Beide Arbeitsgänge erfolgen also während nur einer Zirkulation. Das erspart natürlich Zeit, wenngleich vor Beginn der Zirkulation die Spülung beschwert werden muß, was zuzüglich der dafür erforderlichen Berechnungen Zeit kostet. Somit spart man bei dieser Methode nicht die Hälfte der Zeit, die die Zwei-Zirkulationsmethode erfordert, sondern nur etwa ein Viertel.

Nicht angewendet werden kann diese Methode bei flachen Bohrungen, die einen Gaskick bekommen haben, weil das Gas mit einer Geschwindigkeit von im Mittel etwa 300 - 400 m/h in der eingeschlossenen Bohrung aufsteigt (percoliert), so daß die Zeit zum Ansetzen beschwerter Spülung in der Regel kaum ausreicht. In einem solchen Fall kommt die Bohrmeister-Methode zur Anwendung. Dabei kann unmittelbar nach dem Einschließen und der Stabilisation der Einschließdrücke (d.h. nach etwa 5 - 15 Minuten) mit dem Auszirkulieren des Kicks begonnen werden. Das Auszirkulieren geschieht mit der zum Zeitpunkt des Kicks im Bohrloch befindlichen Spülung. Ist der Kick auszirkuliert, muß die Bohrung nach wie vor geschlossen gehalten werden, da es nur durch Aufbringen eines Kopfdruckes möglich ist, den Formationsdruck zu kompensieren.

Während des Auszirkulierens kann nun separat beschwerte Spülung hergestellt werden, die dann in einer zweiten Zirkulation in die Bohrung eingepumpt wird und diese totpumpt. Obwohl der Zeitbedarf bei dieser Methode größer ist, läßt sie sich einfacher handhaben und ist deshalb auch die verbreitetste Totpumpmethode überhaupt.

Für beide Methoden gilt, daß die Bohrung dann als totgepumpt zu betrachten ist, wenn sich nach dem Verpumpen der beschwerten Spülung beim Einschließen kein Kopfdruck mehr ergibt und ein Flow-Check keinen Zufluß zeigt.

Wichtig bei beiden Methoden ist, daß auch während der Zirkulation ein konstanter Bohrlochsohlendruck beibehalten wird, der mindestens dem Formationsporendruck entsprechen muß, besser jedoch einige bar über diesem liegt, damit bei leichten Druckschwankungen kein erneuter Zufluß stattfindet. Da sich der Bohrlochsohlendruck auch beim Zirkulieren aus dem hydrostatischen Druck der Spülungssäule im Strang zuzüglich dem Gestängeeinschließdruck zusammensetzt, muß der Reibungsdruckverlust im Strang zum Einschließdruck hinzuaddiert und der sich dann ergebende Kopfdruck konstant gehalten werden. Dazu muß

aber der Reibungsdruckverlust bekannt sein. Er wird in bestimmten Zeitabständen ermittelt, indem Spülung mit der Rate, die beim Totpumpen angewendet werden soll, durch das Bohrloch zirkuliert wird.

Die Zirkulationsrate beim Totpumpen wird gegenüber der beim Bohren angewendeten Rate reduziert, weil durch die Reduzierung der zeitliche Ablauf gestreckt wird, so daß die Vorgänge beim Totpumpen besser kontrolliert und gesteuert werden können. Außerdem werden die Reibungsdruckverluste bei reduzierten Zirkulationsrate erheblich reduziert, was mehrere Vorteile mit sich bringt. Zum einen kann im niedrigeren Druckbereich gearbeitet werden, was insbesondere die Absperrorgane der Bohrung schont, zum andern muß beim Totpumpen der Gestängeeinschließdruck zusätzlich zum Zirkulationsdruck von der Pumpe aufgebracht werden. Liegt der Zirkulationsdruck, einschließlich Druckabfall am Bohrwerkzeug, beim normalen Bohrbetrieb ohnehin schon nahe am zulässigen Pumpendruck, so besteht die Gefahr, daß die Pumpe den Einschließdruck nicht mehr aufbringen kann.

Die gleichzeitige Methode ist eine Kombination der Warte- und-Beschwere- und der Bohrmeister-Methode. Dabei wird nach dem Einschließen der Bohrung die Zirkulation mit der unbeschwerten Spülung sofort begonnen, jedoch wird gleichzeitig mit oder ohne System mit dem Beschweren der Spülung begonnen. In der Regel wird das Beschwerungsmittel direkt in den Saugtank gegeben, so daß die effektive Dichte der eingepumpten Spülung meistens nicht bekannt ist. Das Beschweren erfolgt solange, bis die aus dem Bohrloch austretende Spülung die berechnete, neue Dichte aufweist.

Die gleichzeitige Methode ist meistens sehr langwierig, da mehrere Umläufe der Spülung erforderlich sind, bis die angestrebte Spüldichte vorliegt. Sie hat allerdings den Vorteil, daß durch die sofort beginnende Teilbeschwerung die Einschließdrücke reduziert werden, was zur Schonung der Absperrorgane ebenso führt wie zu einer gesamten Druckentlastung des Bohrloches. Das kann dann von Bedeutung sein, wenn der MAASP vom Casingeinschließdruck nahezu erreicht und bei der Zirkulation überschritten wird. Ansonsten hat die gleichzeitige Methode keine große Bedeutung, zumal wenn versucht wird, sie kontrolliert durchzuführen, die Beschwerung der Spülung also mit System durchzuführen. Ein solches Verfahren ist zwar theoretisch möglich, jedoch für den praktischen Betrieb selbst bei Rechnereinsatz zu aufwendig und damit unrealistisch.

### **5.3.3 Die volumetrische Methode**

Befindet sich bei Eintritt des Kicks kein oder nicht genügend Gestänge im Bohrloch, um den Kick von Sohle aus auszuzirkulieren, oder ist bei eingebautem Strang eine Zirkulation nicht möglich (blockierte Düse o.ä.), so muß die volumetrische Methode angewendet werden. Diese Methode basiert darauf, daß der Bohrlochsohlendruck leicht über dem Formationsporendruck

gehalten wird, während der Kick im Bohrloch aufsteigt. Dabei muß einem Gaskick die Möglichkeit der Expansion gegeben werden, indem Spülung kontrolliert aus der Bohrung abgelassen wird.

Die volumetrische Methode wird im wesentlichen bei Gaskicks angewendet, da es bei Flüssigkeitskicks i.a. andere, einfachere Methoden gibt, um den Zufluß aus dem Bohrloch zu beseitigen.

Nachdem der Kick die Oberfläche erreicht hat und abgelassen wurde, muß die zur Expansion eines Gaskicks abgelassene Spülung durch die Kill-Line wieder in das Bohrloch eingepumpt werden, und zwar in demselben Maße wie Gas abgelassen wird. Durch diese Maßnahme wird der Druck in Bohrloch konstant gehalten. Das Einpumpen der Spülung geschieht wie das Ablassen derselben in kleinen Volumeneinheiten, damit die Druckverhältnisse in der Bohrung im vertretbaren Rahmen bleiben.

Ein Beschweren der Spülung ist in der Regel bei solchen Kicks nicht erforderlich, weil ansonsten der Kick bereits beim Bohren hätte eintreten müssen.

#### 5.4 Andere Methoden

Weitere Totpumpmethoden sind die LOW CHOKE Methode, auf die bereits eingegangen wurde (vgl. Kap. 5.2), sowie das Totpumpen über Kopf und die Linkszirkulation.

Das Totpumpen über Kopf (bullheading) wird beispielsweise bei Sauergaskicks angewendet, da Sauergas auf keinen Fall an die Oberfläche gelangen sollte. Dabei wird tunlichst beschwerte Spülung durch die Kill-Line in das Bohrloch gepumpt und versucht, den Kick zurück in die Formation zu drücken. Daß der Kick dabei nicht in die Formation geht, aus der er gekommen ist, sondern sich einen neuen Weg schafft, was die Gefahr eines unterirdischen Blowout in sich birgt, muß dabei in Kauf genommen werden.

Die Methode der Linkszirkulation (reversed circulation) kann nur dann angewendet werden, wenn sich im Strang kein Rückschlagventil befindet und tunlichst auch kein Bohrwerkzeug mit Düsen oder entsprechend kleinen Spülsaustrittsöffnungen, da bei diesen die Gefahr der Verstopfung durch Bohrkleinmaterial besteht. Deshalb wird die Linkszirkulation bevorzugt im Work-over-Betrieb angewendet, wenn mit unten offenen Strängen gearbeitet wird. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Drücke im Ringraum erheblich reduziert werden beim Auszirkulieren, was bei offenen Bohrlöchern und druckschwachen Formationen erhebliche Sicherheiten mit sich bringt.

6

SICHERHEITSBERECHNUNGEN

Neben den reinen Bohrlochkontrollmaßnahmen wie Einschließen und Totpumpen von Bohrungen, können auch noch einige Sicherheitsberechnungen durchgeführt werden. Diese haben mit der Bohrlochkontrolle nur indirekt zu tun, indem beispielsweise die Drücke im Ringraum beim Auszirkulieren berechnet werden, um ein Bild zu bekommen, wo Druckspitzen auftreten, die möglicherweise gefährlich werden können, oder um nach einer Totpumpaktion zu ermitteln, welcher Sicherheitsfaktor bei einer möglichen, neuen Kicksituation noch gegeben ist. Die Berechnungen sind bekannt unter den Bezeichnungen Kick-Severity und Kick-Toleranz.

Die Kick-Severity (Schwere des Kicks) ist ein Berechnungsverfahren, das die Übertagedrücke (Casingdrücke), die Untertagedrücke wie Bohrlochsohlendruck, Drücke an verschiedenen Stellen des Bohrloches beim Auszirkulieren des Kicks, Druck am Rohrschuh der letzten Rohrtour und die übertägige Volumenzunahme beim Auszirkulieren eines Kicks berechnet. Dabei ist zu unterscheiden, ob mittels der Bohrmeister- oder mittels der Warte- und-Beschwere-Methode auszirkuliert wird, da sich bei beiden Verfahren unterschiedliche Ringraumdrücke ergeben. Diese Art von Berechnung ist besonders wichtig, wenn ein Gaskick auszuzirkulieren ist, und wenn der Casingeinschließdruck bereits nahe am MAASP liegt, also ein relativ druckschwaches Gebirge ansteht oder ein großer Zufluß stattgefunden hat.

Unter der Kick-Toleranz ist praktisch ein Sicherheitsfaktor zu verstehen, zwischen der äquivalenten Spüldichte zuzüglich dem Chokedruck, ausgedrückt in Dichtewerten, im Falle des Einschließens der Bohrung bei einem erneuten Kick, und der tatsächlichen Spüldichte der im Bohrloch befindlichen Spülung. Dieser Sicherheitsfaktor führt oftmals zu Fehlinterpretationen, da angenommen wird, daß die Differenz zwischen tatsächlicher Spüldichte und Fracdruck (ausgedrückt in Dichtewerten) für einen neuen Kick bzw. für die Beschwerung der Spülung bei einer erneuten Kicksituation zur Verfügung stünden. Dabei wird vergessen, daß der Casingeinschließdruck oder Chokedruck wie eine Dichtesteigerung der Spülung wirkt (Kopfdruck + hydrostatischer Druck = Bohrlochsohlendruck), die bei der Berechnung der Sicherheitsmarge mit einbezogen werden muß. Der Chokedruck hängt aber von der Größe des Zuflusses, der Teufe der Bohrung, den Clearanceverhältnissen und anderen Faktoren ab und ist nicht überschlagsmäßig zu erfassen.

Das Toleranz- Berechnungsprogramm ermöglicht die Berechnung der max. zulässigen, äquivalenten Spüldichte sowie des max. möglichen Chokedruckes und des max. Formationsporendruckes bei einer bestimmten Kickgröße. Nach Ermittlung dieser Daten kann nun entschieden werden, ob die Sicherheitsmarge für eine erneute, eventuelle Kicksituation ausreichend ist, oder ob eine Zwischenverrohrung eingebracht werden muß.

## 7 BOHRLOCHKONTROLL-RECHNER-PROGRAMM

Das für KTB erarbeitete Bohrlochkontroll-Programm basiert in seinem allgemeinen Teil auf den international üblichen Berechnungsverfahren.

Das Rechnerprogramm ist in GW-Basic unter MS-DOS geschrieben und auf allen PC's mit MS-DOS- bzw. PC-DOS-Betriebssystem lauffähig. Es wurde den bei KTB vorhandenen TANDY-PC's und dem OKI-Laser-Drucker speziell angepaßt.

Das Programm kann sowohl auf einer Festplatte installiert, wie auch auf Rechnern mit 2 Laufwerken betrieben werden. Es ist unterteilt in einen Programmteil und einen Speicherteil. Im Speicherteil werden alle Daten, die für eine Bohrlochkontroll-Berechnung erforderlich sind, gespeichert, so daß bei sich wiederholenden Berechnungen auf diese Daten zurückgegriffen werden kann. Der weitere Vorteil ist, daß alle Daten einer Bohrung, die sich nicht oder nur von Zeit zu Zeit ändern, vorweg eingegeben und gespeichert werden können, so daß im Falle eines Kicks nur 5 Werte eingegeben werden müssen, um eine komplette Kickkontroll-Berechnung durchführen zu können. Diese Eingabedaten sind:

- \* Teufe des Zuflusses
- \* Gestänge- und Casingeinschließdruck
- \* Zuflußvolumen
- \* Zeitpunkt des Kicks.

Die Speicherdaten werden automatisch mit dem Bohrungsnamen gekennzeichnet, so daß eine Verwechslung mit anderen Bohrungen nicht möglich ist.

Um eine höhere Effektivität zu bekommen, wurde das Programm als Menü-Programm geschrieben mit folgenden Einzel-Programmen:

- \* Daten-Eingabe-Programm
- \* Korrektur-Programm zur Änderung gespeicherter Daten
- \* Rechenprogramme zur Berechnung der Totpumpmethoden nach der Bohrmeister- und der Warte-und-Beschwere-Methode
- \* Rechenprogramm zur Berechnung der volumetrischen Methode
- \* Rechenprogramme zur Berechnung von Kick-Toleranz und Kick-Severity

Die Eingabedaten für Rohr- und Bohrlochdurchmesser können in Zoll oder alternativ in metrischen Einheiten eingegeben werden. Umrechnungen entfallen somit. Der Anwender kann während der Arbeit mit dem Programm entscheiden, in welchen Einheiten gerechnet werden soll, unabhängig von den Einheiten der Eingabedaten.

Bei Anwendung des Kick-Severity-Programms stehen dem Benutzer

mehrere Möglichkeiten offen:

- \* Berechnung der Ringraumdrücke bei einer bestimmten Höhe des Kicks (Gasblase) alternativ für die Bohrmeister- oder die Warte-und-Beschwere-Methode
- \* kontinuierliche Berechnung des Druckverlaufs im Ringraum beim Aufsteigen des Kicks (Gasblase) in Tabellenform

Das Programm startet automatisch.

**LITERATURVERZEICHNIS**

2. CHENEVERT, M.E. and HOLLO, R. (1981) : Drilling Engineering Manual - Penn Well Publishing Comp., Tulsa (Okl./USA).
1. REHM, B. (1970) : Pressure Control in Drilling - The Petroleum Publishing Co. - Tulsa (Okl./USA) - Reprinted from the Oil & Gas Journal.
3. SCHAUMBERG, G. : Vorlesungsunterlagen und Scripten zum Thema 'Bohrlochkontrolle' (unveröffentlicht) - Deutsche Bohrmeisterschule, Celle.